



Etude de la fatigue d'origine hygroscopique d'un assemblage lamellé-collé en essences mélangées

Thierry Cagnon

► To cite this version:

Thierry Cagnon. Etude de la fatigue d'origine hygroscopique d'un assemblage lamellé-collé en essences mélangées. Matériaux. Université Paul Verlaine - Metz, 1993. Français. NNT : 1993METZ007S . tel-01775437

HAL Id: tel-01775437

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01775437>

Submitted on 24 Apr 2018

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

vb 78531 .

S/M3
93/7

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DE METZ

par

Thierry CAGNON

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE METZ

Mention : Sciences de l'Ingénieur n° 7642
Intitulé : Sciences du bois

Titre

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE - METZ	
N° inv.	19930205
Cote	S/M3 93/7
Loc.	Magasin

Etude de la fatigue d'origine
hygroscopique d'un assemblage lamellé
collé en essences mélangées

soutenue le 30 Avril 1993, devant la Commission d'Examen :

Mr JODIN Ph., Ingénieur de Recherche, Université de Metz
Mr LEBAN J.M., Chargé de Recherches, INRA Nancy
Mr PERRE P., Professeur ENGREF Nancy
Mr PLUVINAGE G., Professeur, Université de Metz
Mr ZOULALIAN A., Professeur, Université de Nancy I

: Rapporteur

: Rapporteur

Je tiens à remercier Mr. PLUVINAGE de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire de Fiabilité Mécanique de l'Université de Metz et de la confiance qu'il a témoigné dans l'aboutissement de ce travail.

J'exprime également ma gratitude à Mr Philippe JODIN pour les encouragements prodigués tout au long de cette étude.

Merci aussi aux membres du Laboratoire qui ont su entretenir une communication sans laquelle rien n'est possible.

Que les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail, soient ici remerciés.

SOMMAIRE

Liste des symboles	5
Introduction	10
Chapitre 1 . Etude bibliographique .	12
1 . 1 . Introduction .	13
1 . 2 . Le LAmellé COLlé en Essences Mélangées .	
1 . 2 . 1 . Le bois massif .	
1 . 2 . 1 . 1 . Généralités .	13
1 . 2 . 1 . 2 . Influence de l'eau .	17
1 . 2 . 1 . 3 . Influence de la densité .	23
1 . 2 . 1 . 4 . Qualité du bois .	25
1 . 2 . 1 . 5 . Conclusions .	26
1 . 2 . 2 . Cas du Douglas (résineux) et du peuplier (feuillu) .	26
1 . 2 . 3 . Le lamellé-collé	
1 . 2 . 3 . 1 . Généralités .	27
1 . 2 . 3 . 2 . Influence de l'humidité .	30
1 . 2 . 3 . 3 . Caractérisation des collages .	32
1 . 2 . 3 . 4 . Utilisation de deux essences .	36
1 . 3 . Durabilité d'un assemblage collé .	
1 . 3 . 1 . Introduction .	37
1 . 3 . 2 . Vieillissement. Influence des variations d'humidité .	37
1 . 3 . 3 . Essais de vieillissement sans application continue de sollicitation mécanique .	40
1 . 4 . Mesure des déformations .	
1 . 4 . 1 . Introduction .	45
1 . 4 . 2 . Méthode analogique . Analogie électrique .	46
1 . 4 . 3 . Méthodes extensométriques .	
1 . 4 . 3 . 1 . Extensométrie mécanique .	46
1 . 4 . 3 . 2 . Vernis craquelant .	46
1 . 4 . 3 . 3 . Photoélasticimétrie .	46
1 . 4 . 3 . 4 . Moiré .	47
1 . 4 . 3 . 5 . Jauges électriques .	47
1 . 4 . 4 . Méthodes de mesure globale du champ de déformations .	
1 . 4 . 4 . 1 . Mesure des déformations sur une éprouvette de papier .	49
1 . 4 . 4 . 2 . Stéréophotogrammétrie .	51
1 . 4 . 5 . Conclusions .	53
1 . 5 . Conclusions .	53

	Page
Chapitre 2 . Etude expérimentale .	55
2 . 1 . Introduction .	56
2 . 2 . Protocole expérimental .	
2 . 2 . 1 . Mesures .	56
2 . 2 . 2 . Orientation des pièces de l'assemblage .	57
2 . 2 . 3 . Dimensions des éprouvettes .	59
2 . 2 . 4 . Amplitude hygrométrique .	60
2 . 2 . 5 . Période du cycle .	60
2 . 3 . Eprouvettes .	
2 . 3 . 1 . Choix du bois .	61
2 . 3 . 2 . Fabrication des éprouvettes . Collage .	61
2 . 3 . 3 . Marquage par faisceau laser .	63
2 . 4 . Enceinte climatique .	
2 . 4 . 1 . Description de l'appareil .	66
2 . 4 . 2 . Description du fonctionnement .	
2 . 4 . 2 . 1 . Air sec à 20 ° C .	68
2 . 4 . 2 . 2 . Air humide à saturation à 20 ° C .	69
2 . 4 . 3 . Performances .	
2 . 4 . 3 . 1 . Température .	69
2 . 4 . 3 . 2 . Humidité .	69
2 . 5 . Mesures .	
2 . 5 . 1 . Air .	71
2 . 5 . 2 . Bois .	71
2 . 5 . 2 . 1 . Pesage .	72
2 . 5 . 2 . 2 . Dimensions .	72
2 . 5 . 2 . 3 . Photographies .	72
2 . 6 . Remarques .	74
2 . 7 . Conclusions .	75
Chapitre 3 . Digitalisation et traitements des résultats .	76
3 . 1 . Introduction .	77
3 . 2 . Organisation du traitement de données .	77
3 . 3 . Saisies de données .	
3 . 3 . 1 . Généralités .	78
3 . 3 . 2 . Description du procédé .	78

3 . 3 . 3 . Déroulement des séquences de saisie .	
3 . 3 . 3 . 1 . Saisie au clavier .	79
3 . 3 . 3 . 2 . Digitalisation des cales étalons .	80
3 . 3 . 3 . 3 . Digitalisation du contour de l'éprouvette .	81
3 . 3 . 3 . 4 . Digitalisation des points intérieurs au contour .	81
3 . 3 . 3 . 5 . Sauvegarde des données .	82
3 . 3 . 3 . 6 . Remarques .	82
3 . 4 . Conversion des données .	
3 . 4 . 1 . Restitution de l'image digitalisée .	83
3 . 4 . 2 . Calibration des images .	83
3 . 4 . 3 . Changement de repère .	84
3 . 5 . Calculs .	85
3 . 5 . 1 . Théorie des déformations . Rappel du problème plan .	85
3 . 5 . 2 . Application à la surface d'une éprouvette infinie .	
3 . 5 . 2 . 1 . Introduction .	87
3 . 5 . 2 . 2 . Orientation des segments NQ .	87
3 . 5 . 2 . 3 . Précision du calcul .	89
3 . 5 . 2 . 4 . Taille du quadruplet .	91
3 . 5 . 2 . 5 . Recouvrement des quadruplets .	91
3 . 5 . 3 . Application à la surface d'une éprouvette réelle .	
3 . 5 . 3 . 1 . Introduction .	93
3 . 5 . 3 . 2 . Points pris en compte .	93
3 . 5 . 3 . 3 . Maillage multidirectionnel .	95
3 . 5 . 4 . Position et lissage des déformations .	98
3 . 5 . 5 . Représentation d'un instant t .	99
3 . 5 . 6 . Représentations des déplacements .	99
3 . 5 . 7 . Déformations sur une surface à un instant donné .	
3 . 5 . 7 . 1 . Maillage .	100
3 . 5 . 7 . 2 . Représentation des déformations par polygones .	100
3 . 5 . 7 . 2 . Fréquences relatives des valeurs d'une composante .	102
3 . 5 . 8 . Déformations au cours du temps .	
3 . 5 . 8 . 1 . Choix des points .	103
3 . 5 . 8 . 2 . Représentation des déformations .	103
3 . 5 . 9 . Variations de la déformation dans une direction au cours du temps .	104
3 . 6 . Conclusions .	105
Chapitre 4 . Résultats et analyse .	106
4 . 1 . Introduction .	107
4 . 2 . Variations de l'humidité de l'air et du bois .	107
4 . 3 . Champs de déplacements .	114
4 . 4 . Influence de la taille des quadruplets et du collage .	117
4 . 5 . Variabilité longitudinale .	124

	Page
4 . 6 . Variabilité entre éprouvettes .	126
4 . 7 . Evolution du champ de déformation au cours du premier séchage .	129
4 . 8 . Evolution du champ de déformation au cours de la première humidification .	144
4 . 9 . Evolution du champ de déformation à l'état sec .	152
4 . 10 . Evolution du champ de déformation à l'état humide .	161
4 . 11 . Conclusions .	163
 Conclusion	 165
 Références	 168

LISTE DES SYMBOLES

Liste des symboles

f	: longueur d'une cellule de bois
e	: épaisseur d'une cellule de bois
S ₁	: première sous couche de la paroi secondaire d'une cellule de bois
S ₂	: deuxième sous couche de la paroi secondaire d'une cellule de bois
S ₃	: troisième sous couche de la paroi secondaire d'une cellule de bois
P	: paroi primaire d'une cellule de bois
M	: enveloppe mitoyenne d'une cellule de bois
L	: direction ou axe longitudinal
R	: direction ou axe radial
C	: direction circulaire
T	: direction ou axe tangentiel
RT	: plan perpendiculaire à L
LR	: plan perpendiculaire à T
LT	: plan perpendiculaire à R
D	: droite
G	: gauche
Dg	: Douglas
Pp	: peuplier
E _L	: module d'élasticité longitudinal
E _R	: module d'élasticité radial
E _T	: module d'élasticité tangentiel
G _{LR}	: module de cisaillement dans le plan LR
G _{LT}	: module de cisaillement dans le plan LT
G _{RT}	: module de cisaillement dans le plan RT
H	: humidité d'un échantillon de bois
M _H	: masse d'un échantillon de bois d'humidité H
M ₀	: masse d'un échantillon de bois anhydre
HR	: humidité relative de l'air
P.S.F.	: point de saturation des fibres

T°	: température exprimée en ° C
t	: temps
CM	: caractéristique mécanique
K_A	: constante liée à la caractéristique mécanique
K_B	: constante liée à la caractéristique mécanique
H_x	: humidité du bois connue pour laquelle la valeur d'une caractéristique mécanique est cherchée
CM_x	: caractéristique mécanique du bois cherchée à l'humidité H_x
H_t	: humidité du bois particulière pour laquelle la valeur de la caractéristique mécanique est connue expérimentalement
CM_t	: caractéristique mécanique du bois connue à l'humidité H_t
H_v	: humidité du bois à l'état vert
CM_v	: caractéristique mécanique du bois connue à l'humidité H_v
H_a	: humidité du bois séché à l'air libre
CM_a	: caractéristique mécanique du bois connue à l'humidité H_a
V_0	: volume d'un échantillon de bois anhydre
V_H	: volume d'un échantillon de bois humide
$M_{V\text{ eau}}$: masse d'un volume d'eau $V_{V\text{ eau}}$
V_s	: volume d'un échantillon de bois saturé en eau
ρ_{eau}	: densité de l'eau
ρ	: densité d'un échantillon de bois
ρ_0	: densité d'un échantillon de bois anhydre
ρ_H	: densité d'un échantillon de bois humide
Y	: infradensité d'un échantillon de bois
$\sigma_{L\text{ ult}}$: contrainte ultime dans la direction longitudinale
G_I	: taux de restitution d'énergie en mode d'ouverture I
G_{Ic}	: taux de restitution d'énergie critique en mode d'ouverture I
G_{II}	: taux de restitution d'énergie en mode d'ouverture II
G_{IIc}	: taux de restitution d'énergie critique en mode d'ouverture II
K_I	: ténacité en mode d'ouverture I
K_{Ic}	: ténacité critique en mode d'ouverture I

Liste des symboles

O_x, xx	: axe horizontal
O_y, yy	: axe vertical
EE	: direction Est-Est
NE	: direction Nord-Est
NN	: direction Nord-Nord
NO	: direction Nord-Ouest
OO	: direction Ouest-Ouest
SO	: direction Sud-Ouest
SS	: direction Sud-Sud
SE	: direction Sud-Est
ϵ_{xx}	: composante du tenseur des déformations dans la direction O_x
ϵ_{yy}	: composante du tenseur des déformations dans la direction O_y
ϵ_{xy}	: composante de cisaillement du tenseur des déformations
ϵ	: composante du tenseur des déformations
ϵ_{Maxi}	: valeur maximale d'une composante du tenseur des déformations
ϵ_{mini}	: valeur minimale d'une composante du tenseur des déformations
$\bar{\epsilon}$: valeur moyenne d'une composante
ϵ	: déformation apparente d'un segment NQ
ϵ_1	: déformation apparente d'un segment NA
ϵ_2	: déformation apparente d'un segment NB
Φ	: potentiel
(S)	: surface avant déformation
(S^*)	: surface déformée
ΔP	: écart de profondeur
Δm	: résolution de la table à digitaliser
$A, B, A'_1, A'_2, B'_1, B'_2, P_1, P_2, a_1, b_1, a_2, b_2, N, Q$: noms de points
$CE1, CE2, CE3, CE4$: noms des cales étalons
n_1, n_2, r, s	: nombres de points

Liste des symboles

x, y	: coordonnées d'un point N avant déformation
x^*, y^*	: coordonnées d'un point N après déformation
$x+dx, y+dy$: coordonnées d'un point Q avant déformation
x^*+dx^*, y^*+dy^*	: coordonnées d'un point Q après déformation
z	: distance entre deux points sur la table à digitaliser avant déformation
z_{mini}	: distance minimale entre deux sur la table à digitaliser avant déformation
z_{Maxi}	: distance maximale entre deux sur la table à digitaliser après déformation
z^*	: distance entre deux points sur la table à digitaliser après déformation
z^*_{mini}	: distance minimale entre deux sur la table à digitaliser avant déformation
z^*_{Maxi}	: distance maximale entre deux sur la table à digitaliser après déformation
l, m	: coefficients directeurs du vecteur \overrightarrow{NQ}
l_1, m_1	: coefficients directeurs du vecteur \overrightarrow{NA}
l_2, m_2	: coefficients directeurs du vecteur \overrightarrow{NB}
ds	: longueur d'un segment NQ avant déformation
ds^*	: longueur d'un segment NQ après déformation
ds_1	: longueur d'un segment NA avant déformation
ds_2	: longueur d'un segment NB avant déformation
\ominus	: angle entre NA et NB avant déformation
\ominus^*	: angle entre NA et NB après déformation
u, v	: composantes du vecteur déplacement

INTRODUCTION

Introduction

L'amélioration du prix de revient de la poutre lamellée collée en bois est un objectif constant de la recherche concernant ce produit, qui permet en particulier, la reconstitution d'éléments de charpente adaptés, à partir de lamelles ou plis, de bois massif, triés, aboutés et collés après rabotage.

La poutre lamellée collée, utilisée en structure, constituée généralement d'une seule essence, principalement résineuse, voit son coût matière première diminuer si les plis de la partie la plus faiblement sollicitée en flexion sont remplacés par des plis d'une essence aux caractéristiques mécaniques suffisantes et moins couteuse, l'ensemble assurant toujours sa fonction de soutien.

Le peuplier présente ces propriétés. De croissance rapide et en quantité abondante, son emploi est resté cantonné aux domaines des produits à faible valeur ajoutée jusqu'à ces dernières années où son application à la charpente industrielle a été abordée.

Le LAmellé Collé en Essences Mélangées, fruit de cette démarche, est composé de plis de Douglas pour les ailes de la poutre et de plis de peuplier pour l'âme. La faisabilité du produit étant déjà étudiée, un des aspects de la durabilité est abordé dans cette étude : le comportement d'un assemblage mixte collé face à des variations cycliques de l'humidité de l'air environnant.

Le premier chapitre présente le LA.COL.E.M. à partir du lamellé collé traditionnel à une seule essence au travers des composants, leur comportement instantané et à long terme, en particulier face à l'élément prépondérant dans cette étude : l'eau. Une présentation exhaustive des méthodes de mesures de déformations sur une surface sollicitée permet de montrer l'originalité de la méthode de mesure mise au point au cours de ce travail.

Le deuxième chapitre décrit le protocole expérimental adopté et décrit les différentes étapes des expériences menées depuis la fabrication des éprouvettes jusqu'à l'enregistrement des données.

Le troisième chapitre s'attache à la description de l'outil informatique utilisé pour exploiter les données à savoir la digitalisation des images enregistrées par photographie et les étapes de leur traitement ultérieur aboutissant aux calculs des déformations et leur représentations.

Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux et les commentaires qui s'y rapportent, après avoir montré l'influence de certains paramètres sur la validité des valeurs numériques des déformations obtenues.

Une conclusion générale effectue la synthèse des remarques et des résultats apparus au cours de ce travail et propose quelques réflexions sur la poursuite d'une telle étude.

CHAPITRE 1

Chapitre 1 . Etude bibliographique .

1 . 1 . Introduction .

Nous commençons par présenter le lamellé collé en général au travers de ses composants, non assemblés et assemblés, notamment l'influence de l'humidité (celle de la température ne sera pas développée), puis le cas particulier du LAmellé COLlé en Essences Mélangées. Nous évoquons ensuite les problèmes liés à la durabilité d'un tel assemblage et nous terminons par une revue exhaustive des moyens de mesure des déformations sur une pièce. Nous souhaitons ainsi accéder le plus clairement possible à l'analyse des résultats expérimentaux.

1 . 2 . Le LAmellé COLlé en Essences Mélangées .

1 . 2 . 1 . Le bois massif .

1 . 2 . 1 . 1 . Généralités .

L'utilisation du bois massif en construction tend à se réduire au profit d'éléments de bois reconstitué pour des raisons économiques. Les effets des défauts inhérents au bois massif peuvent être atténués dans le volume d'une poutre lamellée collée mais ces défauts existent toujours et leur influence doit être caractérisée. La structure, même du bois exempt de défauts habituels (noeuds, fentes), doit être prise en compte pour pouvoir expliquer les phénomènes tant au niveau macro- que microscopique.

Le bois est un matériau naturel, constituant de l'arbre vivant dont on distingue trois parties (voir la figure 1.1) :

- le houppier (branches et feuillage),
- le tronc, appelé grume une fois extrait de l'arbre et seule partie utilisée en construction,
- la patte (les racines).

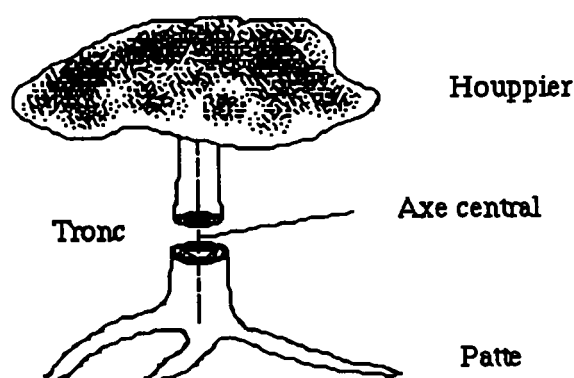


Figure 1.1 : Structure schématique d'un arbre.

Les essences sont réparties en deux groupes :

- les feuillus ou angiospermes,
- les résineux ou gymnospermes.

Le bois offre une microstructure cellulaire qui en fait un matériau anisotrope. Des cellules allongées de faible diamètre et creuses (lumens), parallèles à l'axe central du tronc (voir la figure 1.2), forment l'ossature, assurent la résistance mécanique, composent la part la plus importante de la densité du bois et en dessinent le fil.

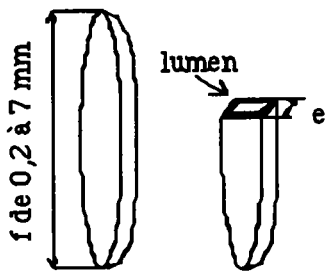


Figure 1.2 : Schéma d'une cellule de type allongée.

Chez les feuillus ces cellules sont appelées fibres, chez les résineux trachéides. Elles assurent l'alimentation des résineux, alors que chez les feuillus, végétaux plus évolués, ce sont des cellules spécifiques, les vaisseaux, qui remplissent cette fonction. Les cellules de parenchymes assurent le stockage des éléments nutritifs et sont orientées dans la même direction.

Perpendiculairement à l'axe central se développent des cellules plus petites que les fibres dont un ensemble s'appelle rayon ligneux qui assurent la conduction des fluides radialement et servent de réserve de nourriture. Le tableau 1.1 donne quelques caractéristiques et la répartition des différentes cellules pour les résineux et les feuillus.

	Résineux		Feuillus		
	Trachéides	Parenchymes	Fibres	Vaisseaux	Parenchymes
Volume en %	85-95	5-12	35-70	6-55	10-32
Longueur f en mm	2,5-7,0	-	0,6-2,3	0,2-1,3	-
Epaisseur e en µm	25-80	-	10-30	20-500	-
Ep de paroi en µm	2-7	-	1-11	-	-
f / e	45-105	-	40-100	0,5-4,5	-

Tableau 1.1 : Caractéristiques des différentes cellules des résineux et des feuillus (d'après (1)).

Les parois de toutes ces cellules sont considérées comme la succession d'enveloppes (nommées S1, S2, S3, P, M de l'intérieur vers l'extérieur de la cellule) de compositions chimiques moléculaires différentes (lignine, hémicelluloses, cellulose). En particulier pour les trachéides nous pouvons nous reporter à la figure 1.3.

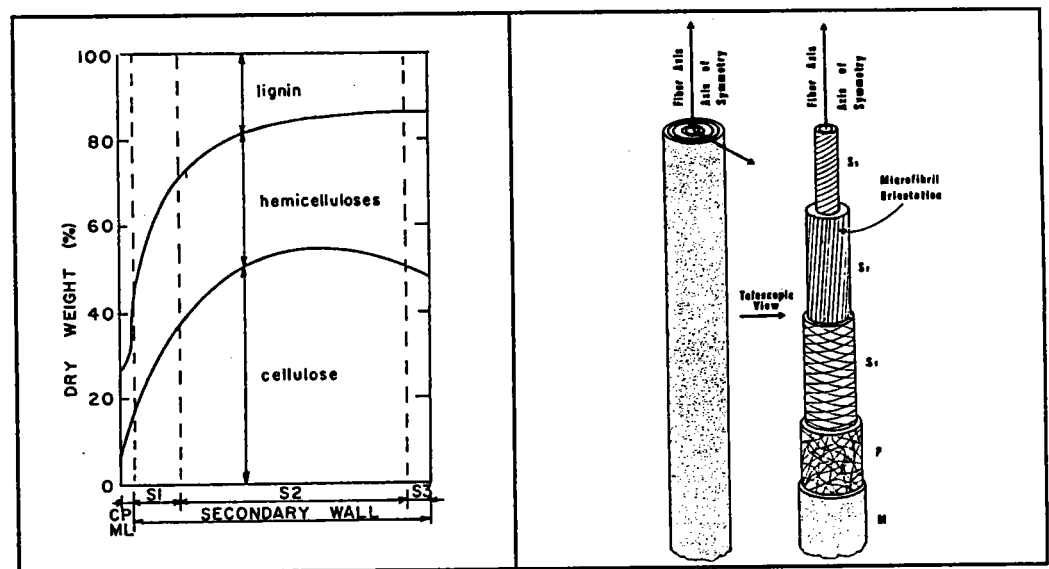


Figure 1.3 : Distribution des constituants dans la paroi d'une trachéide schématisée (1).

Une approche du matériau bois en tant que composite fibreux peut être envisagée si on assimile les enveloppes externes des fibres ou des trachéides, appelées enveloppes mitoyennes (M), riches en lignine et hémicelluloses, à des liants du reste des fibres plus riches en cellulose.

Le développement du bois s'opère dans trois directions de l'espace nommées dans un repère cylindrique (L, R, C) (voir la figure 1.4).

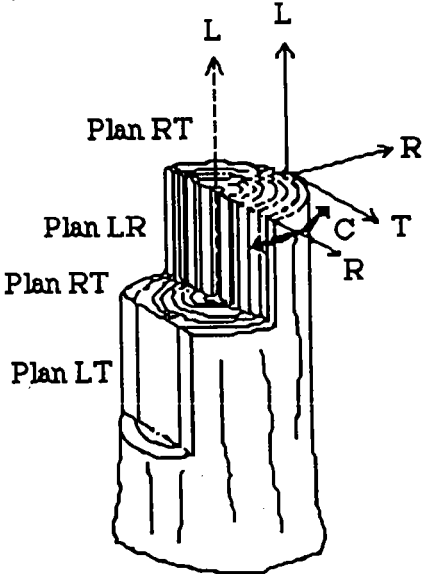


Figure 1.4 : Croissance du matériau bois dans les directions L, R et C.

Au niveau macroscopique une modélisation orthotrope des pièces extraites de grume est utilisée. Le repère orthotrope (L, R, T) est substitué au repère orthotrope cylindrique (L, R, C). Toutefois cette modélisation présente certaines limites. Si nous considérons la section perpendiculaire à L de la figure 1.5, les échantillons 1 et 6 débités sur dosse ou 3 débité sur quartier sont en première approximation de symétrie orthotrope ; par contre 2, 4 et 5 s'éloignent de ce modèle.

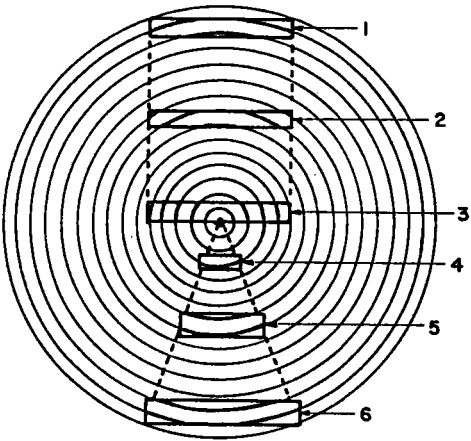


Figure 1.5 : Modélisation orthotrope des pièces extraites d'une grume (1).

Les propriétés mécaniques sont liées à cette organisation du matériau. Si nous attribuons la valeur 1 à la valeur minimale dans une direction donnée, très généralement T pour E et RT pour G, on trouve en moyenne les rapports du tableau 1.2 :

Modules d'Young	E_L	E_R	E_T
Résineux (densité moyenne = 0,45)	13,5	1,7	1
Feuillus (densité moyenne = 0,65)	21	1,6	1
Modules de cisaillement	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
Résineux (densité moyenne = 0,45)	3,4	2,6	1
Feuillus (densité moyenne = 0,65)	10,3	10,3	1

Tableau 1.2 : Valeurs relatives des modules d'Young et de cisaillement suivant la direction de mesure (d'après (2)).

Le module d'élasticité longitudinal E_L est 14 fois plus grand que le module de cisaillement G_{LR} .

La croissance dans la direction radiale s'effectue en deux étapes au cours d'une année dans les zones tempérées avec alternance de saisons. La coupe par le plan RT de la figure 1.6 montre le changement progressif de morphologie des sections des cellules qui conduit à la distinction des cernes de croissance d'une année à l'autre.

A l'intérieur de ces cernes on remarque une première phase de croissance au printemps donnant le bois initial suivie de la deuxième phase de croissance d'été produisant le bois final. Le développement cellulaire s'interrompt pendant la saison hivernale.

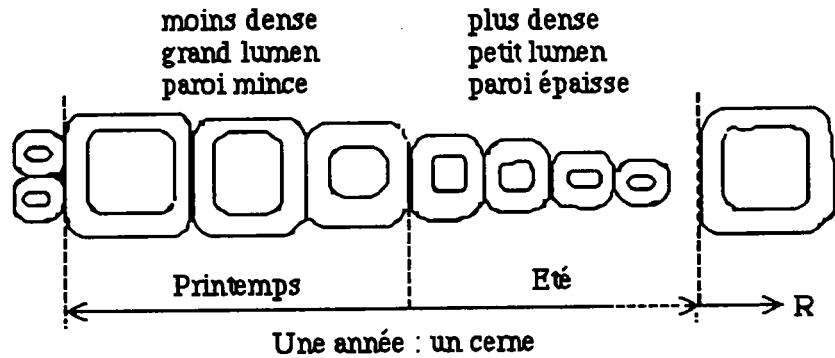


Figure 1.6 : Evolution de la morphologie des sections RT de cellules au cours de la croissance annuelle dans la direction R.

A l'interface de ces différentes zones, en particulier entre cernes, peuvent s'amorcer des fissures.

1.2.1.2. Influence de l'eau.

Le bois, matériau hygroscopique, contient de l'eau en équilibre de pression de vapeur avec l'environnement. Cette eau est présente sous trois formes :

- eau de composition au sein des structures moléculaires,
- eau d'impregnation des membranes cellulaires,
- eau libre dans les vides des cellules qui circule par capillarité.

La quantité d'eau libre et d'impregnation du bois est caractérisée par la valeur H de l'humidité du bois et est définie par la relation :

$$H \text{ en } \% = \frac{M_H - M_0}{M_0} * 100 \quad (\text{Formule 1.1})$$

M_H : masse de l'échantillon humide,
 M_0 : masse de l'échantillon anhydre.

Lors du changement de la valeur de l'humidité relative de l'environnement HR , l'humidité du bois va suivre cette variation. L'évolution du taux d'humidité stabilisée en fonction de la pression de vapeur est représentée sur la figure 1.7. Les valeurs de l'humidité du bois ne sont pas les mêmes selon que celui-ci rejette ou absorbe l'eau.

Ce phénomène d'hystérésis tend à s'amenuiser en renouvelant l'adsorption et la désorption (1). Ces valeurs diminuent avec l'augmentation de la température, les valeurs initiales et finales restant constantes.

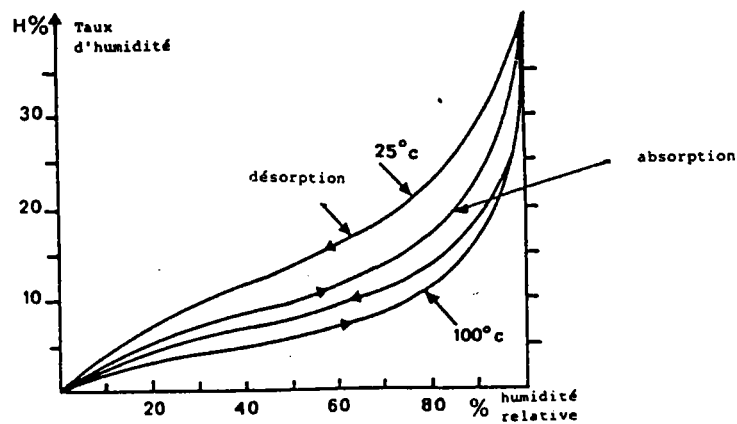


Figure 1.7 : Exemple de variation de l'humidité stabilisée du bois en fonction de l'humidité relative de l'air à l'adsorption et à la désorption (2).

La vitesse de stabilisation dépend non seulement de la température et de l'humidité de l'air mais également des caractéristiques de diffusion interne dans la masse du bois (THES6). Lorsque l'humidité relative de l'air atteint 100%, l'humidité du bois s'élève à environ 30% après stabilisation. Les parois cellulaires sont saturées en eau et le point de saturation des fibres (P.S.F.) est atteint. Au delà de ce seuil d'humidité l'eau vient remplir les lumens. La stabilisation de la valeur de l'humidité du bois est acquise en un mois, cependant 80 % de cette valeur sont réalisés en une semaine (4).

Les propriétés mécaniques du bois dépendent fortement de la teneur en eau entre 0% et le P.S.F.. Les modules d'élasticité, les contraintes ultimes et autres caractéristiques mécaniques tendent à augmenter avec la diminution du taux d'humidité. Le tableau 1.3 présente quelques valeurs de la tendance générale relevées sur plusieurs essences pour deux variations d'humidité.

Caractéristiques mécaniques	Variation relative en % de la caractéristique en référence à H = 12 % du bois et à T° = 20° C	
	à 6% d'humidité du bois	à 20% d'humidité du bois
Module d'Young longitudinal	+9	-13
Module d'Young transversal	+20	-23
Contrainte à rupture en flexion	+30	-25
Contrainte de cisaillement transversale	+18	-18

Tableau 1.3 : Variations relatives de certaines caractéristiques mécaniques du bois en fonction de l'humidité à 20° C (d'après (5)).

La figure 1.8 montre en particulier l'évolution du module relatif d'élasticité longitudinal en fonction de l'humidité du bois : $E_L = 100\%$ à $H = 12\%$ (6).

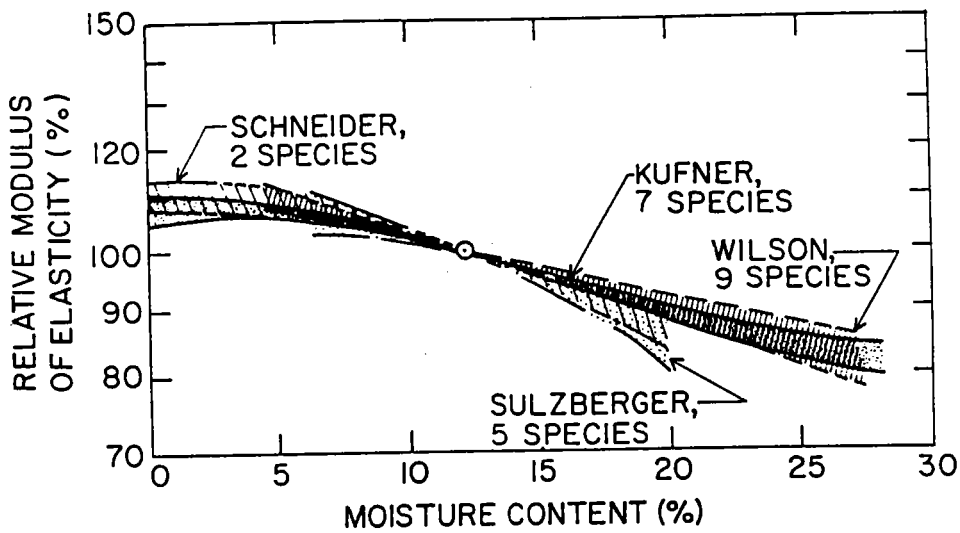


Figure 1.8 : Variation relative du module d'Young longitudinal en fonction de l'humidité du bois : $E_L = 100\%$ à $H = 12\%$ (6).

Il y aurait cependant au dessous de 5 % d'humidité du bois une inversion de cette tendance qui serait due à la microfissuration des cellules au séchage qui affaiblirait le matériau (1).

Pour connaître la valeur d'une caractéristique mécanique à une humidité donnée, inférieure au P.S.F., il est possible d'employer une représentation de l'évolution par une loi exponentielle décroissante (d'après (1)) :

$$CM = K_A e^{-K_B H}$$

 (Formule 1.2)

- CM : caractéristique mécanique,
- H : humidité du bois,
- K_A, K_B : constantes liées à la caractéristique mécanique.

La valeur particulière de la caractéristique mécanique cherchée s'obtient à partir de trois points particuliers relevés sur la courbe représentant la variation de cette caractéristique mécanique en fonction de l'humidité H par la formule 1.3 :

$$\ln CM_x = \ln CM_t + \frac{H_t - H_x}{H_v - H_a} \ln \frac{CM_a}{CM_v}$$

 (Formule 1.3)

Les indices de cette formule ont la signification suivante pour la caractéristique mécanique :

- x : à l'humidité actuelle du bois,
- a : à l'humidité stabilisée à l'air libre ($H_a = 12\%$),
- v : à l'état vert,
- t : à une valeur expérimentale connue de l'humidité autre que les précédentes.

Les conséquences des variations d'humidité sont les suivantes : les parois cellulaires augmentent de volume avec l'adsorption d'eau et diminuent à la désorption. Les molécules d'eau diffusent, dans une première approche, dans les régions amorphes séparant les régions cristallines des parois cellulaires. Ce phénomène est beaucoup plus important perpendiculairement à l'axe longitudinal des cellules que dans le sens de celui-ci. Les essences de faible densité avec des quantités importantes de substances volatiles (ou extraits) se rétractent moins que celles en contenant moins (1).

Le retrait ou gonflement tangentiel est environ le double du retrait radial. Le retrait longitudinal varie entre 0,1 et 0,2 % soit plusieurs fois plus petit que le retrait tangentiel (1). Le retrait radial est contenu par le faible allongement des rayons ligneux. La figure 1.9 montre la variation du retrait tangentiel en fonction de l'humidité finale de pièces de Douglas séchées depuis l'état vert. La dispersion des résultats est notable et traduit la variabilité au sein d'une essence pour une humidité finale donnée.

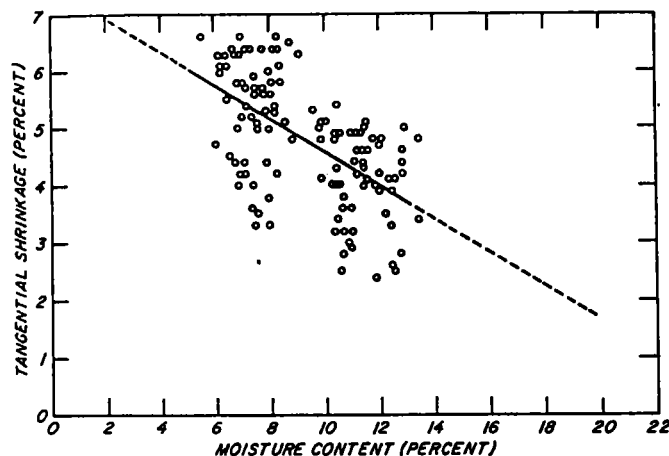


Figure 1.9 : Variation du retrait tangentiel de pièces de Douglas séchées depuis l'état vert en fonction de l'humidité finale (5).

Lors d'un retrait des fissures voire des fentes apparaissent dans le bois massif si les conditions aux limites bloquent certains degrés de liberté.

Au cours des processus de séchage accéléré pratiqués industriellement, l'humidité de l'air est régulée pour ne pas atteindre dans le bois les seuils de fissuration. Ces seuils sont déterminés par l'analyse de l'état de déformation et de contrainte pendant la désorption d'eau. L'emploi de méthodes destructives, consistant à prélever des échantillons dans la pièce contrainte par le séchage (7), donne des valeurs instantanées des contraintes de séchage et ne permet pas le suivi de leur évolution.

La détection permanente de l'émission acoustique de l'ouverture de fissures ne prévient pas de l'imminence de leur apparition.

Une corrélation entre l'intensité de la déformation de séchage et la largeur de la pièce à sécher a été mise en évidence (8). Sur des éprouvettes de largeurs différentes mais de longueur et d'épaisseur constantes, débitées sur dosse, la valeur maximale de la déformation tangentielle engendrée par un séchage à 30° C, de l'état vert à une humidité d'environ 10%, décroît rapidement sur les pièces dont la largeur est comprise entre 2 et 30 millimètres. Cette décroissance se poursuit de façon moins prononcée pour les largeurs supérieures. A partir de la mesure de la déformation tangentielle en séchoir d'une éprouvette de dimensions réduites dont le seuil de fissuration est connu, la régulation de l'humidité de l'air peut être adaptée pour ne pas provoquer la fissuration des autres pièces de dimensions courantes.

Par ailleurs la contrainte de compression interne dans la direction radiale du hêtre, provoquée par l'adsorption d'eau, a été mesurée à partir d'essais de fluage en traction simple (9). La figure 1.10 montre que la valeur de cette contrainte dépend, pendant les premières heures de l'humidification, de l'amplitude de variation de l'humidité du bois. Un pic apparaît sur la courbe pour les variations importantes. Sa valeur absolue est de l'ordre de celle de la contrainte maximale appliquée, soit 6 MPa la moitié de la contrainte à rupture en traction.

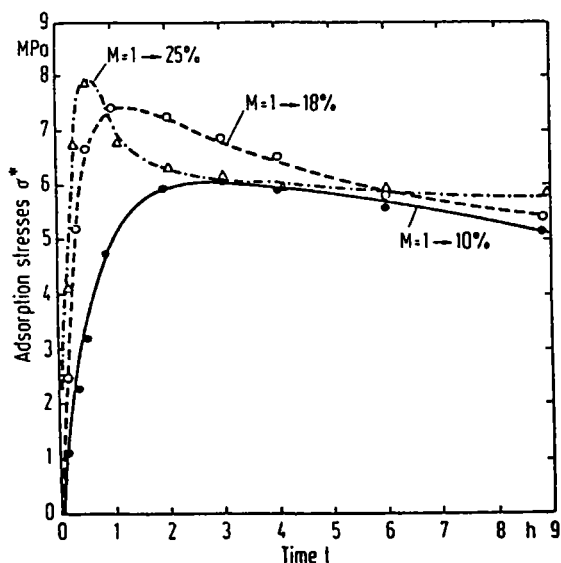


Figure 1.10 : Variation aux cours du temps de la valeur absolue de la contrainte interne générée par l'adsorption d'eau dans du hêtre, mesurée à partir d'essais de fluage en traction simple, pour trois amplitudes de variations d'humidité du bois imposées (9).

Une modélisation tridimensionnelle par éléments finis permet de calculer la cinétique de l'humidification dans les trois directions d'orthotropie d'une pièce de bois parallélépipédique ou cubique en dessous du P.S.F. (10).

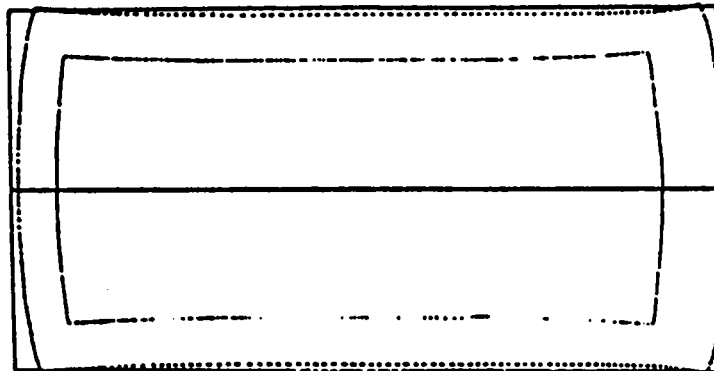
Elle évalue les changements de propriétés mécaniques induits, en tenant compte des remarques suivantes concernant le taux d'échange d'humidité :

- la résistance externe de la surface à la pénétration de la vapeur, suite à la convection de l'eau par l'air, est caractérisée par le coefficient d'émission de surface, proportionnel à la différence entre l'humidité du bois de la surface à l'équilibre à $t = 0$ et à l'humidité à l'instant considéré. L'agitation de l'atmosphère augmente ce coefficient,
- la résistance interne du bois à la diffusion de l'eau obéit à la seconde loi de Fick et le coefficient de diffusion dépend de l'humidité en chaque point.

La diffusivité transversale de l'humidité augmente avec cette dernière alors que la diffusivité longitudinale décroît dans les mêmes conditions. Cette modélisation a été appliquée avec succès à humidité relative de l'air constante ou variant constamment sur du pin sylvestre en évaluant précisément sa prise de poids au cours d'une humidification.

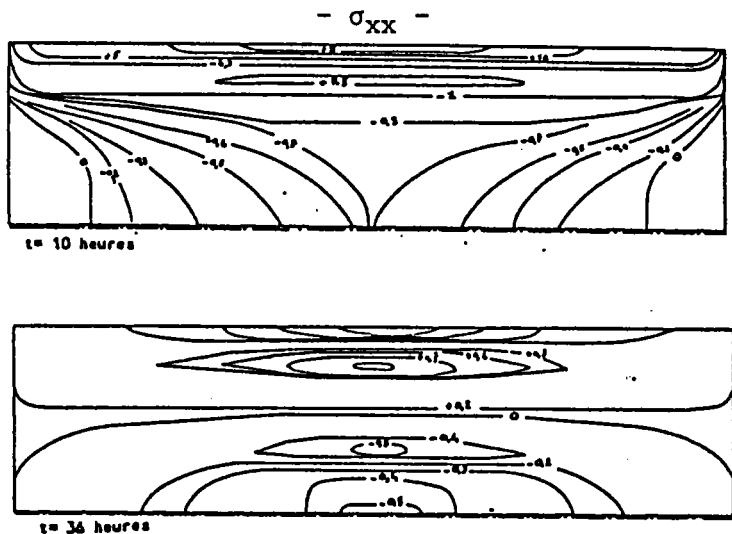
Une autre étude utilisant également le calcul par éléments finis a permis d'analyser le comportement mécanique en deux dimensions dans le plan RT d'une pièce de bois soumise à un séchage (11). Le bois y est considéré comme un milieu continu, homogène, viscoélastique orthotrope, les axes d'orthotropie étant confondus localement avec les axes privilégiés du matériau. Ses caractéristiques dépendent de la température et de l'humidité locales. Le champ de contrainte est relié aux déformations par une loi de Burgers.

Les figures 1.11 et 1.12 présentent quelques résultats obtenus sur une éprouvette à section rectangulaire de pin maritime, débitée sur quartier. Les déformations sont supposées planes et le gradient d'humidité de la pièce unidirectionnel (vertical).



Le débit sur quartier se déforme peu alors que le débit sur dosse tire à coeur. Les trois contours correspondent depuis l'extérieur à $t = 0$ h ($H = 39\%$), $t = 10$ h et $t = 30$ h ($H = 12\%$) de séchage. Les déplacements représentés sont multipliés par 10.

Figure 1.11 : Représentation de la déformation sur une section RT d'éprouvette de pin maritime, débitée sur quartier, au cours d'un séchage (11).



Les courbes d'isovaleurs des contraintes dans la direction horizontale, perpendiculaire au gradient d'humidité, à deux instants $t = 10\text{ h}$ et $t = 36\text{ h}$, ont été interpolées sur la moitié de la section de la figure 1.11. On peut y détecter une inversion des contraintes due à l'utilisation du modèle viscoélastique.

Figure 1.12 : Représentation de la distribution des contraintes calculée dans la direction horizontale (radiale) sur une section RT d'éprouvette de pin maritime débitée sur quartier au cours d'un séchage (11).

Cette inversion a été confirmée par des mesures de vérification, au moyen de jauges d'extensométrie, en trois points alignés verticalement dans le sens du gradient d'humidité au centre d'une éprouvette réelle (voir la figure 1.13).

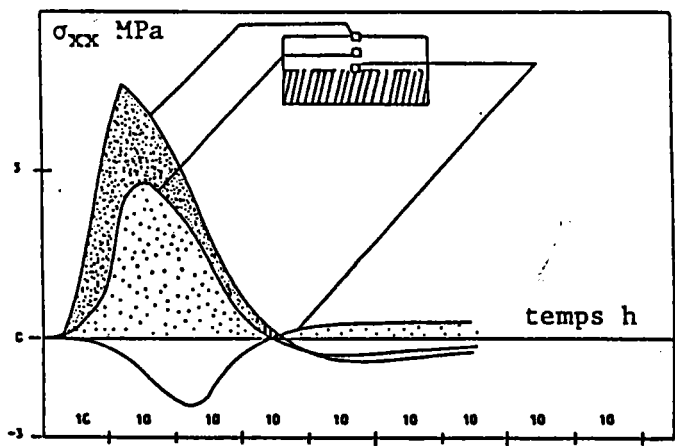


Figure 1.13 : Contraintes normales dans la direction horizontale sur une section RT d'éprouvette de pin maritime débitée sur quartier au cours d'un séchage (11).

1 . 2 . 1 . 3 . Influence de la densité .

La masse volumique du bois, matériau poreux, est le rapport de la masse de l'échantillon à son volume apparent. Le bois étant hygrophile, l'adsorption et la désorption d'eau modifie cette masse et également le volume considéré ; la connaissance du degré d'humidité du bois est indispensable à la définition de la masse volumique.

Si la masse volumique du bois est comparée à la masse volumique de l'eau, on définit la densité du bois. Avec $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ g/cm}^3$ et en utilisant les mêmes unités pour le bois, nous pouvons utiliser les trois densités définies par l'AFNOR, pour un échantillon donné. Le formalisme utilise les symboles suivant :

- M_0 : masse de l'échantillon de bois anhydre,
- V_0 : volume de l'échantillon de bois anhydre,
- M_H : masse de l'échantillon de bois humide,
- V_H : volume de l'échantillon de bois humide,
- $M_{v \text{ eau}}$: masse du volume d'eau égal à V_H ,
- V_s : volume de l'échantillon de bois saturé en eau (P.S.F.).

Ces définitions sont reportées dans le tableau 1.4 :

Densité anhydre	$\rho_0 = \frac{\left(\frac{M_0}{M_{v \text{ eau}}}\right)}{V_0}$ <div>(Formule 1.4)</div>
Densité à humidité donnée	$\rho_H = \frac{\left(\frac{M_H}{M_{v \text{ eau}}}\right)}{V_H}$ <div>(Formule 1.5)</div>
Infradensité	$Y = \frac{\left(\frac{M_0}{M_{v \text{ eau}}}\right)}{V_s}$ <div>(Formule 1.6)</div>

Tableau 1.4 : Définitions des densités du bois.

La densité de matière ligneuse proprement dite est constante et égale à 1,53.

Au niveau macroscopique, les modules d'élasticité et les contraintes à rupture sont reliés à la densité. La figure 1.14 montre en particulier la relation entre le module d'Young longitudinal du peuplier et sa densité. Une bonne corrélation est trouvée ici avec la relation suivante (12) :

$$E_L = 46\,706 \, \rho^{1.87}$$

(Formule 1.7)

Différents auteurs proposent des relations analogues pour toutes les caractéristiques techniques pour les différentes essences (2).

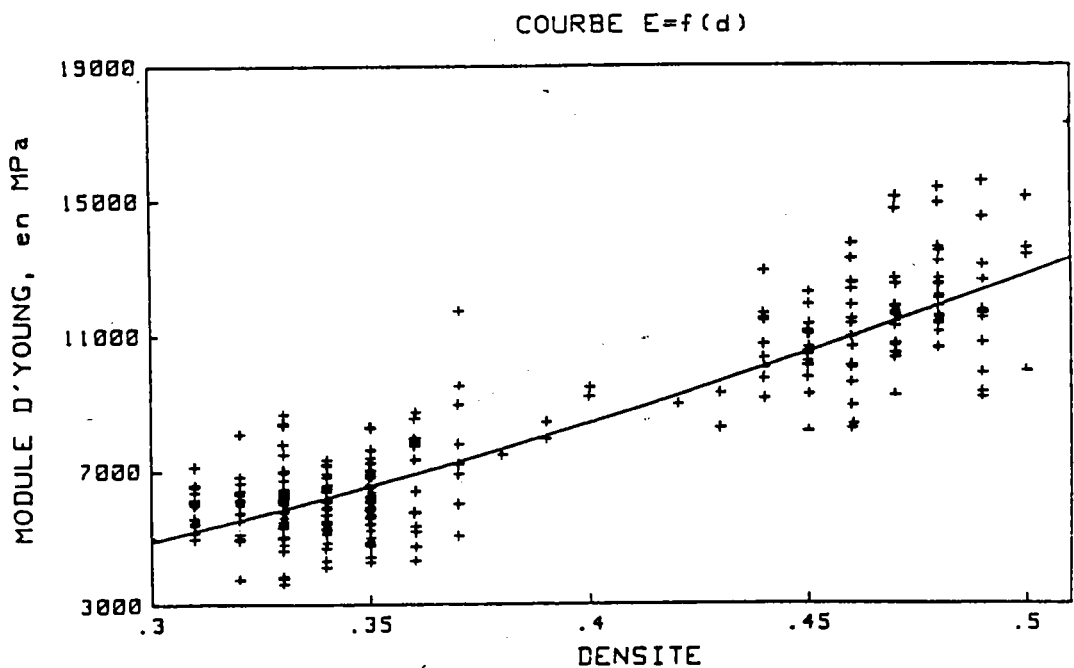


Figure 1.14 : *Variation du module d'Young longitudinal en fonction de la densité de plis de deux variétés de Populus x americana (12).*

La densité du bois peut varier de 1 à 3 dans un cerne de croissance, de 1 à 6 au sein d'une même essence et de 1 à 30 entre essences (1).

1.2.1.4. Qualité du bois.

Mises à part sa structure orthotrope et les phases de croissance, le bois peut présenter des tissus cellulaires rompant l'homogénéité du matériau, en particulier sa densité, entraînant la modification de ses propriétés mécaniques et de sa réponse à l'humidité :

- au niveau microscopique du bois de réaction plus dense peut naître sous l'effet principalement d'efforts extérieurs à l'arbre. La morphologie des cellules et leurs associations sont altérées. Ainsi du bois dit "de tension" apparaît du côté supérieur d'un tronc incliné, alors que du bois dit "de compression" existe du côté inférieur chez les résineux. Ce type d'anomalie peut contribuer à créer un défaut macroscopique tel la roulure.
- au niveau macroscopique, la base des branches, vivantes ou mortes, est incluse dans le tronc par suite de la croissance en diamètre de celui-ci. Une réorganisation de l'arrangement des cellules pour compenser le développement des branches provoque la déviation du fil du bois et de la densité.

1 . 2 . 1 . 5 . Conclusions .

L'hétérogénéité du bois massif est atténuée au niveau macroscopique. Une modélisation orthotrope du matériau permet une description appropriée de son comportement. L'humidité d'une pièce de bois conditionne la valeur de ses propriétés mécaniques et de ses variations dimensionnelles associées. Cette humidité fluctue avec les variations de l'humidité relative de l'environnement. Ces variations peuvent provoquer un endommagement mécanique du matériau réduisant sa résistance aux diverses sollicitations mécaniques.

1 . 2 . 2 . Cas du Douglas (résineux) et du peuplier (feuillu) .

Le tableau 1.5 met en parallèle les valeurs de certaines caractéristiques du Douglas et du peuplier :

Caractéristiques	Douglas	Peuplier
P.S.F.	26 % (1)	31,5 % (1)
Retraits de vert à 12 % :		
- radial	4,8 % (1)	4,6 % (1)
- tangentiel	7,5 % (1)	8,2 % (1)
- volumique	11,8 % (1)	12,7 % (1)
E_L	16700 (2)	6830 MPa (2)
E_R	947 MPa (2)	1190 MPa (2)
E_T	932 MPa (2)	493 MPa (2)
G_{LR}	747 MPa (2)	1000 MPa (2)
G_{LT}	800 MPa (2)	900 MPa (2)
G_{RT}	114 MPa (2)	200 MPa (2)
$\sigma_{L \text{ ult tension}}$	84 MPa (13)	71 MPa (13)
$\sigma_{L \text{ ult compression}}$	41 MPa (13)	38 MPa (13)
$\sigma_{L \text{ ult cisaillement}}$	8 MPa (1)	4 MPa (14)
Densité :		
- moyenne	0,48 (2)	0,40 (2)
- Bois de printemps (a)	0,2 ~ 0,3 (1)	
- bois d'été (b)	0,6 ~ 0,8 (1)	
- (b) / (a)	3 (1)	

Tableau 1.5 : Caractéristiques du Douglas et du peuplier à 12 % d'humidité du bois ((1), (2), (13), (14)).

Le P.S.F. et les retraits du peuplier sont plus importants que ceux du Douglas. Les modules d'Young, les contraintes ultimes et la densité du Douglas sont supérieurs à ceux du peuplier alors que les modules de cisaillement du peuplier sont légèrement supérieurs à ceux du Douglas.

1.2.3. Le lamellé-collé.

1.2.3.1. Généralités.

L'assemblage par collage de matériaux, même de nature différente, assure une répartition continue de la transmission des efforts sur les zones de liaison, contrairement à l'assemblage mécanique.

Le choix d'un adhésif s'effectue en tenant compte :

- de la résistance et de la durabilité du collage,
- des conditions de préparation et d'application de la colle,
- de la durée de mise en oeuvre du collage,
- de la température de polymérisation,
- du coût.

Pour le collage du bois en structure, un nombre restreint de colles est utilisé (15) :

- les caséines en utilisation intérieure ou extérieure sous abri,
- les résorcines et dérivées utilisables en toutes circonstances, les plus utilisées. Elles sont les plus chères, donnent un joint de couleur sombre et polymérisent convenablement entre 25° et 40° C,
- les mélamines pour l'aboutage,
- les urées-formols, associables aux mélamines, pour des utilisations en intérieur. Elles sont les plus simples à mettre en oeuvre, coûtent moins cher que les résorcines et donnent un joint incolore.
- les phénoliques acides qui présentent l'avantage de polymériser à basse température (5° C). Elles coûtent cher, sont difficiles à mettre en oeuvre, donnent un joint de colle noir et peuvent dégrader chimiquement certaines essences.

Nous présentons succinctement la colle résorcine à base phénolique puis le lamellé-collé en général avant d'aborder le lamellé collé en essences mélangées.

Les colles résorcines à base phénoliques sont thermodurcissables et pour le collage du bois elles sont additionnées de formol. Le tableau 1.6 présente des valeurs du module d'élasticité et de la contrainte à rupture sur des éprouvettes de colle massive.

Références	Module d'élasticité en MPa en traction	Contrainte à rupture en MPa en traction	Résistance au cisaillement en MPa	Perte de résistance après une semaine dans l'eau
(14)	2200	26	-	-
(12)	2699	17 ± 5	-	-
(3)	1710	-	10	0 %

Tableau 1.6 : Caractéristiques mécaniques de la colle massive ((14), (12), (3)).

La transposition de ces résultats directement à la colle sous forme de joint reste empirique, en particulier en flexion.

Le collage de deux pièces de bois différentes a d'abord été simplement considéré comme l'adhésion entre deux milieux (voir la figure 1.15) : le substrat et la colle. Une analyse plus fine a mis en exergue la succession de neuf zones à caractéristiques propres pouvant chacune influencer la tenue du collage (16).

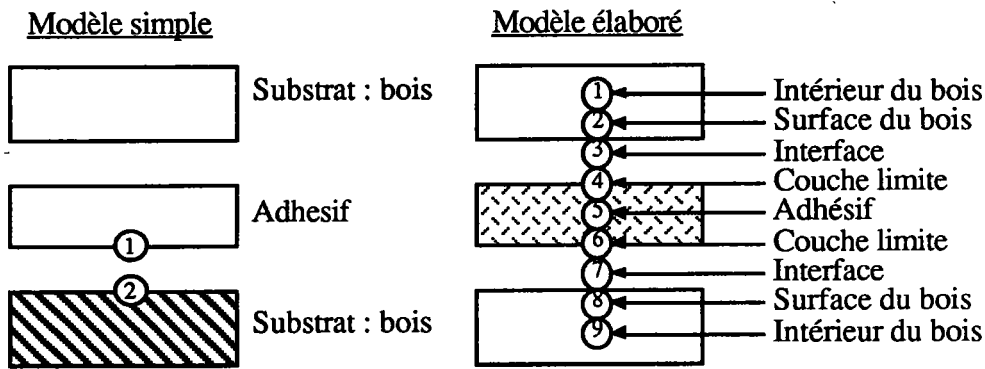


Figure 1.15 : Evolution de la modélisation de l'assemblage collé (d'après (16)).

La variabilité des pièces assemblées 1 et 9 qui recouvre des facteurs tels que l'essence, l'humidité, la proportion de bois de printemps et d'été, la masse volumique entre autres, conditionne la tenue du collage. La nature de l'adhésif et des zones intermédiaires où il y a diffusion de l'adhésif dans le bois créent des couches hétérogènes, chacune pouvant amorcer la rupture du collage (16). En particulier l'observation au microscope des zones entourant le plan de collage peuplier-peuplier avec de la résorcine a montré une pénétration préférentielle de l'adhésif dans les vaisseaux plutôt que dans les fibres. La gravité semble également intervenir sur la profondeur de pénétration dans le bois (17). Il faut noter que lorsque l'axe longitudinal des fibres ne fait pas un angle constant avec le plan de rabotage, la porosité de la surface varie et donc la pénétration de l'adhésif.

La liaison de la colle au bois peut être expliquée à l'aide de différents modèles, le modèle d'adsorption ou de mouillage étant le plus approprié en première approche (3).

Il ressort qu'un bon collage nécessite une surface de contact maximale colle-substrat grâce à une bonne mouillabilité de la surface bois, obtenue par un simple rabotage soigné, et à une viscosité appropriée du mélange collant, résultant du respect des conditions de préparation préconisées par les fabricants.

Le lamellé collé est un assemblage de lamelles de bois (ou plis) collées en usine, l'une au dessus de l'autre, souvent avec un adhésif à base phénolique, afin de reconstituer une poutre massive. Cette technique permet d'obtenir par aboutage des lamelles des éléments de longueur supérieure à celle de poutres en bois massif, limitée par la taille de l'arbre. On obtient des éléments droits mais également courbes et

encastrés. Les poutres collées sont transportées sur le lieu d'utilisation où elles sont assemblées.

Le lamellé collé conserve du bois massif sa bonne résistance au feu et l'isolation acoustique. La stabilité dimensionnelle est améliorée et il y a moins de fissuration que dans le bois massif, suite au fractionnement du volume total en plis. La poutre lamellée collée présente moins de concentration de défauts naturels que le bois massif dont elle est issue. En théorie on cherche à homogénéiser statistiquement la répartition de ces défauts, ce qui est traduit à la fabrication par un placement approprié des plis triés qualitativement. La poutre présente alors des caractéristiques mécaniques supérieures au bois massif (18). Ce procédé n'est rentable que pour les essences ayant des caractéristiques mécaniques plus faibles que celles utilisées traditionnellement en bois massif.

L'utilisation d'entures d'aboutage décalées, montrées sur la figure 1.16, est une application de la recherche de la dispersion des défauts.

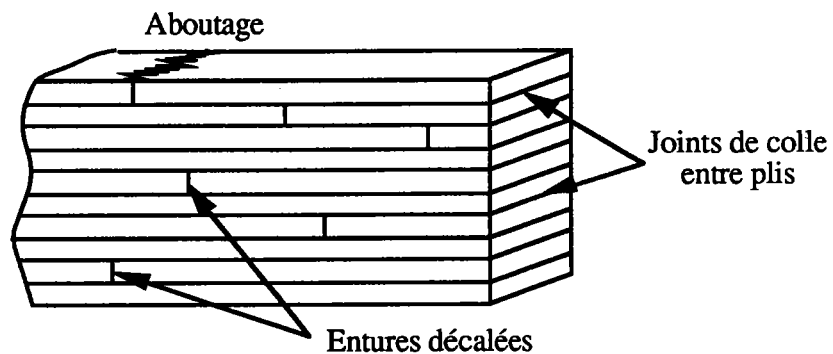


Figure 1.16 : Poutre lamellée collée (détails).

Les étapes de la fabrication sont les suivantes :

- choix des planches à humidité stabilisée entre 12 et 18 %, exemptes de défauts rédhibitoires par usinage,
- tri de ces planches en fonction de leurs propriétés mécaniques évaluées par un essai de flexion,
- choix de l'emplacement des plis dans la poutre, les plus résistants vers l'extérieur,
- entourage des extrémités et aboutage par collage sous pression pour obtenir les longueurs nécessaires,
- rabotage de ces éléments,
- encollage des faces,
- mise sous pression de l'assemblage et maintien.

Le maintien sous pression de l'assemblage est l'opération la plus longue si la polymérisation de l'adhésif s'effectue à une température proche de l'ambiante. Il faut attendre généralement plus de 8 heures avec la résorcine à 25°C. Pour réduire la durée de la polymérisation, il faut augmenter sa vitesse par chauffage. Le collage à chaud peut être obtenu en chauffant les faces à encoller à environ 200°C pendant 40 secondes avant

d'appliquer une pression suffisante sur les pièces encollées. Cependant des collages de Douglas réalisés à chaud avec de la résine phénol-résorcine-formol ont présenté en moyenne une résistance au cisaillement plus faible qu'un collage conventionnel à plus basse température, avec une dispersion des valeurs plus importante (19). La colle peut également être chauffée directement par induction à partir d'un champ électromagnétique hyperfréquences sans préchauffage des faces du bois dans ce cas.

Ces poutres peuvent être renforcées aux moyens d'éléments métalliques noyés dans la masse ou rapportés à l'extérieur, ou à l'aide de tissus de fibres utilisées dans la fabrication des matériaux composites, fixés par collage ou dans les joints de colle interplis (12).

1 . 2 . 3 . 2 . Influence de l'humidité .

Nous avons vu qu'à une humidité donnée le bois massif a une masse volumique et un volume qui restent constants et les propriétés mécaniques fixées. Les collages à court terme (quelques mois) ont des comportements différents : l'urée-formol se dégrade dans l'eau, surtout à une température élevée, l'adhésion s'amoindrit alors que le collage avec la résorcine reste stable.

Le différentiel de déformation de part et d'autres du joint de colle provoqué par une variation d'humidité n'est généralement pas nul et sollicite mécaniquement celui-ci. En plaçant judicieusement les plis avec des orientations radiale et tangentielle appropriées, l'effet en est limité.

Lorsque la fissuration du bois des plis apparaît, les champs de déformations et de contraintes sont fortement perturbés et peuvent conduire à la délamellation de l'ensemble.

Une modélisation simplifiée des effets de retrait sur un assemblage collé peut être réalisée à l'aide d'un calcul aux éléments finis en appliquant aux noeuds des charges fictives calculées à partir des déformations de retrait (3). On utilisera l'hypothèse de l'élasticité linéaire. La figure 1.17 présente une visualisation de la déformée de la surface modélisée et des valeurs des différentes composantes du champ de contraintes avec deux plis assemblés dosse sur quartier ce qui conduit la plus mauvaise configuration.

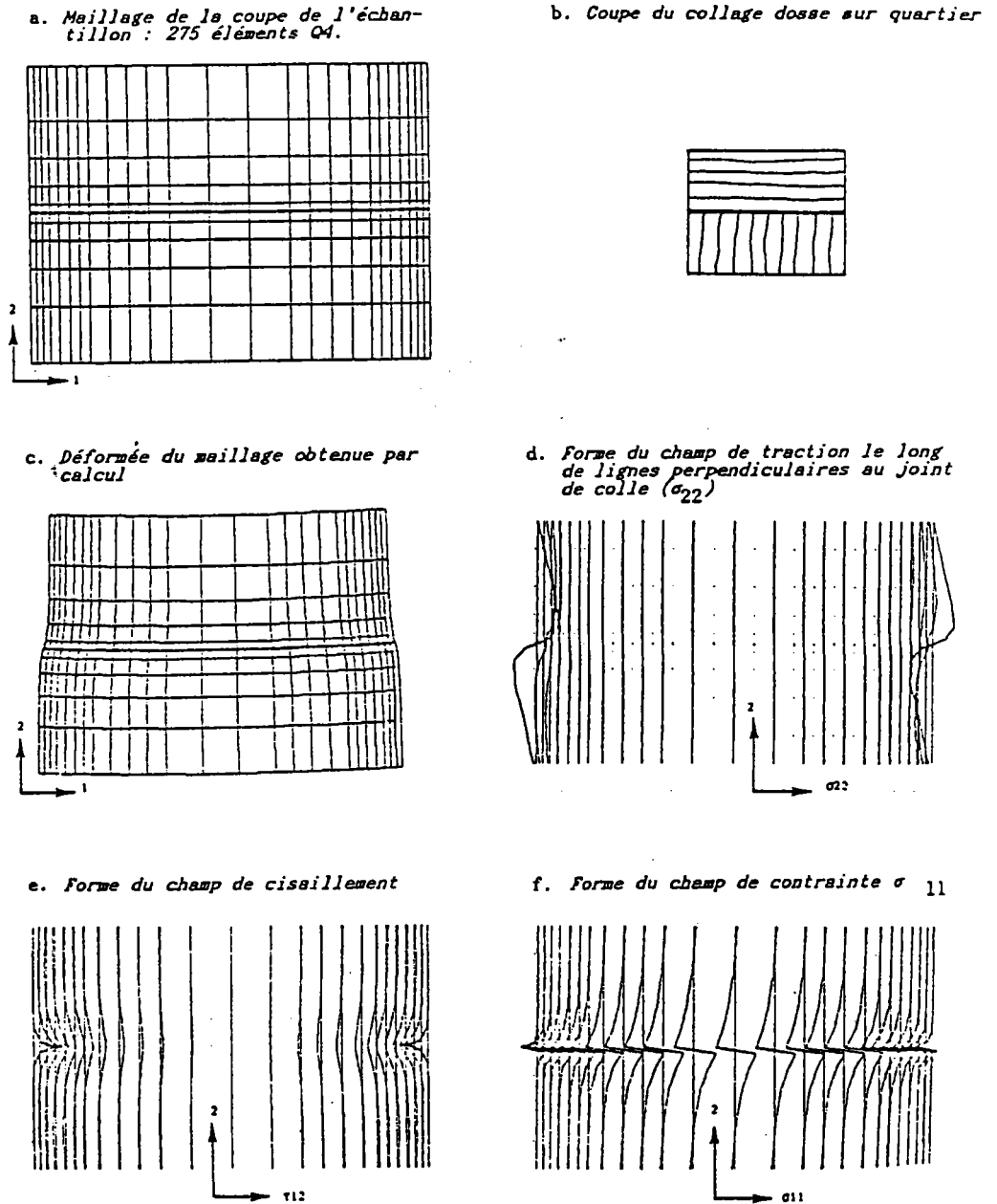


Figure 1.17 : Résultats obtenus par une modélisation par éléments finis des contraintes engendrées dans un collage dosse sur quartier. L'éprouvette subit une variation d'humidité de 10 % ; le comportement du bois est supposé parfaitement élastique (3).

Avec une méthode analogue, les contraintes maximales peuvent être calculées dans le plan RT des éprouvettes et représentées dans la figure 1.18 (3).

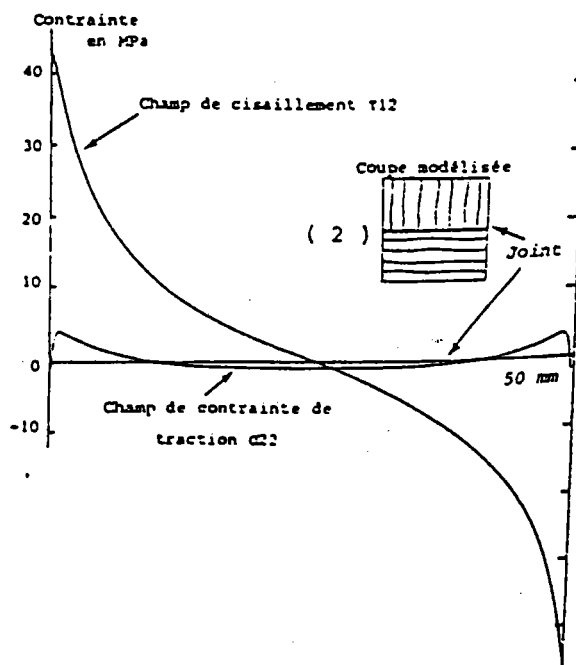


Figure 1.18 : *Champ de contrainte en traction et en cisaillement le long du joint de colle pour un collage dosse sur quartier avec les mêmes conditions que sur la figure 1.17 (3).*

1.2.3.3. Caractérisation des collages.

Les essais techniques de résistance d'éléments de forte épaisseur sont effectués sur des éprouvettes de compression cisaillement, et définis par les normes ASTM D-905 ou NF B51-032. Lors de la réalisation de ces essais sur des assemblages en bois collés, la rupture a tendance à se produire directement dans le bois, ne donnant pas alors d'information sur le collage (20). L'évolution de la résistance du collage, au cours du temps par exemple, ne peut se faire convenablement. D'autres essais reposant sur les principes de la résistance des matériaux donnent des résultats plus corrects sur la qualité du collage : essais de traction perpendiculaire au plan de collage par traction ou flexion d'éprouvette (19). Le tableau 1.7 donne deux exemples de modèles d'éprouvettes relatives à ces essais.

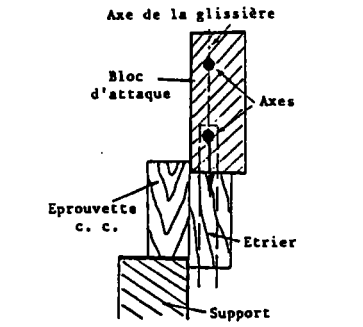
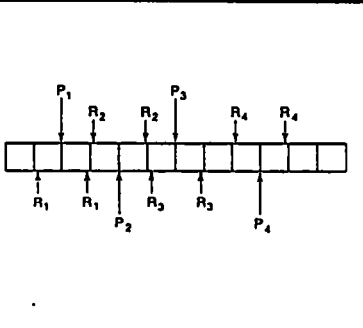
Analyse par les principes de la résistance des matériaux	Eprouvette de compression cisaillement (3)	
	Eprouvette de traction perpendiculaire au plan de collage par flexion d'éprouvette (19)	

Tableau 1.7 : Modèles d'éprouvettes de caractérisation du collage par les principes de la résistance des matériaux ((3), (19)).

Pour étudier plus spécifiquement la résistance du joint de colle des essais ont été mis au point avec des éprouvettes conçues pour analyser les résultats avec les principes de la mécanique de la rupture. Le mode d'ouverture I est le plus rencontré en utilisation réelle en structure et est le plus étudié. On évalue la valeur du taux de restitution d'énergie en mode I, G_I , et la ténacité K_I en particulier à l'ouverture de fissure : les valeurs critiques G_{Ic} et K_{Ic} . Le tableau 1.8 présente quelques modèles d'éprouvettes entaillées se rapportant à ce mode d'ouverture de fissure.

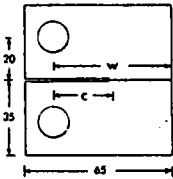
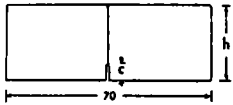
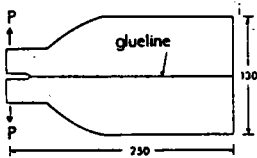
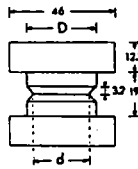
Analyse par les principes de la Mécanique de la Rupture	Eprouvette Compact Tension Test C.T.	
	Eprouvette de flexion 3 points Three Point Bending Test T.P.B.	
	Eprouvette pour Tapered Double Cantilever Test T.D.C.B.	
	Eprouvette pour le Circular-bar Tension Test C.B.T.	

Tableau 1.8 : Modèles d'éprouvettes de caractérisation du collage par les principes de la mécanique de la rupture en mode d'ouverture I (17).

L'étude du mode d'ouverture II (cisaillement), effectuée avec l'éprouvette présentée sur la figure 1.19, permet de caractériser la qualité du collage par le taux de restitution d'énergie G_{II} .

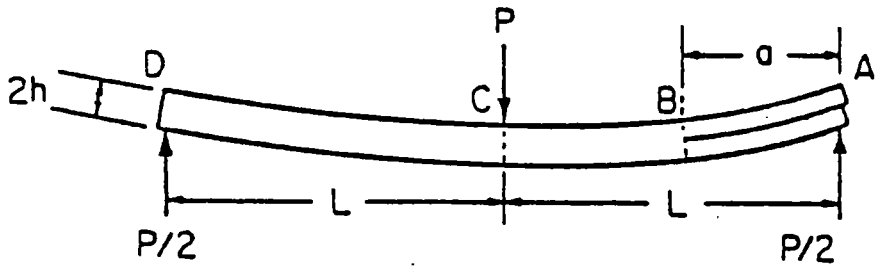


Figure 1.19 : Eprouvette E.N.F. (End Notched Flexure) utilisée pour étudier la tenue au cisaillement des joints de colle par la mécanique de la rupture (3).

Dans le cas du mode d'ouverture I, une étude sur des collages peuplier-peuplier avec de la résorcine a montré une bonne corrélation des valeurs de la ténacité obtenues avec trois modèles d'éprouvettes décrites dans le tableau 1.8 : C.B.T., C.T. et T.P.B.. Le débit de ces éprouvettes dans l'assemblage collé est présenté dans la figure 1.20.

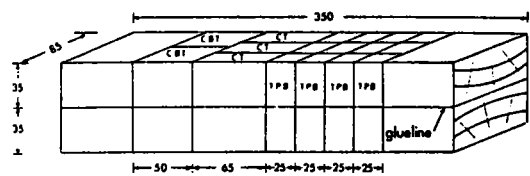


Figure 1.20 : Débit d'un assemblage collé en différentes éprouvettes de mode d'ouverture I (unités en mm) (17).

Les résultats présentés dans la figure 1.21 concordent sauf dans le cas de l'essai de flexion 3 points sans entaille dans l'éprouvette : il n'y a pas d'entaille amorçant la fissure dans le joint de colle (problème de la fissuration plus fréquente dans le bois).

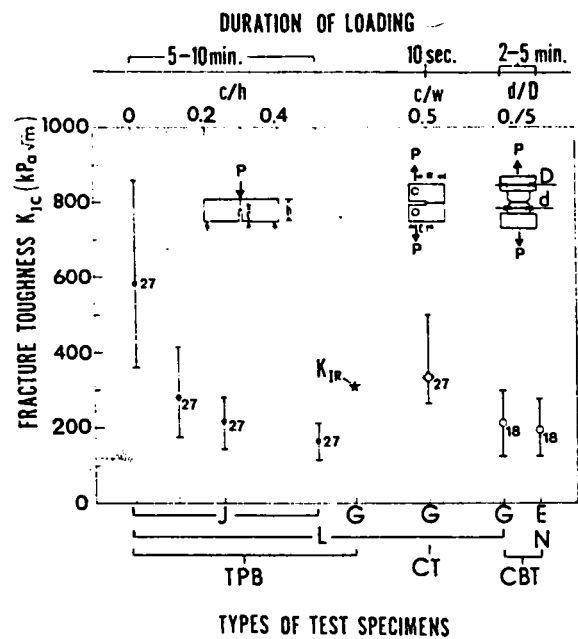


Figure 1.21 : Comparaison des ténacités K_{IC} avec les différentes éprouvettes décrites. Le dépouillement a été effectué avec la théorie locale (L) par les méthodes de l'intégrale J (J) et de Griffith (G) et une théorie non locale en utilisant la méthode d'Eringen (E) (17).

A part ce cas, les effets de durée de chargement, de concentration de contraintes et de variations des propriétés mécaniques sont pris en compte dans les différentes méthodes de dépouillement et la ténacité critique moyenne trouvée est de $255 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$.

La qualité du collage est également évaluée par l'étude de la surface de rupture. On mesure les aires correspondant à une propagation entièrement dans le bois et entièrement dans la colle (rupture cohésive), ainsi que les aires de propagation mixte (rupture adhésive).

La fiabilité des collages utilisés dans les éléments en structure est finalement évaluée sur des échantillons de dimensions standard en utilisant les principes de la résistance des matériaux, généralement par des essais de flexion 3 ou 4 points. Il existe un phénomène d'échelle qui se traduit par une valeur de la résistance plus faible que calculée. Cet écart pouvant atteindre 30% se réduit si la poutre collée testée a été fabriquée avec des matériaux sélectionnés. L'homogénéité de cette poutre se rapproche alors de celle des échantillons de petites tailles utilisés en laboratoire (3).

1 . 2 . 3 . 4 . Utilisation de deux essences .

Les poutres lamellées collées sont surtout réalisées à partir de bois résineux. Quelques fabricants se sont proposés d'utiliser le peuplier comme constituant exclusif des poutres reconstituées (21).

Le Douglas de croissance rapide est un bois approprié au lamellé collé, il présente les caractéristiques mécaniques requises. La recherche d'économie de matière première conduit à se poser la question de savoir s'il est utile d'avoir du bois beaucoup plus résistant qu'il ne faut dans les zones de la poutre les moins sollicitées : la partie centrale dans une poutre en flexion pour le cas qui nous intéresse. La réponse est évidemment non.

Le tri déjà pratiqué au moment de la constitution de la poutre constituée de plis de la même essence est un premier pas, mais si on substitue au Douglas de la partie centrale une essence ayant en moyenne des caractéristiques mécaniques au plus équivalentes, tout en coûtant moins cher, le coût de revient est diminué.

Cette idée a coïncidé avec la recherche d'une utilisation du peuplier en structure, application plus noble et rentable que celles habituelles d'emballages alimentaires et autres produits à faible valeur ajoutée. L'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie a soutenu un programme de valorisation de l'utilisation du peuplier qui a permis de mener des travaux de recherche sur la faisabilité d'une poutre constituée de deux essences. Le déroulement des étapes a été le suivant :

- étude de la faisabilité du collage avec la colle couramment employée pour le Douglas seul : travaux de Peer Haller sur la ténacité des joints mixtes (14),
- étude de la résistance statique de poutres de petites dimensions par essais de flexion trois points (13),
- étude des effets d'échelles sur poutres de dimensions réelles par essais de flexion trois points (13),
- étude du comportement au fluage de petites poutres en atmosphère ambiante et régulée.

1.3. Durabilité d'un assemblage collé.

1.3.1. Introduction.

La durabilité est un terme général signifiant la conservation au cours du temps de l'aptitude d'un élément de structure en bois à remplir sa fonction de soutien.

Les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des constituants assemblés sont modifiés de façon irréversible à des degrés divers surtout lorsque l'ensemble est exposé à des variations de sollicitations, de température et d'humidité. Ces deux derniers paramètres concernent principalement l'exposition en extérieur.

Nous allons aborder les problèmes de vieillissement, l'influence des variations d'humidité et présenter les deux familles d'essais mis au point pour caractériser la durabilité avec chargement continu (fluage) et sans chargement continu, et quelques résultats.

1.3.2. Vieillissement. Influence des variations d'humidité.

Le matériau bois, en l'absence de dégradation par le feu, les insectes et les micro organismes, se conserve pendant plusieurs siècles, avec de faibles changements des propriétés mécaniques, de la composition chimique et de la morphologie (18). Ces dégradations peuvent se produire sous des conditions hygrothermiques particulières.

Les colles utilisées industriellement n'ont que quelques dizaines d'années d'existence pour la plupart et leur durabilité sous forme de collage à très long terme (plusieurs dizaines d'années) ne peut être étudiée qu'en utilisant des procédés de vieillissement accéléré limitant la durée des essais et donc leur coût. La mise au point de ces essais se fait en comparant les résultats de mesures des variations de résistance à une sollicitation donnée entre vieillissement en temps réel pendant quelques années et vieillissement accéléré.

Les dégradations subies par un assemblage collé sont de deux ordres :

- mécanique : le retrait-gonflement hétérogène dans le bois (différence des variations dimensionnelles hygroscopiques liées aux différences de densité au niveau des cernes par exemple) entraîne une fissuration à partir de laquelle s'amorce la rupture,
- physico-chimique : le bois est faiblement altéré ; par contre les zones de collage sont soumises à l'hydrolyse, l'oxydation, des réarrangements moléculaires. Ces phénomènes dépendent des essences collées et de l'adhésif. Ainsi les liaisons pin maritime-pin maritime par résorcine se détériorent moins par ce mode que le collage urée-formol (3). Le vieillissement physico-chimique de la colle massive n'est pas transposable au vieillissement en collage puisqu'il néglige les réactions de liaison.

Le vieillissement naturel en temps réel s'effectue soit en exposition extérieure aux intempéries, soit en extérieur sous abri, soit en intérieur à température et humidité contrôlées.

Le vieillissement accéléré est obtenu en plaçant les éprouvettes :

- en atmosphère sèche, HR < 10 % : essais à froid, $T^{\circ} < 0^{\circ}\text{C}$, et essais à chaud jusqu'à 200°C ,
- en atmosphère humide, HR = 100 % : $20^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 100^{\circ}\text{C}$,
- dans l'eau : $20^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 100^{\circ}\text{C}$,
- dans une enceinte vide d'atmosphère.

Le tableau 1.9 présente les durées moyennes de vieillissement naturel simulées avec des conditions hygrothermiques constantes sur du pin blanc : un séjour de 5 années en air sec à 100°C et un séjour de 4 jours en eau bouillante provoquent une diminution de 25% de la résistance au cisaillement.

Température de vieillissement		Séchage à sec	Immersion dans l'eau
Gamme de température d'essai en air sec	200° C	0,1 jour	
	180° C	0,7 jour	
	160° C	3,6 jours	
	140° C	24 jours	
	120° C	190 jours	
Gamme de température d'essai en air humide	100° C	5 ans	4 jours
	90° C	17 ans	12 jours
	80° C	64 ans	35 jours
	70° C	250 ans	110 jours
	60° C	1 100 ans	1,1 an
Gamme de température de l'habitat humain	50° C	5 200 ans	4 ans
	40°C	27 000 ans	18 ans
	30°C	160 000 ans	80 ans
	20°C	1 000 000 années	400 ans

Tableau 1.9 : Temps d'exposition requis pour obtenir une perte de 25 % de résistance au cisaillement sur du pin blanc (18).

Pratiquement les méthodes d'accélération du vieillissement consistent en la succession de séquences, répétées en général, de passages dans les différents milieux décrits précédemment avec des variations de pression quand cela est possible pour accélérer le séchage ou l'humidification de l'éprouvette (injection-séchage).

Nous donnons l'exemple de l'essai "Automatic Boil Test" (ASTM D3434 (22)) dont le déroulement est le suivant :

- Phase 1: 10 minutes en eau bouillante,
- Phase 2 :
 - a : 4 minutes de séchage en atmosphère ambiante ventilée,
 - b : 57 minutes de séchage en atmosphère sèche à 106° C,
 - c : 10 minutes en eau bouillante.

La phase 2 est répétée et 20 cycles/jour sont effectués. La mise au point de ce test a dans un premier temps permis, sur une durée de 800 cycles, de déterminer que 41 ± 6 cycles en moyenne représentait une année de vieillissement naturel en extérieur aux intempéries. Cela se traduit par une diminution de 25 % de la résistance limite au cisaillement en particulier pour un collage Douglas-Douglas avec la résorcine Phénol-Résorcinol-Formol (23).

Cependant une étude ultérieure a montré les disparités de la cinétique et de l'uniformité de la dégradation ne permettant plus d'être aussi affirmatif sur la correspondance entre ce type de vieillissement accéléré et le vieillissement en extérieur exposé (24).

Dans ce cas la partie supérieure d'une éprouvette est la plus exposée à la pluie, au soleil, la partie inférieure est en quelque sorte protégée. Aussi apparaît un gradient d'humidité important dans l'éprouvette auquel est associé le gradient de déformation qui va provoquer la fissuration du bois dans les trois directions (L,R,T) sur laquelle va s'amorcer la rupture (rupture cohésive du bois dans 100% des cas). De même l'hétérogénéité de l'humidité va provoquer des variations de la cinétique des réactions chimiques de part et d'autre du joint de colle. Dans le cas d'une exposition sous abri ou avec le vieillissement accéléré à conditions hygrothermiques constantes ou variant de façon cyclique, on uniformise l'adsorption et la désorption, ce qui évite la fissuration importante du bois.

De nombreuses autres séquences sont utilisées avec des durées et un ordre différent pour chaque étape, pour toutes cependant, les valeurs des températures, humidités et pressions, lorsqu'on ne se trouve pas à pression ambiante, excèdent souvent celles rencontrées en utilisation réelle (3).

L'interaction humidité-température au sein du matériau, suite aux variations des conditions extérieures humidité-température, est excessivement complexe et est étudiée principalement pour les matériaux composites dans le cadre par exemple de l'hygrothermoélasticité où la prise en compte des effets du couplage température-humidité donne des résultats probants sur la modélisation des contraintes induites (25). Des applications au matériau bois permettent de tenir compte du comportement visqueux constaté pendant le fluage et également des propriétés mécaniques des différentes enveloppes des parois cellulaires (26).

Nous avons signalé que le bois se conservait longtemps dans des conditions naturelles favorables ; hors ces conditions il faut utiliser des traitements physico-chimiques qui vont le protéger des attaques biologiques et l'ignifuger. Le bois est alors modifié et il faut tenir compte de ces modifications lors des essais.

La durabilité, traduite en nombre de cycles supportés pour une sollicitation donnée, varie avec :

- la viscosité du mélange initial,
- l'acidité de ce mélange,
- la température de polymérisation,
- l'épaisseur du joint de colle (liée à la viscosité et à la pression de serrage).

La durabilité croît avec l'augmentation de ces paramètres.

Les collages avec adhésifs résorcine-formol et phénol-résorcine-formol présentent la meilleure durabilité en toutes circonstances. Après 10 ans d'exposition extérieure aux intempéries, ces collages se sont mieux comportés que le bois massif vieilli dans les mêmes conditions. Les résultats des essais de vieillissement accéléré, corrélés à ceux du vieillissement naturel, confirment cette tendance (15).

L'essai de fluage, principalement sous chargement constant en flexion, est une méthode d'évaluation de la durabilité, avec ou sans vieillissement naturel ou accéléré. L'utilisation de modèles mécanosorptifs permet une description du comportement de la pièce jusqu'au niveau microscopique (27). Les conditions hygrothermiques applicables dans ce cas ne doivent pas perturber les appareils de sollicitations et de mesures.

Une autre voie consiste à soumettre d'autres types d'éprouvettes cette fois-ci à des conditions hygrothermiques très défavorables (impossibilité d'effectuer des mesures in situ). On prélève régulièrement au cours du temps, les échantillons nécessaires à l'évaluation de caractéristiques mécaniques, généralement en les ayant conditionnés à l'humidité recommandée pour les essais mécaniques. Dans ce cas, il n'y a pas de suivi sur les mêmes échantillons. Avec un nombre suffisant de résultats, on peut effectuer des calculs statistiques. Nous présentons quelques résultats de cette méthode d'évaluation.

1.3.3. Essais de vieillissement sans application continue de sollicitation mécanique.

L'étude de la durabilité d'un collage à chaud Douglas-Douglas défaillant, avec une résine phénol-résorcine-formol, a été menée à partir des mesures de la résistance à la traction perpendiculaire au plan de collage par flexion sur des éprouvettes soumises à des variations cycliques de l'humidité du bois (19). Ces éprouvettes sous forme de colonnes ont été débitées dans des poutres lamellées collées de largeur 130 millimètres comme le montre la figure 1.22.

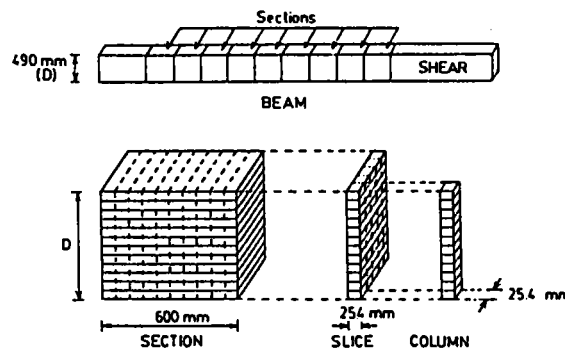


Figure 1.22 : Débit d'une éprouvette d'essai de traction perpendiculaire au plan de collage par flexion (19).

Les sections, avant débit final, ont subi jusqu'à huit cycles de séchage-humidification de période 4 semaines à une température de 50°C : deux semaines en atmosphère sèche à 35% soit une humidité du bois de 6%, suivies de deux semaines en atmosphère humide à 85% et 16% d'humidité du bois.

De la comparaison des résultats obtenus à partir de 8000 éprouvettes se rapportant à 8 poutres collées à chaud, légèrement délamellées, et à 2 poutres collées à température ambiante, on remarque pour la résistance à la traction perpendiculaire au plan de collage :

- elle est plus élevée et les résultats sont moins dispersés pour le collage à température ambiante que pour le collage à chaud, avant et après vieillissement accéléré,

- pour les deux types de collage, la courbe de répartition dans la largeur de la poutre est d'allure parabolique et les valeurs les plus faibles sont aux bords, là où les contraintes de séchage sont les plus importantes pendant le vieillissement accéléré,
- sa diminution dépend de la hauteur de la poutre. La décroissance est plus faible pour une hauteur de 490 mm que pour une hauteur de 240 mm,
- elle diminue au cours des cycles sauf pour la poutre de grande hauteur collée à température ambiante. La perte est de 58 à 80% de la valeur avant vieillissement accéléré pour le collage à chaud contre 39% pour le collage conventionnel.

Dans le cas du collage à température ambiante, la rupture a lieu dans le bois plus de 60 fois sur 100 et en rupture adhésive 30 fois sur 100. Pour le collage à chaud, la rupture adhésive décroît de 67 à 44% en huit cycles, compensée par une augmentation de la rupture cohésive du bois de 19 à 35% et la rupture cohésive de la colle variant de 11 à 16%.

Les mesures du taux de restitution d'énergie critique G_{Ic} du collage urée-formol relevées sur des éprouvettes de clivage (T.D.C.B. modifiées) en bouleau ont montré une évolution comportant trois phases au cours de la polymérisation (20). Les valeurs de la courbe, taux de restitution d'énergie critique en fonction du temps du diagramme de gauche de la figure 1.23, augmentent rapidement jusqu'à une faible valeur les trois premiers jours. Elles atteignent ensuite un maximum au bout de douze jours avant de décroître faiblement jusqu'à se stabiliser quelques mois plus tard. L'existence de ce pic a été également observée pour des collages résorcine-formol. Ces phases correspondent entre autres à des réarrangements moléculaires particuliers, liés au phénomène de polymérisation de l'adhésif, estimé achevée en trois semaines.

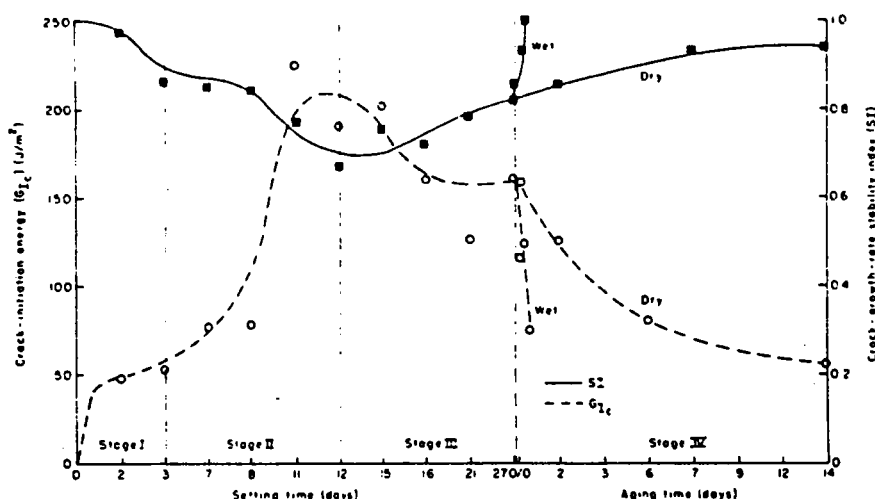


Figure 1.23 : Evolution du taux de restitution d'énergie critique G_{Ic} au cours de la polymérisation d'un collage de bouleau, en milieu sec et en milieu humide (20).

La partie droite du diagramme montre la décroissance du taux de restitution d'énergie du même collage au cours d'un vieillissement en air sec à 140°C et en immersion dans l'eau à 70°C, décroissance 20 fois plus rapide dans ce cas. Cette différence est due à l'hydrolyse des liaisons de l'adhésif.

Une étude effectuée sur la durabilité du collage de pin des Landes (3) avec de l'urée-formol ou de la résorcine a mis en évidence la bonne durabilité du collage résorcine sur cette essence, comparable aux collages d'autres essences. Au cours d'essais de compression-cisaillement, les valeurs des contraintes moyennes de cisaillement à la rupture ont été mesurées et le pourcentage d'adhérence quantifié (surface de rupture cohésive dans le bois / surface totale du collage : de 70 à 100 %, on considère avoir affaire à la rupture cohésive du bois).

En vieillissement en temps réel, on remarque sur une durée de 16 mois que :

- à température basse $T^{\circ} = \pm 3^{\circ} \text{C}$, la tenue mécanique des collages et du bois massif ne sont pas affectés,
- en extérieur exposé la valeur de la contrainte de cisaillement à rupture chute de 30 à 40 % au bout de 5 mois et se stabilise pendant les 11 mois suivant. L'endommagement est principalement mécanique,
- en humidité stabilisée ($HR = 76\%$ et $HR = 86\%$) à température ambiante, il n'y a pas de variations importantes de la résistance au cisaillement pendant 14 mois comme en extérieur sous abri,
- le coefficient d'adhérence pour ces essais est de 70 à 80 %.

En vieillissement accéléré (voir la figure 1.24), avec les conditions hygrothermiques mentionnées, la résistance au cisaillement des collages de résorcine est réduite de 20 % au cours des deux premiers cycles et se stabilise ensuite. La fissuration et le fendage du bois près du joint de colle constituent l'endommagement. Leur apparition est liée aux délais de diffusion de l'eau dans le bois, à la géométrie des éprouvettes, à l'épaisseur et à l'orientation des cernes. Le collage urée-formol dans les mêmes conditions se dégrade de façon plus importante (endommagement mécanique et physico-chimique) que le collage résorcine et également plus qu'au cours d'un vieillissement en temps réel.

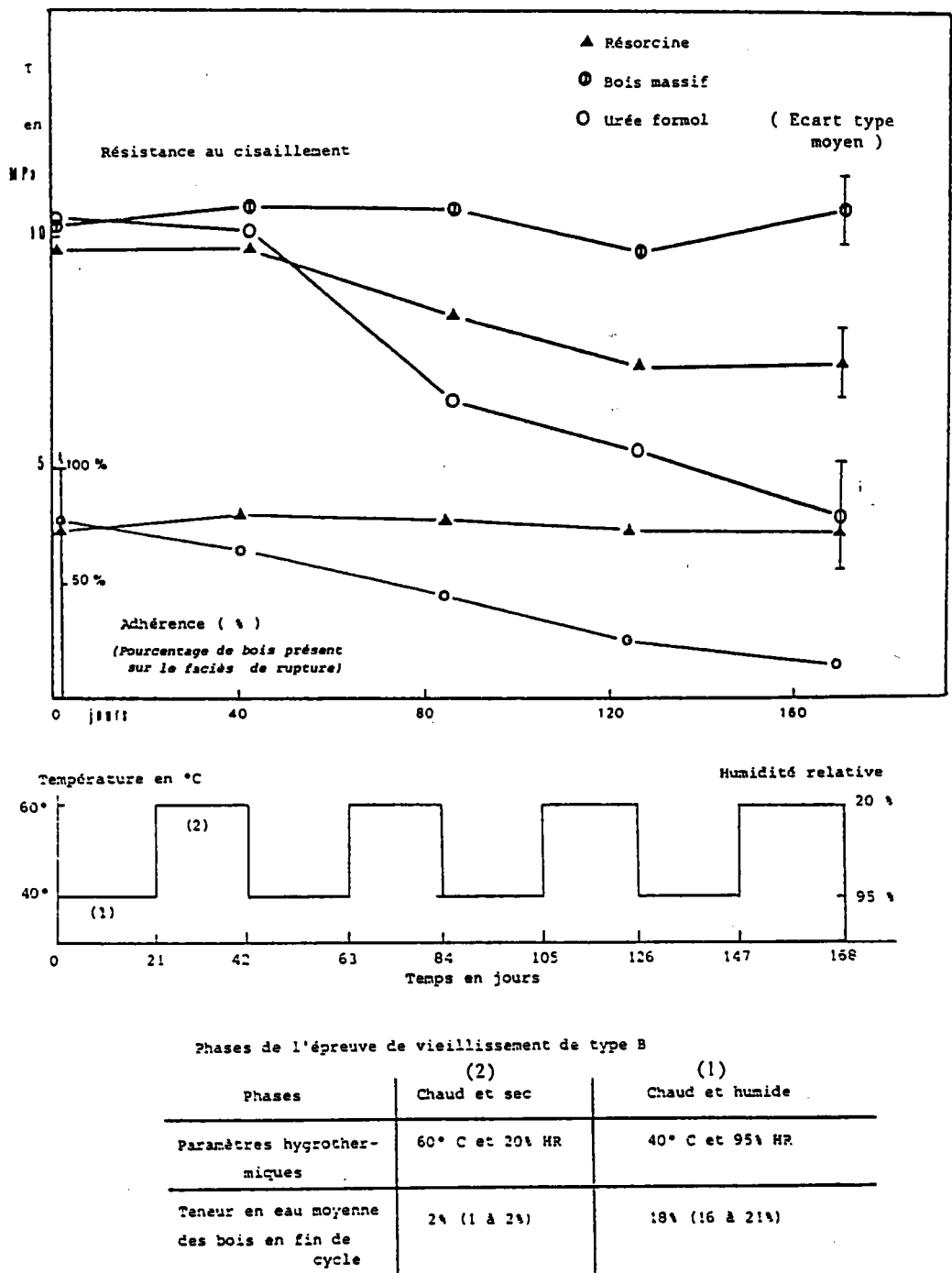


Figure 1.24 : Courbes d'évolution globales de la résistance et de l'adhérence des éprouvettes de compression cisaillement pour l'épreuve de vieillissement cyclique dont les données thermohygrométriques des phases des cycles et du bois sont présentées ci-dessus (3).

La mesure de la ténacité G_{IIc} effectué sur des éprouvettes E.N.F. présente également une diminution importante pour le collage urée-formol, alors que le collage résorcine semble ne pas être affecté. Les résultats sont assez dispersés.

Des essais de vieillissement en eau ont également été effectués ; pour éviter tout endommagement mécanique dû au séchage, les éprouvettes ont été testées humides. On constate que la résorcine s'est également mieux comportée (voir la figure 1.25).

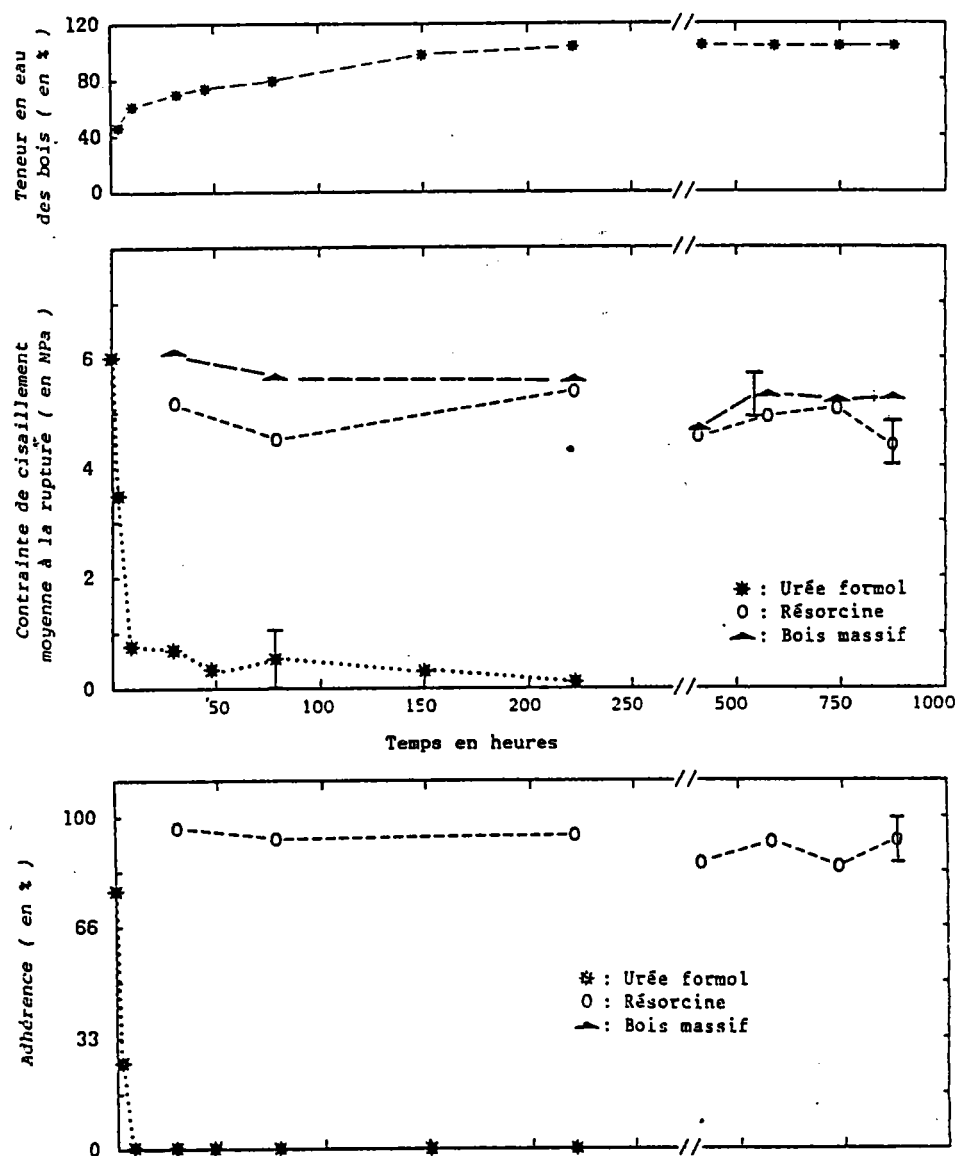


Figure 1.25 : Courbes de vieillissement dans l'eau à 83° C de collage urée-formol et résorcine de pin maritime (3).

Dans le cas du vieillissement en atmosphère humide à 62° C, la diminution de la résistance à la rupture est très importante pour le collage urée-formol si l'humidité du bois est supérieure à 20 % ce qui correspond à une humidité relative supérieure à 95 % .

Enfin le tableau 1.10 montre que des échantillons de lamellé collé réalisés avec de la résorcine vieillissent moins que des éprouvettes de compression-cisaillement, le tout avec de la résorcine,dans le cas de cycles d' injection-séchage :

Type de vieillissement	Spécimens vieillis	Résistance en fin de cycle (MPa)	Perte de résistance
Vieillissement cyclique de trempage-séchage à 62° C (5 cycles réalisés en une semaine)	échantillon lamellé-collé	7,14	- 20 %
	éprouvettes de compression-cisaillement	5,27	-41 %
Vieillissement en extérieur exposé (15 mois)	échantillon de lamellé-collé	8,17	-9,2 %
	éprouvettes de compression-cisaillement	7	- 22 %

Tableau 1.10 : Résistance résiduelle du collage résorcine soumis à deux types de vieillissement de nature cyclique. Les spécimens de collage vieillis se présentent sous la forme d'échantillon de lamellé-collé et d'éprouvettes de compression-cisaillement (3).

Pour cette série d'essais sans sollicitation mécanique en cours de vieillissement, 800 éprouvettes réparties entre chaque série de vieillissement ont permis d'obtenir un nombre de résultats suffisants pour donner lieu à des calculs statistiques et tenter de mettre en avant les paramètres affectant la durabilité des collages. Il a été constaté qu'il n'existe pas de corrélation entre adhérence et résistance.

1 . 4 . Mesure des déformations .

1 . 4 . 1 . Introduction .

Pour connaître les valeurs des contraintes sur une structure, il faut :

- soit réaliser un modèle où un phénomène physique analogue aux contraintes est mesurable : domaine des méthodes analogiques.
- soit mesurer directement les déplacements sur la structure ou un modèle la représentant et relier ces valeurs aux contraintes par les lois de comportement établies à partir des essais en sollicitations simples : domaine des méthodes extensométriques.

L'extensométrie comporte :

- les mesures directes des déplacements par contact mécanique,
- les mesures indirectes dont les principales sont :
 - a) la rupture de revêtements fragiles pour un seuil de déformation déterminé : vernis craquelants,
 - b) l'effet de biréfringence sur les matériaux transparents : photoélasticimétrie,
 - c) l'effet d'interférence dû à la superposition de deux trames très fines dont l'une est déformée : Moiré,
 - d) la variation de résistance électrique d'un fil fin rapporté sur la pièce sous l'effet des déformations: jauges électriques.

Ces méthodes sont largement décrites dans les ouvrages spécialisées (28) et nous ne ferons que quelques remarques et citerons quelques applications particulières de certaines d'entre elles.

Nous présentons par ailleurs des procédés de mesure globale du champ de déformation développés pour des mesures à distance sans contact.

1 . 4 . 2 . Méthode analogique . Analogie électrique .

L'équation de Laplace $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0$ caractérise l'état bidimensionnel d'un champ électrique ou d'un champ de contraintes. Cette analogie permet, en appliquant des tensions proportionnelles aux conditions aux limites, de reproduire sur un modèle en matériau résistant, découpé à la forme de la pièce à étudier, l'état de contraintes. On relève sur la surface les contraintes en plusieurs points. L'application aux matériaux isotropes est vérifiée.

1 . 4 . 3 . Méthodes extensométriques .

1 . 4 . 3 . 1 . Extensométrie mécanique .

L'extensométrie mécanique mesure une variation de longueur directement sur une pièce par contact en deux points, avec amplification du déplacement qui est généralement faible sur la longueur mesurée. Il faut que l'appareillage restitue précisément le déplacement d'un point par rapport à l'autre et qu'il n'y ait pas de glissement des points de contact sur la surface. La pièce ainsi instrumentée n'est pas altérée. Cependant si la vitesse de déformation est importante, l'inertie de l'appareillage ne restitue plus exactement la déformation de la pièce (29).

1 . 4 . 3 . 2 . Vernis craquelant .

Le vernis craquelant est un liquide, déposé sur la surface par projection, qui une fois polymérisé possède des caractéristiques mécaniques stables, en particulier un seuil de rupture en tension. L'observation de l'apparition successive des craquelures donne une information sur la propagation d'un front de déformation sur la pièce correspondant à celui du vernis après étalonnage. La géométrie de la surface importe peu et cette méthode permet de relever les isodéformations. Elle peut être considérée comme prélude à une autre de méthode de mesure plus fine.

1 . 4 . 3 . 3 . Photoélasticimétrie .

La photoélasticimétrie ne peut être utilisée qu'avec un matériau biréfringent : il faut donc recouvrir par collage les pièces mécaniques métalliques sollicitées avec un film de ce type ou faire un modèle de la pièce directement dans ce matériau. Il suffit d'un appareillage optique assez simple pour exploiter les images obtenues.

1 . 4 . 3 . 4 . Moiré .

Dans le cas du Moiré, il faut cette fois un appareillage optique de grande précision (banc de prise de vue, optique de qualité pour la chambre photographique). La mise en place du réseau de traits fins est délicate que ce soit par un tracé direct sur la pièce quand c'est possible ou en rapportant par collage un film transparent fin sur lequel a été déposé l'image du réseau. Dans ce dernier cas une géométrie perturbée de la surface augmente la difficulté de mise en place sans déformation du réseau. Cette méthode est d'une grande précision mais est très sensible aux conditions du laboratoire.

1 . 4 . 3 . 5 . Jauges électriques .

Les jauges électriques sont les moyens de mesures les plus simples d'utilisation et sont très précises. La déformation obtenue est la déformation moyenne de la surface du support du fil et les dimensions de celle-ci varient de quelques mm² à plusieurs centaines. On obtient soit une déformation locale soit une déformation globale. La jauge est collée sur la pièce à déformer en général par des adhésifs de type résine. Les adhésifs classiques s'affaiblissent avec l'humidité et la présence des jauges occulte une partie de la surface d'échange avec l'environnement, liquide ou gazeux.

Les conditions de pression, température et humidité nécessaires à la polymérisation de la colle peuvent modifier celles du support. Les adhésifs mis au point pour coller à température ambiante demandent un traitement mécanique de la surface ; les adhésifs mis au point pour polymériser à basse température ($T^{\circ} = 5^{\circ} \text{C}$) ne résistent pas aux grandes déformations et aux grandes vitesses de déformation.

Pour caractériser le comportement hygromécanique d'un composite Graphite/Epoxy, une méthode d'inclusion dans le joint central d'éprouvettes de 6, 8 et 24 plis unidirectionnels, a permis d'obtenir des résultats en accord avec ceux de jauges extérieures et de mesures extensométriques sur les mêmes éprouvettes, et sur un éprouvette témoin sans jauges internes lors d'essais en tension uniaxiale (29) (voir la figure 1.26).

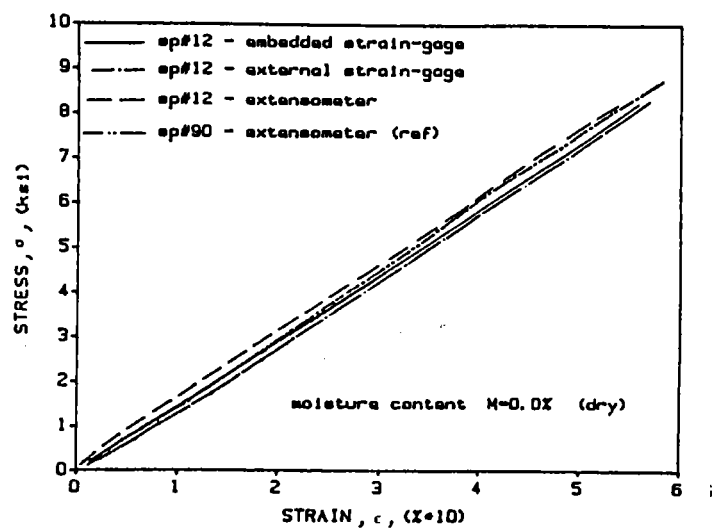


Figure 1.26 : Courbe contrainte-déformation pour des éprouvettes graphite/époxy en traction uniaxiale avec différentes techniques de mesure (29).

Ces jauges, isolées électriquement et de l'humidité, sont mises en place à la fabrication des éprouvettes. Elles n'ont pas perturbé la diffusion de l'eau et les caractéristiques mécaniques des éprouvettes, leurs dimensions restant faibles par rapport à la surface totale du collage des plis. La figure 1.27 montre la variation de la déformation hygroscopique transverse en fonction de l'humidité et on voit qu'il y a une bonne corrélation entre les mesures internes et externes (29).

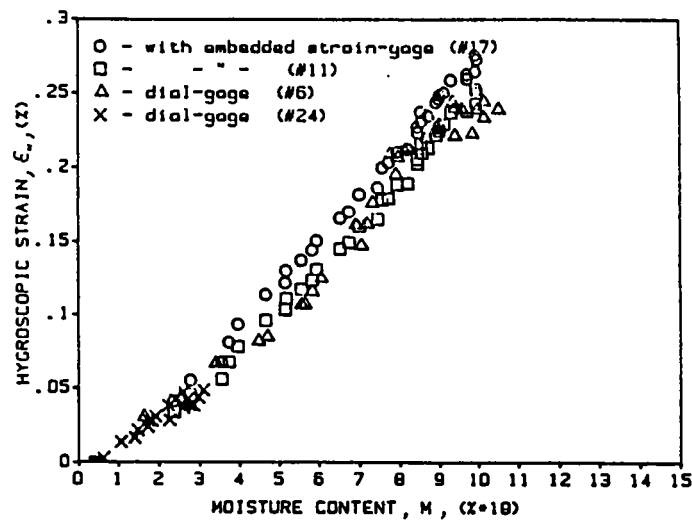


Figure 1.27 : Déformation hygroscopique transversale d'un composite graphite/époxy en fonction de son humidité avec différentes techniques de mesure (29).

1.4.4. Méthodes de mesure globale du champ de déformations.

1.4.4.1. Mesure des déformations sur une éprouvette de papier.

Pour mesurer le champ de déformation auquel est soumise une éprouvette de papier en tension et pouvoir vérifier la validité de la modélisation mathématique qui en a été faite, la méthode expérimentale suivante a été élaborée. Elle tient compte du faible module d'élasticité, associé à l'extrême flexibilité du matériau et de l'impossibilité d'utiliser des jauges ou des capteurs de déformation sur une éprouvette aussi fine ((30), (31)). Un motif est déposé par photocopie sur la feuille de papier de laquelle est extraite l'éprouvette (voir la figure 1.28). Ce motif a été créé en effectuant de multiples passages en photocopieuse pour obtenir une répartition aléatoire dense de points noirs dûs aux défauts de la machine.

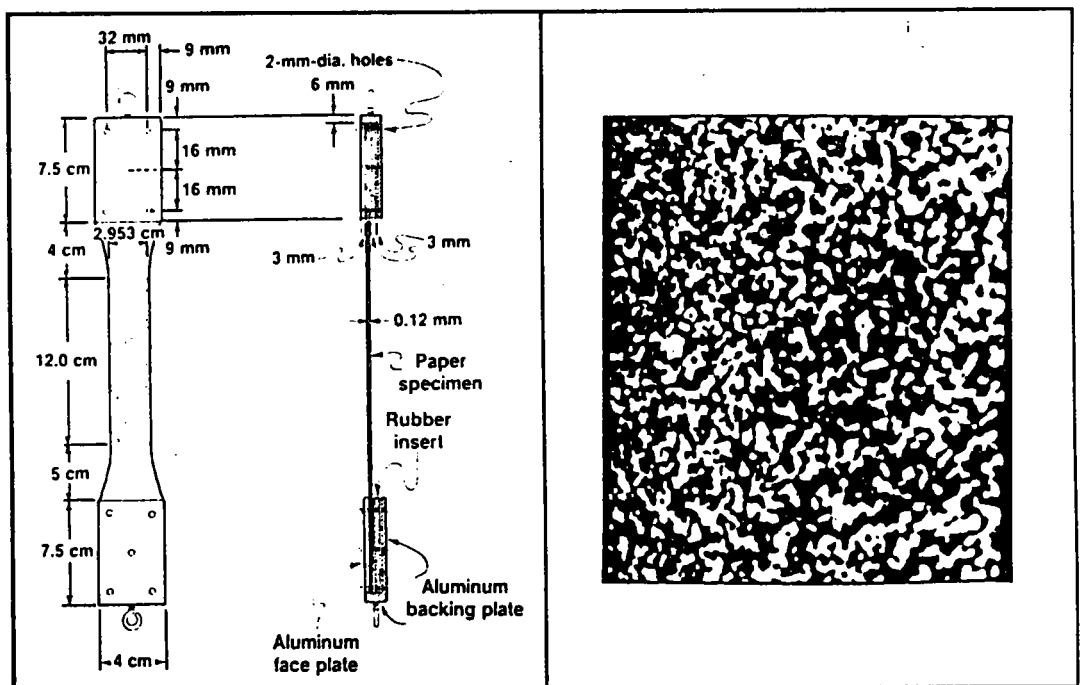


Figure 1.28 : *Dessin de l'éprouvette de papier et détail du motif déposé sur la partie centrale (30).*

Une caméra vidéo enregistre pixel par pixel (environ 400 x 500) l'intensité lumineuse d'une partie de la surface de papier éclairée de la façon la plus homogène possible. Une empreinte digitalisée en intensité de lumière du motif est obtenue par traitement informatique avant et après chargement en traction.

Ensuite sur des zones de 10 x 10 ou 20 x 20 ou 40 x 40 pixels, le déplacement du point central de ces zones est calculé en identifiant la position de leur empreinte avant et après déformation.

La figure 1.29 présente la valeur du déplacement vertical suivant l'axe vertical de l'éprouvette (yy) et également la valeur du déplacement horizontal suivant sa largeur (xx) pour les trois tailles de zones étudiées et pour un chargement donné.

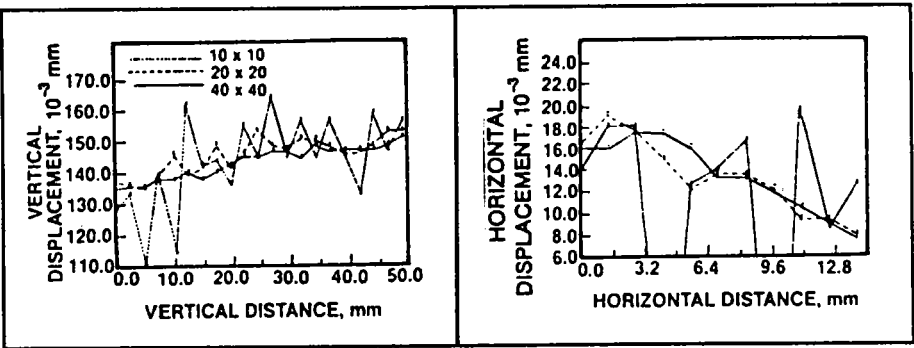


Figure 1.29 : Valeurs du déplacement vertical suivant l'axe de l'éprouvette avec une charge de traction de 9,81 N à gauche, et variations du déplacement horizontal dans la largeur de l'éprouvette avec une charge de traction de 25,52 N avec les trois tailles de zones de calcul (30).

La dispersion augmente avec la réduction de la taille de la zone explorée.

Le tableau 1.11 donne les valeurs des déformations moyennes déduites en fonction de la taille des zones et des niveaux de chargement.

Charge de traction appliquée en N	Taille de zone de calcul en pixels	$\epsilon_{xx} \times 10^{-4}$	$\epsilon_{yy} \times 10^{-4}$
9,81	10 x 10	-2,28	2,79
9,81	20 x 20	-1,83	2,76
9,81	40 x 40	-1,50	2,68
19,62	10 x 10	-5,73	5,40
19,62	20 x 20	-4,68	5,57
19,62	40 x 40	-4,13	5,78
24,52	10 x 10	-7,56	7,61
24,52	20 x 20	-5,45	6,64
34,62	40 x 40	-4,87	6,74

Tableau 1.11 : Valeurs moyennes des déformations dans l'éprouvette de papier en fonction de la taille des zones de mesure et des charges appliquées (d'après (30)).

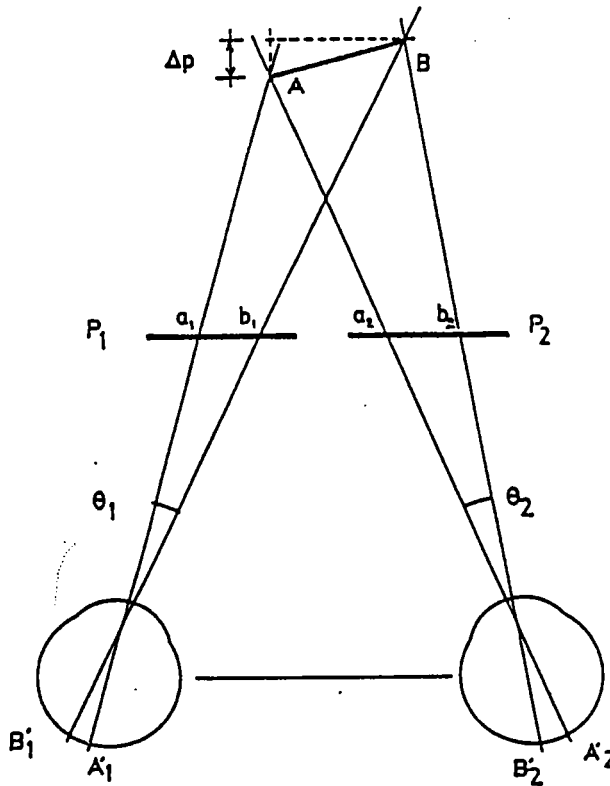
Les valeurs de ϵ_{xx} dépendent de la taille des zones de mesures, ce qui donne une estimation de la précision. A partir de ces valeurs et en reliant à la charge appliquée, les valeurs du module d'Young sont homogènes car calculées à partir de ϵ_{yy} , par contre les valeurs du coefficient de Poisson sont dispersées avec une taille de 40 x 40 pixels puisqu'elles font intervenir ϵ_{xx} et ne sont pas significatives avec des dimensions inférieures.

Cette méthode présente les avantages suivant :

- affranchissement des vibrations du laboratoire,
- sensibilité variable grâce aux trois tailles de zones possibles,
- acquisition en une seule fois du champ de déplacement,
- pas de contact avec l'éprouvette.

1.4.4.2. Stéréophotogrammétrie.

C'est un ensemble de techniques d'enregistrement photographiques de plusieurs aspects d'un objet qui permettent sa restitution tridimensionnelle à partir de l'effet de relief. La figure 1.30 permet de décrire simplement le principe de la vision du relief et de la méthode stéréophotogrammétrique (32).



Le segment AB appartient à un plan horizontal passant par la ligne joignant les yeux de l'observateur. L'oeil gauche perçoit ce segment avec un angle θ_1 et l'oeil droit avec un angle θ_2 . La différence des segments images de AB, $A_1'B_1'$ sur la rétine de l'oeil gauche et $A_2'B_2'$ sur celle de l'oeil droit donne lieu à la perception d'un relief proportionnel à l'écart ΔP , à l'issue du décodage par le système nerveux. L'enregistrement sur plaques photographiques des images du segment AB, a_1b_1 sur P_1 et a_2b_2 sur P_2 aligné avec P_1 , permet de conserver l'effet de relief en utilisant un appareil de lecture appelé stéréoscope.

Figure 1.30 : Principe de la vision du relief (32)

Sur cet appareil en amenant le point b_1 , couplé à b_2 , en coïncidence avec le point a_1 on détermine sa position dans le repère de gauche. L'effet de relief est conservé car en général le point b_2 ne coïncide pas avec le point a_2 . On fait ensuite coïncider le point b_2 avec le point a_2 , sans changer la position du point b_1 . L'effet de relief est perdu et l'écart entre les points a_2 et b_2 donne la différence de position de B entre le repère de gauche et le repère de droite. Si les deux clichés de l'objet sont réalisés au même instant depuis deux positions différentes, on obtient un vrai relief qui permet de déterminer ΔP . L'application particulière de la mesure des déformations consiste à obtenir un

"faux" relief à partir de deux images du même objet, prises du même endroit avant et après déformation. Le déplacement du point B est alors déterminé. Les étapes aboutissant à la détermination du champ de déformations de la surface sont les suivantes :

- l'objet, sur lequel 100 à 200 points doivent rester parfaitement identifiables, est photographié, puis déformé et à nouveau photographié depuis le même endroit. Un référentiel indéformable est lié à l'objet,
- les clichés avant et après déformation sont placés dans le stéréoscope. La mise en coïncidence des points du référentiel permet d'éliminer la translation et la rotation de l'objet qui n'induisent pas de déformations. Les valeurs des déplacements des points, mesurées sur cliché, sont mises à échelle et exprimées dans un repère adéquat,
- une fonction déplacement est interpolée linéairement sur des éléments triangulaires construits à partir des points de l'objet par calcul informatique,
- cette fonction est calculée à nouveau cette fois-ci aux noeuds d'un nouveau maillage à partir d'éléments quadrilatéraux,
- les valeurs des composantes du tenseur des déformations sont déduites de la dérivation de la fonction déplacement.

Le Figure 1.31 présente les résultats obtenus par cette méthode avec un essai de compression biaxiale sur du sable.

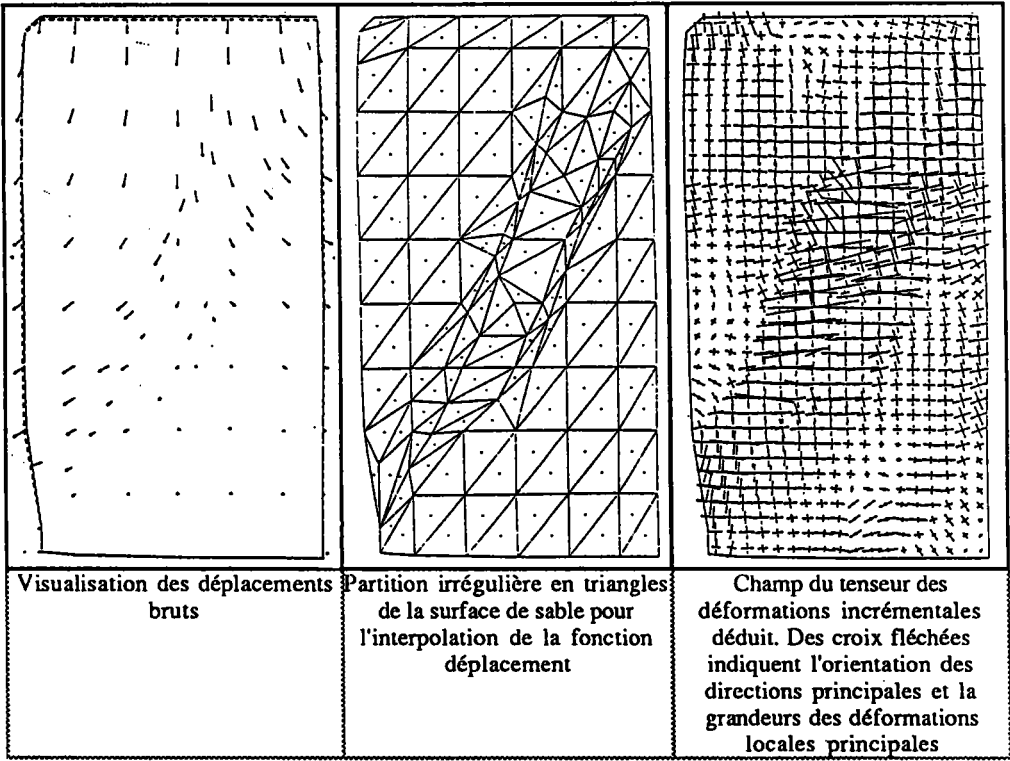


Figure 1.31: Représentation des déplacements mesurés et du champ de déformations déduit sur du sable soumis à de la compression biaxiale (32).

Cette méthode est intéressante pour les matériaux sur lesquels on ne peut mesurer mécaniquement les déplacements.

1.4.5. Conclusions.

Les méthodes analogiques ne permettent pas la mesure sur la pièce réelle, alors que les méthodes extensométriques peuvent le faire. Cependant, le dépôt soit d'un liquide ou le collage de film support pose des problèmes liés à l'état de surface du matériau : défauts de forme, porosité.

Lorsque la pièce est soumise à des sollicitations thermiques, hygrométriques, mécaniques importantes, la durabilité des moyens de mesure est fortement compromise en particulier l'adhésion sur la pièce si elle est nécessaire.

Les méthodes de mesure globale du champ de déformation s'effectuent à distance à partir de motifs déposés sur l'objet ; si ce dépôt recourt à l'adhésion nous retrouvons les limites précédemment citées.

1.5. Conclusions.

Si la modélisation orthotrope du bois est largement vérifiée pour expliciter les phénomènes mécaniques macroscopiques, que ce soit en utilisation comme bois massif ou sous forme de lamellé collé, la description des conditions régnant aux environs du joint de colle est beaucoup plus complexe.

Dans le cas du comportement à court terme, l'hypothèse d'une succession de couches aux propriétés physico-chimiques différentes de part et d'autre de l'adhésif massif semble rendre compte de l'hétérogénéité effective de ce milieu. Si nous nous attachons au bois lui-même, à cette échelle l'orientation des cernes, leur taille, la proportion du bois de printemps et d'été, la porosité sont des paramètres influents. Le long du joint de colle dans le plan RT, le collage des matériaux est hétérogène. Le comportement de la colle au moment de l'encollage, en particulier sa viscosité, son acidité, ajoute à la complexité de la compréhension du comportement du collage.

Si nous examinons le comportement à long terme, chaque élément présente sa durabilité propre et influe sur la durabilité de l'ensemble. Si le bois ne présente pas dans des conditions favorables de dégradation autre que mécanique, l'adhésif sous forme de joint est soumis de surcroît à une dégradation physico-chimique. L'adhésif phénol-résorcine-formol se révèle extrêmement durable et est particulièrement adapté aux conditions d'exposition hygrothermiques difficiles.

Les essais techniques mis au point qu'ils fassent appel à la résistance des matériaux ou à la mécanique de la rupture ont mis en évidence la durabilité de ce type de collage, quelque soit le type d'éprouvette et le mode de sollicitation, ainsi que les procédures de vieillissement en temps réel ou accéléré. Les deux voies retenues pour évaluer la perte d'une résistance mécanique se distinguent par le nombre d'éprouvettes mises en jeu, l'intensité du vieillissement applicable et le suivi ou non d'un paramètre.

Dans le cas de l'étude du comportement différé, l'instrumentation est installée sur l'éprouvette que l'on va suivre en continu et à laquelle des conditions hygrothermiques extrêmes ne pourront être appliquées à l'instar de l'autre voie où un nombre important d'éprouvettes, fortement sollicitées, est mis en jeu et sur lequel un seul essai mécanique est pratiqué.

Les méthodes de mesure sont choisies en fonction de leur propre fiabilité pour des essais à long terme. Les mesures globales du champ de déformation ont été appliquées à des essais ne conduisant pas à un suivi systématique. Elles nécessitent alors une intervention importante de l'informatique.

CHAPITRE 2

Chapitre 2 . Etude expérimentale .

2 . 1 . Introduction .

L'étude bibliographique nous a montré que les collages de résorcine présentent une très bonne durabilité dans des conditions hygrothermiques extrêmes, quelques soient les orientations des plis contigus de l'assemblage. La mesure de l'évolution du champ de déformations en continu est impossible dans le cas des essais destructifs de nombreuses éprouvettes et n'a pas été abordée pour ceux de fluage alors qu'elle peut permettre un suivi précis de l'état des zones les plus fortement déformées. Il est intéressant d'emprunter une voie intermédiaire qui permette dans des conditions plus proches de la réalité, de mesurer de façon globale et simplifiée le champ de déformation réel, hétérogène en particulier avec la mise en présence de deux essences ayant des caractéristiques et une interaction avec l'adhésif différentes, pour tenter de relier l'apparition de fissures importantes à des valeurs numériques des déformations.

Nous étudions pour cela l'évolution de l'état de déformation dans le plan perpendiculaire au plan de collage d'un assemblage en essences mélangées, où existent les plus grandes amplitudes de gonflement et de retrait du bois, dûes à des variations hygrométriques cycliques importantes de l'air environnant, en conditions isothermes. C'est le cas du collage dosse sur quartier.

La rupture de l'assemblage est considérée atteinte lorsque la liaison entre les deux pièces n'est plus totalement assurée près du joint de colle, ce qui conduit à plus ou moins longue échéance à la délamellation de l'ensemble. La rupture cohésive des pièces de bois, loin du joint de colle ne peut être assimilée à celle de l'assemblage.

L'assemblage n'est soumis à aucune sollicitation mécanique externe, la rupture devant découler de la modification des propriétés mécaniques des matériaux et des contraintes internes induites par l'eau au sein de la matrice bois.

Les essais étant non-destructifs, nous suivons l'évolution de plusieurs assemblages au cours du temps, pendant plusieurs semaines, en relevant la déformation par mesure sans contact à des intervalles de temps réguliers.

L'assemblage collé de deux pièces de bois est comparé à deux pièces de bois similaires non collées qui servent de témoins pour faire apparaître l'influence du collage.

2 . 2 . Protocole expérimental .

2 . 2 . 1 . Mesures .

Pour étudier l'évolution de l'état de déformation des surfaces, il faut utiliser un moyen de mesure suffisamment précis, qui n'altère pas le matériau et qui perdure tout au long des essais dans un environnement alternativement sec et humide, la température demeurant constante.

De précédentes expériences ont montré la difficulté d'obtenir ces performances à l'aide de jauges d'extensométrie dans un plan perpendiculaire au plan de collage. La colle nécessaire à leur fixation s'infiltre dans le matériau bois, provoquant localement un gonflement et une précontrainte de la dite jauge après polymérisation de l'adhésif. Par ailleurs la mise en oeuvre du collage, particulièrement adapté à des déformations importantes dans des conditions d'humidité élevée, est délicate eu égard à la pression uniforme qu'il faut appliquer sur la jauge, à la température élevée de polymérisation de la

colle appropriée et à la durée du maintien des deux conditions précitées. De plus le circuit électrique d'alimentation doit être maintenu étanche vis à vis de l'environnement ; la protection en silicone, souple pour suivre les mouvements du bois sans les entraver, se dégrade progressivement sous l'influence de l'humidité rejetée par le bois, plaçant la jauge en atmosphère humide.

Vouloir connaître l'état de déformation réelle de la surface implique donc la présence de nombreuses jauges. Leurs surfaces additionnées occultent une importante section d'alimentation en vapeur d'eau entre l'air et le bois ce qui limite le nombre d'éprouvettes instrumentées. Ce procédé ne s'est donc pas révélé adapté et fiable pour nos mesures. Il faut cependant souligner qu'avec ce procédé de mesure, l'éprouvette n'a pas à être manipulée pendant les essais, contrairement aux solutions envisagées ci-après.

Face à ces contraintes, la solution par voie optique a été retenue. La méthode des moirés, nécessitant l'application d'un film collé, présente les inconvénients du collage précédemment cités. De plus un mauvais état géométrique possible de la surface du bois peut provoquer une distorsion du réseau lors de la mise en place du film. Enfin le coût et la lourdeur d'utilisation du matériel de visée ont conduit à l'abandon de cette méthode.

Le traitement d'images de grilles à maille carrée (voir la figure 2.1), tracées sur la surface a été retenu. Les procédés de marquage par photosensibilisation avec un liquide ou par carbonisation superficielle, trop grossiers, ont été écartés. Nous avons choisi l'usinage par outil laser, guidé par commande numérique sur table à déplacement plan, permettant d'obtenir un trait fin et précis, indispensable pour subir l'agrandissement d'image nécessaire à la digitalisation pratiquée ultérieurement.

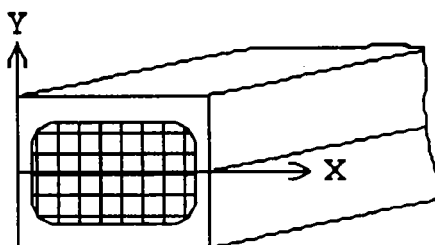


Figure 2.1 : Représentation simplifiée d'un réseau à maille carrée sur une face d'éprouvette.

Ainsi les éprouvettes, sur lesquelles un réseau de traits parallèles a été inscrit, vont être soumises à des variations cycliques d'humidité pendant lesquelles elles seront pesées et photographiées. Les photos successives seront ensuite digitalisées pour être traitées par des logiciels de calcul. La température et l'humidité de l'air sont notées régulièrement.

2.2.2. Orientation des pièces de l'assemblage.

Les variations de dimensions d'une pièce de bois en fonction de l'humidité sont par ordre d'importance décroissante dans les directions T, R et L :

$$(\Delta l)_T > (\Delta l)_R \gg (\Delta l)_L$$

Les variations dimensionnelles du peuplier sont plus importantes que celles du Douglas dans chacune des directions respectives :

$$\begin{aligned}(\Delta l)_T \text{ Peuplier} &> (\Delta l)_T \text{ Douglas} \\ (\Delta l)_R \text{ Peuplier} &> (\Delta l)_R \text{ Douglas} \\ (\Delta l)_L \text{ Peuplier} &> (\Delta l)_L \text{ Douglas}\end{aligned}$$

L'assemblage des éléments d'une poutre lamellé-collée s'effectue en plaçant les directions L des plis en parallèle (voir la figure 2.2).

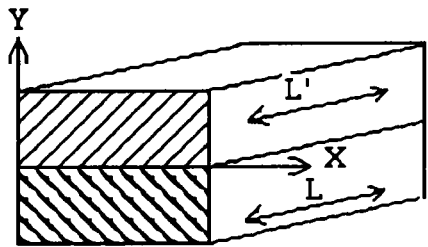


Figure 2.2 : Direction commune de deux pièces de bois assemblées par collage.

Si les déformations dans un plan perpendiculaire à l'axe principal de l'assemblage (en l'occurrence L) et parallèles au joint de colle étaient d'amplitudes égales, celui-ci serait soumis à un étirement (voir la figure 2.3).

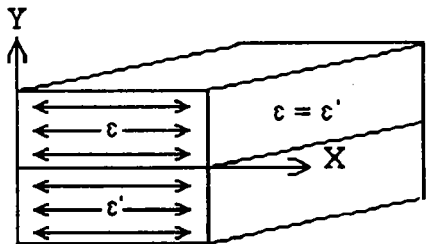


Figure 2.3 : Répartition de déformations unidirectionnelles d'intensité égale sur une face d'éprouvette collée fictive.

C'est rarement le cas (voir la figure 2.4), aussi cette inégalité va provoquer un cisaillement du joint de colle (voir la figure 2.5) que nous allons chercher à maximiser pour nous placer dans des conditions défavorables.

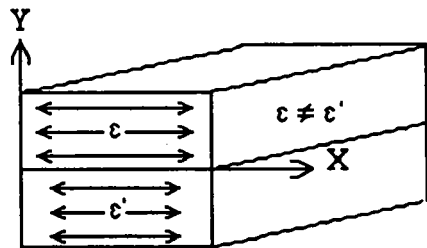


Figure 2.4 : Répartition de déformations unidirectionnelles d'intensités différentes sur une face d'éprouvette collée fictive.

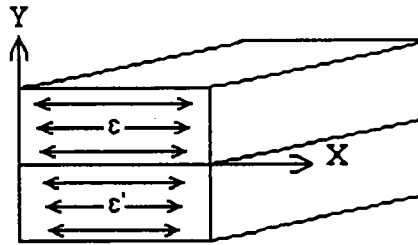


Figure 2.5 : Répartition possible de déformations unidirectionnelles d'intensités variables sur une face d'éprouvette collée réelle.

Pour cela nous allons associer le Douglas et le peuplier selon la configuration de la figure 2.6, quartier sur dosse :

Direction L Peuplier // Direction L Douglas
Direction T Peuplier // Direction R Douglas

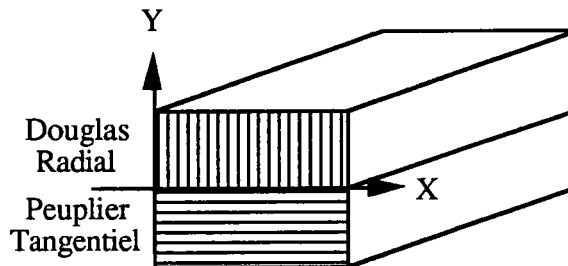


Figure 2.6 : Choix des orientations des éléments constituant une éprouvette collée.

2 . 2 . 3 . Dimensions des éprouvettes .

- Le choix des dimensions tient compte des paramètres qui suivent :
- densité la plus homogène dans un volume donné,
 - variations de dimensions homogènes,
 - minimisation du gradient d'humidité dans la direction L,
 - conservation des proportions d'un tronçon de poutre,
 - facilité de manipulation des éprouvettes,
 - dimensions de la section intéressante adaptée à l'agrandissement de son image pratiquée ultérieurement pour le traitement informatique.

La figure 2.7 présente les dimensions retenues pour l'éprouvette collée. Les dimensions d'une éprouvette non collée sont celles d'un des constituants de l'assemblage.

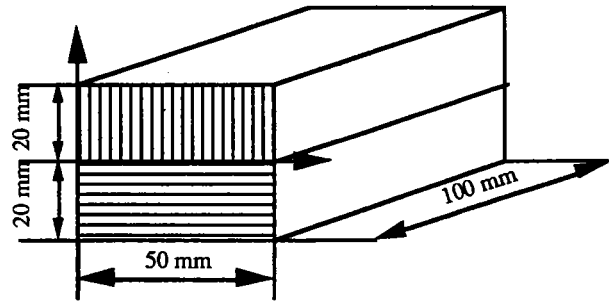


Figure 2.7 : Dimensions des éprouvettes collées.

2 . 2 . 4 . Amplitude hygrométrique .

Nous cherchons à nous placer dans le cas le plus défavorable d'exposition à l'humidité de l'air, soit une amplitude de variation proche de 100 %.

2 . 2 . 5 . Période du cycle .

Des essais ont montré que le bois atteint 80 % de son humidité à saturation à HR = 100 %, depuis l'état anhydre, en 7 jours (voir la figure 2.8).

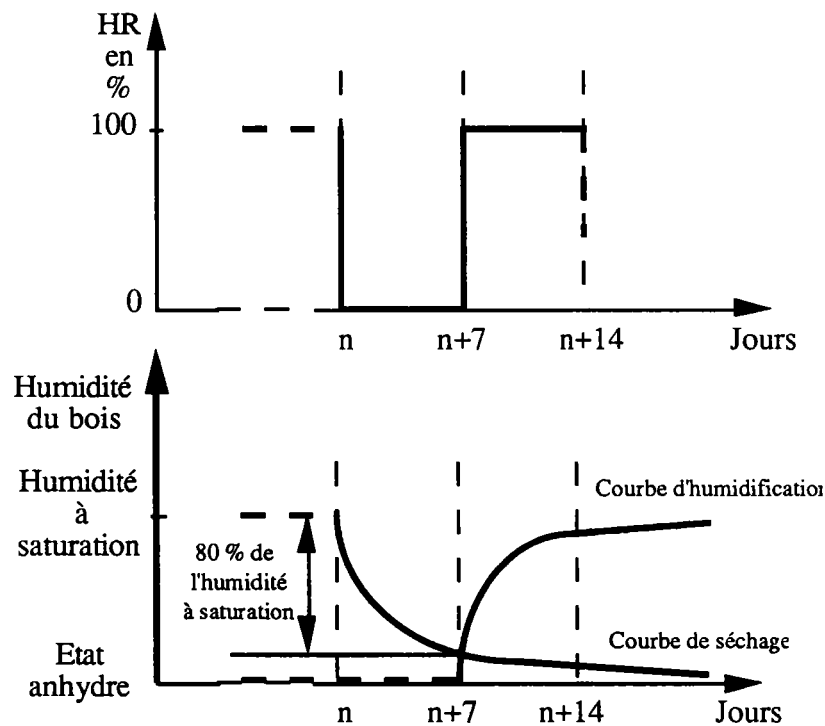


Figure 2.8 : Représentation schématique des variations en fonction du temps de l'humidité relative de l'air et de l'humidité du bois au cours d'un cycle théorique.

Nous supposons que les variations dimensionnelles suivent la même évolution ce qui permet d'envisager un nombre de cycles significatifs de 14 jours, convenant à une observation étalée sur plusieurs mois.

2.3. Epreuves.

2.3.1. Choix du bois.

L'orientation choisie pour les pièces de bois à assembler conduit à réaliser un tri des planches de droit fil disponibles, de dimensions $300 \times 24 \times 3 \text{ cm}^3$, rabotées et stabilisées à l'humidité du laboratoire.

Deux planches de Douglas débitées sur quartier (ou assimilées) et deux de peuplier débitées sur dosse sont ensuite sélectionnées en fonction de leur densité moyenne, de l'absence de défauts, tels les noeuds, et de fissuration naturelle prépondérante chez le Douglas. Plus spécifiquement l'absence de tuilage pour le peuplier et de résine chez le Douglas sont des critères de sélection retenus. Le débit de ces planches est présenté par la figure 2.9.

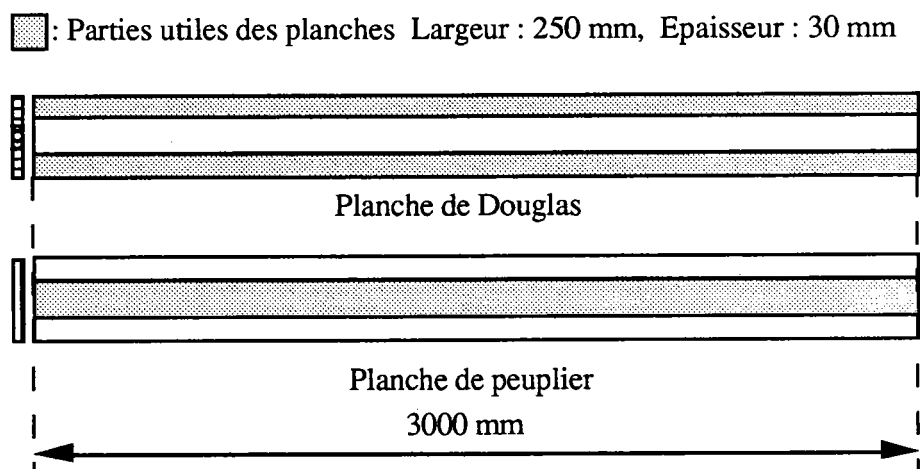


Figure 2.9 : Présentation des parties utiles des planches de Douglas et de peuplier.

2.3.2. Fabrication des éprouvettes . Collage .

Dans les parties utiles des planches de la figure 2.9, on découpe des plis de longueur supérieure à 500 mm associés en couple Douglas-peuplier par collage (voir la figure 2.10). Nous pouvons obtenir de chacun de ces couples théoriquement cinq éprouvettes de longueur finale 100 mm, mais nous préférons n'en faire que quatre. Nous utilisons les deux éprouvettes de la partie centrale qui présentent le collage le plus homogène, sous le point d'application de la charge nécessaire au collage. Les deux autres éprouvettes sont mises en réserve en cas d'incident.

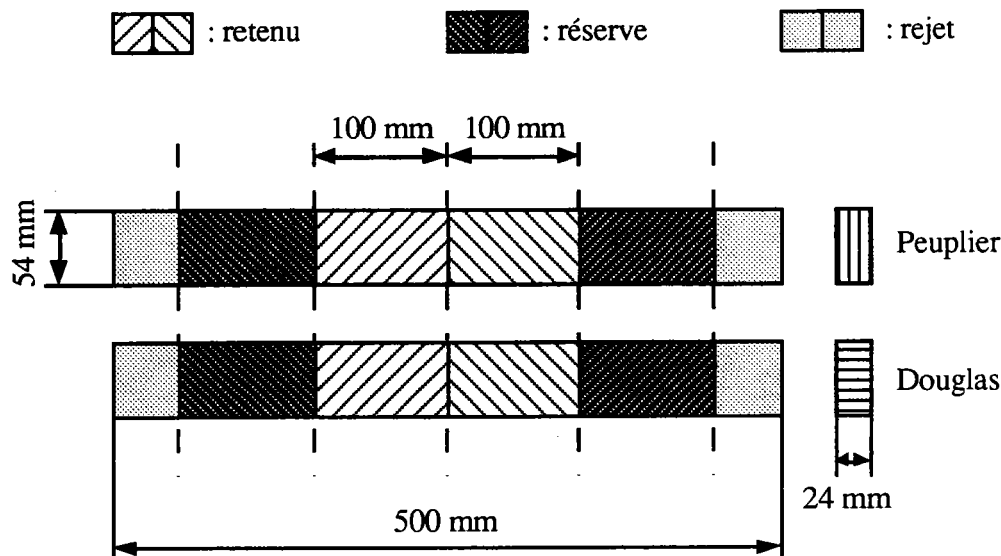


Figure 2.10 : Appariement des plis de Douglas et de peuplier pour les éprouvettes collées.

Des pièces de 100 mm de long sont découpées dans les zones adjacentes des parties destinées au collage et vont servir de témoin en constituant les éprouvettes non collées. Une des faces orientée LR pour le Douglas et LT pour le peuplier est imperméabilisée avec un gel de silicone pour obtenir l'absence de surface de diffusion par analogie avec la même pièce en assemblage collé. Les éprouvettes possèdent donc deux faces d'échanges perpendiculaire à la direction longitudinale. Elles sont étudiées toutes deux et sont dénommées arbitrairement face Gauche et face Droite.

Le tableau 2.1 présente les densités moyennes, à humidité stabilisée au laboratoire, des pièces de bois en assemblage collé ou non, relevées sur des échantillons prélevés dans les parties utiles.

N° Epreuve collée	ρ_{Douglas}	ρ_{Peuplier}
1	0,519	0,519
5	0,502	0,402
9	0,410	0,512
10	0,410	0,512
13	0,412	0,402
20	0,412	0,402

N° Epreuve non collée	ρ_{Douglas}	ρ_{Peuplier}
3	0,502	XXXXXXXXXX
4	XXXXXXXXXX	0,519
7	0,502	XXXXXXXXXX
8	XXXXXXXXXX	0,402

Tableau 2.1 : Relevé des densités moyennes du bois des éléments constituant les éprouvettes.

L'adhésif utilisé est l'Enocol RLF 185 de la société CECA. C'est un mélange liquide résorcine, phénol et formol, visqueux, combiné au durcisseur en poudre DP 155. La quantité recommandée en fonction de l'état de surface est de 300 à 800 g/m² ; il faut utiliser une pression de collage de 7 à 14 MPa pendant 8 h à 20°C.

Le tableau 2.2 présente les caractéristiques des opérations de collage :

	Eprouvettes 1, 9, 10	Eprouvettes 5, 13, 20
Date de fabrication	30 / 06 / 88	01 / 07 / 88
Mise à épaisseur des plis à assembler	20 mm	20 mm
Quantité de colle utilisé	800 g / m ²	600 g / m ²
Durée du mélange colle-durcisseur	4' 30"	4' 30"
Durée de l'encollage, assemblage ouvert	2'	6' 30"
Durée avant mise sous pression, assemblage fermé	30"	1'
Durée de polymérisation	15 h	50 h
Pression de collage	7 MPa	7 MPa
Mise à largeur 50 mm et débit en tronçons de 100 mm	05 / 07 / 88	05 / 07 / 88

Tableau 2.2 : Caractérisation du collage des éprouvettes.

2.3.3. Marquage par faisceau laser.

La société IREPA Laser a été sollicitée pour effectuer cette opération délicate. Une série préliminaire d'essais a permis:

- d'ajuster les paramètres de l'usinage : puissance du faisceau et vitesse de passage sur la pièce,
- de vérifier la lisibilité du réseau sur le bois sec et humide après immersion dans l'eau,
- de constater l'absence de fissuration instantanée rédhitoire due à cet usinage..

Chaque éprouvette retenue (sauf l'éprouvette 20 marquée à l'encre), collée ou non, a été placée dans un montage pour y être maintenue et conserver la surface à marquer parallèle au plan de déplacement de la buse d'usinage. Ce montage est solidaire de la table fixe de la machine au dessus de laquelle se déplace l'outil laser guidé sur rails, dont le mouvement est contrôlé par commande numérique (voir la figure 2.11).

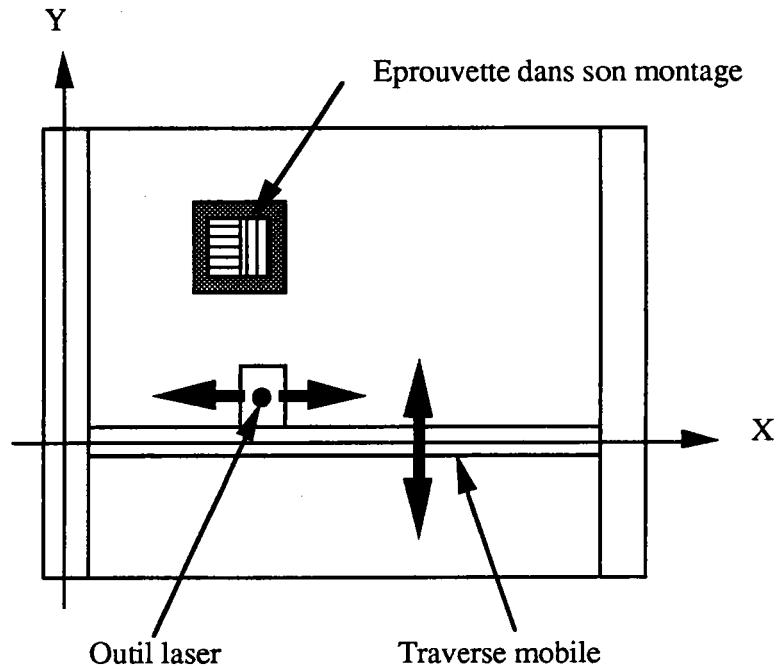


Figure 2.11 : Schéma de la table de travail de l'usinage laser utilisé.

Le faisceau laser est généralement utilisé pour la découpe des matériaux, entre autres le bois. Dans notre cas, il faut seulement sublimer superficiellement la surface sans carboniser le bois. Le diamètre du pinceau lumineux est ajusté par focalisation et est environ de 0,1 mm. Nous obtenons le réseau représenté sur la figure 2.12 en alignant les traits sur le joint de colle.

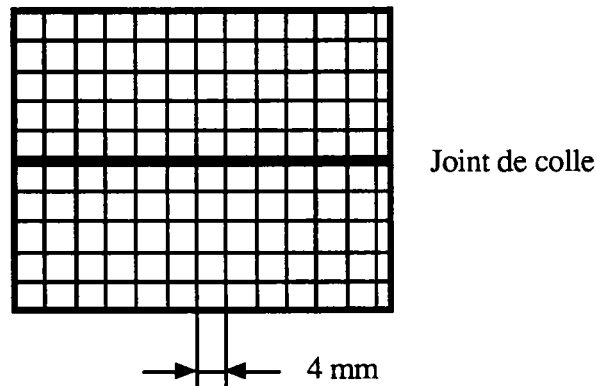


Figure 2.12 : Surface d'éprouvette collée fictive marquée par faisceau laser.

Un pas de 4 mm est choisi pour tenir compte des nécessités suivantes :

- les points d'intersection sont digitalisés, leur nombre doit rester limité. Il est prévu de faire des relevés sur 12 surfaces et ce une centaine de fois. Environ cent cinquante points par surface sont acceptables,

- la distance entre les points d'intersection doit permettre de mesurer une déformation après l'agrandissement pour digitalisation. L'erreur commise lors de cette opération ne doit pas être supérieure aux déformations réelles mesurées sur une trop petite distance.

Il est apparu après réalisation du marquage que les éprouvettes présentaient un défaut de forme et que le réseau ainsi reproduit sur la surface non rectangulaire ne comportait plus une répartition symétrique de points sur la surface, comme représenté de façon amplifiée sur la figure 2.13.

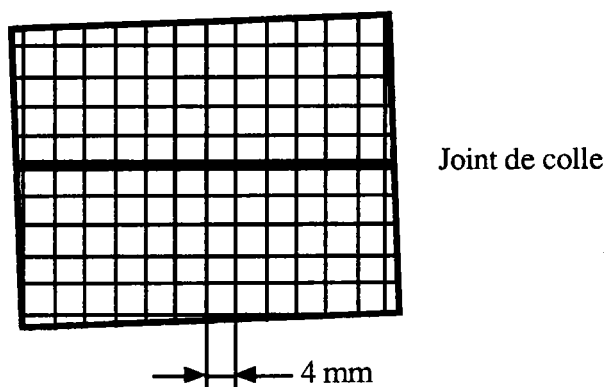


Figure 2.13 : *Surface d'éprouvette collée réelle marquée par faisceau laser avec asymétrie amplifiée.*

L'hétérogénéité du bois, englobant la présence de deux essences et à l'intérieur d'une même essence, la présence de bois de printemps et de bois d'été, a provoqué une pénétration non uniforme du faisceau laser sous la surface. Il n'a pu être adopté, pour des raisons de trop grande complexité, qu'un réglage moyen de l'intensité du marquage. Par ailleurs, l'outil laser étant actif en permanence, chaque arrivée sur la surface a provoqué un léger entaillage au bord de la pièce (voir la figure 2.14).

Le joint de colle a été soumis à la lumière laser aux passages qui lui étaient perpendiculaires, soit en une douzaine de points. Lors des essais d'ajustement de la puissance du faisceau, la colle n'a été que peu altérée alors que le bois environnant se carbonisait. Nous considérons donc que dans les conditions du marquage où le bois est épargné, le joint de colle conserve son intégrité.

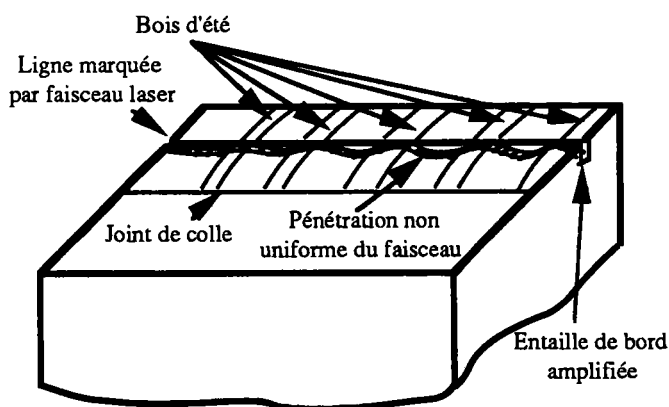


Figure 2.14 : *Représentation d'une ligne marquée sur la surface d'une éprouvette.*

Si l'épaisseur du trait au moment de l'usinage était constante, elle va varier ultérieurement en fonction de la nature du bois entre l'état humide et l'état sec. Nous avons constaté à l'oeil nu une fermeture homogène des sillons du bois mouillé et une ouverture hétérogène au séchage. La profondeur de pénétration varie de 0,1 millimètre dans le bois de printemps à 0,8 millimètre dans le bois d'été.

2.4. Enceinte climatique.

2.4.1. Description de l'appareil.

Les éprouvettes sont placées dans la chambre régulée en température et en humidité d'une enceinte climatique, représentée schématiquement sur la figure 2.15.

En cours de fonctionnement la porte est fermée et la chambre est accessible, sans perturbation notable des conditions hygro-thermiques intérieures, par les ouïes latérales, obturées par un bouchon en matière synthétique, isolante qui se manipule aisément.

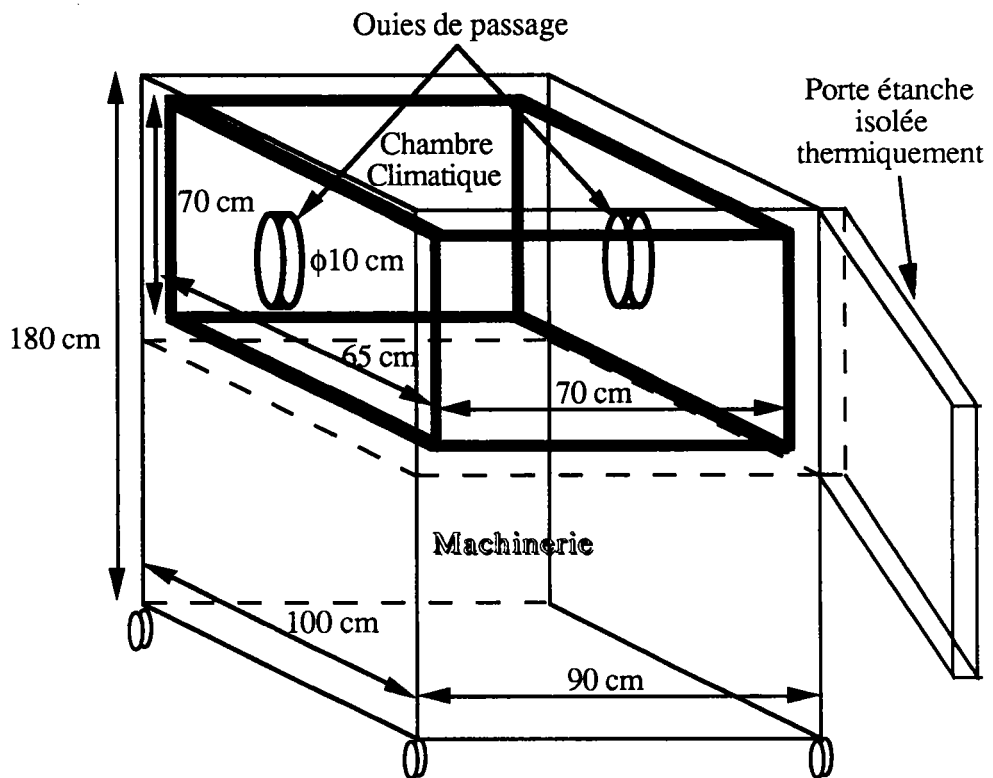


Figure 2.15 : Schéma de l'enceinte climatique.

Cet appareil permet d'obtenir une température de l'air comprise entre -50°C et $+150^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative comprise entre 5 et 100 %, uniquement dans la gamme de température 0°C - 100°C .

La figure 2.16 montre en vue latérale la chambre où sont placées les éprouvettes et les moyens de régulation de la température et de l'humidité de l'air.

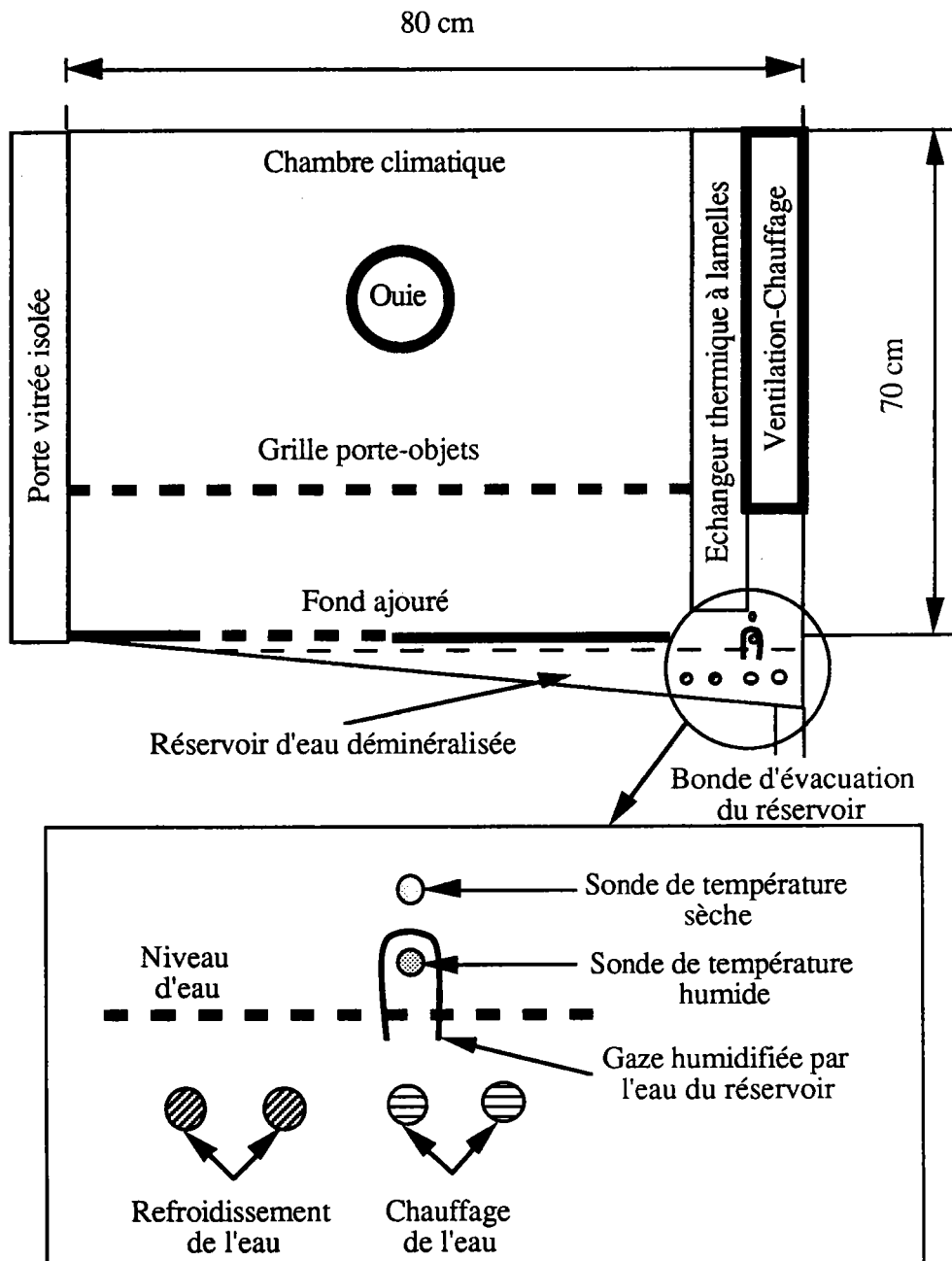


Figure 2.16 : Vue latérale de la chambre climatique.

Dans le fond supérieur de la chambre se trouve un échangeur thermique à lamelles servant au refroidissement de l'air derrière lequel se trouve un appareillage de ventilation et de chauffage de l'air.

Sous l'échangeur thermique, il y a (voir la partie inférieure agrandie de la figure 2.16) :

- une sonde qui mesure la température de l'air au sortir de la ventilation-chauffage, active en permanence, quelques soient la température et l'humidité de l'air demandées,
- une sonde de même type qui sert à mesurer la température de cet air saturé en eau, contenue dans un manchon de gaze humide, qui n'est active qu'en phase air humide,
- un circuit de refroidissement de l'eau dans le réservoir,
- un circuit de chauffage de l'eau au même endroit.

2.4.2. Description du fonctionnement.

La température de l'air requise est constante et égale à 20°C. Seule l'humidité va varier et nous donnons l'explication du fonctionnement de l'enceinte pour deux états particuliers.

2.4.2.1. Air sec à 20 ° C . (voir la figure 2.17)

Il n'y a pas d'eau liquide dans l'enceinte ; s'il en reste, elle est évacuée par la bonde située au fond du réservoir.

L'air est forcé par la ventilation au travers de l'échangeur thermique dans lequel circule un liquide réfrigérant à une température inférieure à 0° C ; il se refroidit au contact des lamelles et restitue l'eau qui vient s'y condenser et geler. Cet air froid est alors réchauffé et revient dans la chambre par le bas, pour à nouveau reprendre un passage dans l'échangeur en continu.

Sa température est mesurée sur la machine par la sonde de température sèche et comparée à la température de consigne, l'intensité du réchauffage s'adaptant à l'écart constaté.

Les essais doivent durer plusieurs mois et il n'est pas impossible qu'une panne électrique vienne perturber leur déroulement. Dans cette hypothèse, le piège à eau ne fonctionne plus, la glace se liquéfie et l'eau s'évapore, l'air se refroidit et son humidité augmente. Il faut alors intervenir rapidement et placer les échantillons dans une enveloppe étanche in situ et ne les extraire qu'au moment où les conditions hygrométriques sont rétablies. Pendant ce temps, le taux d'humidité du bois ne change pas, mais la diffusion interne se poursuit.

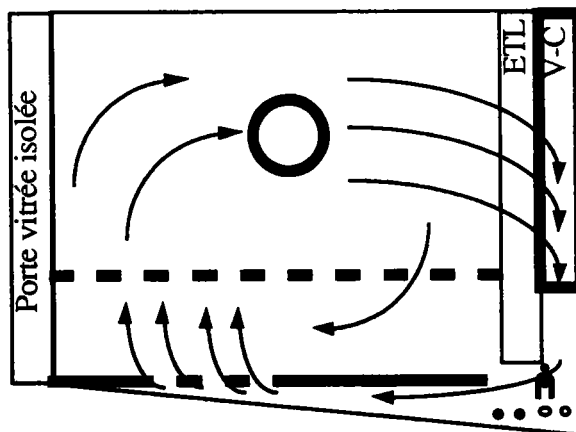


Figure 2.17 : Vue latérale de la chambre climatique avec circulation de l'air sec.

2 . 4 . 2 . 2 . Air humide à saturation à 20 ° C . (voir la figure 2.18)

Le réservoir est rempli d'eau partiellement déminéralisée au passage d'un filtre contenant des résines. La sonde de température d'air humide, hors de l'eau, enveloppée dans de la gaze baignant dans cette eau, devient active et la température qu'elle indique est comparée à celle de consigne.

Pour ajuster l'humidité de l'air, le circuit de réchauffement de l'eau, favorise l'évaporation, ou le circuit de réfrigération de l'eau la réfrène, ces circuits sont activés alternativement.

L'air, humide, est toujours forcé au travers de l'échangeur thermique à lamelles qui le refroidit au besoin ($0^{\circ} \text{C} < T^{\circ} < 100^{\circ} \text{C}$) ; il est réchauffé si nécessaire et passe au dessus de la surface d'eau où a lieu la prise d'humidité.

En cas de panne, l'humidité de l'air diminue faiblement ainsi que la température et il n'est pas nécessaire d'intervenir comme pendant l'assèchement.

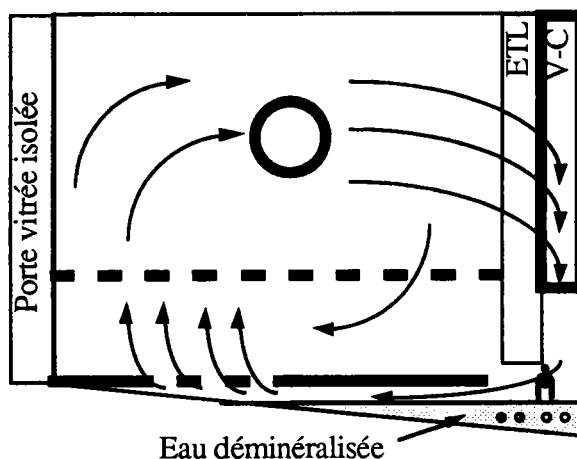


Figure 2.18 : *Vue latérale de la chambre climatique avec circulation de l'air humide.*

2 . 4 . 3 . Performances .

2 . 4 . 3 . 1 . Température .

Lors du passage de l'état sec à l'état humide ou inversement, la température de l'air change invariablement de quelques degrés, quelques soient les températures de consigne affichées pour tenter de compenser ce phénomène. Ce sont les limites de la régulation de l'appareil, qui ne prêtent en fait à aucune conséquence puisque la température se stabilise en une demi-heure environ.

2 . 4 . 3 . 2 . Humidité .

L'humidité de l'air évolue de façon continue comme représenté sur le graphe humidité relative de l'air en % en fonction du temps sur la figure 2.19.

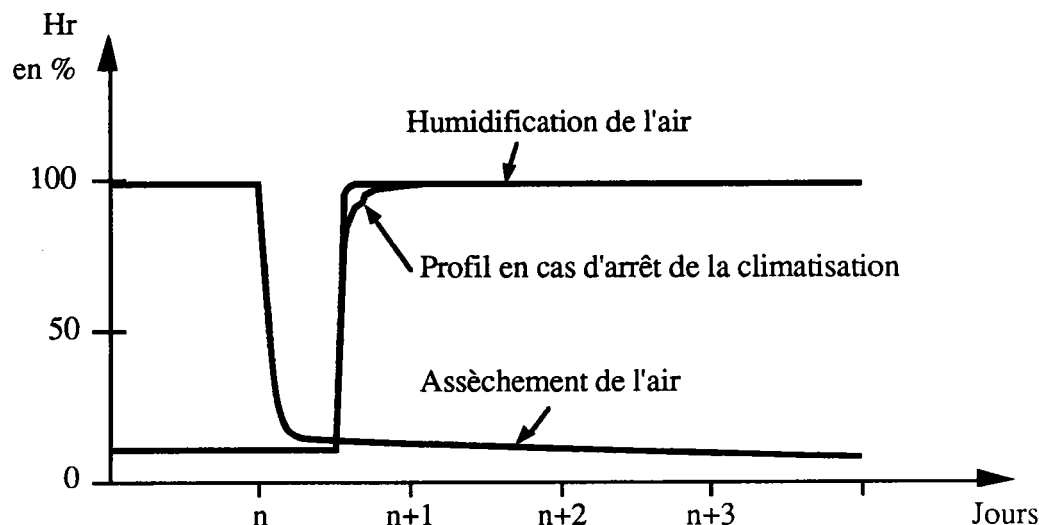


Figure 2.19 : *Courbe d'humidité de l'air de l'enceinte en fonction du temps, en séchage et en humidification.*

L'humidité maximale atteinte est d'environ 95 % sur palier stable, d'après la notice du fabricant. Cette valeur est confirmée par mesure à l'hygromètre à cheveux étalonné placé sur la grille porte-objets et également par deux sondes de température externes.

La valeur minimale est beaucoup plus imprécise et se situe aux environs de 10 % \pm 5 % et a tendance à ne pas être donnée de façon aussi reproductible par la machine. Cette valeur minimale ne constitue pas un palier stable, en effet elle décroît au fil des cycles.

L'humidification en cas de panne lors d'un séchage de l'air, évoquée précédemment, conduit à une légère modification du profil de la courbe d'humidification avant l'arrivée au palier haut.

Le volume de matériau hygroscopique présent dans l'enceinte est faible eu égard à ses dimensions. Les performances décrites avec l'enceinte vide sont maintenues lors de son introduction.

2.5. Mesures.

Les relevés des différentes valeurs citées après sont effectués de façon répétée. A chaque fois la date et l'heure du relevé sont notées.

La figure 2.20 montre l'implantation des différents moyens de mesure et des éprouvettes dans la chambre climatisée.

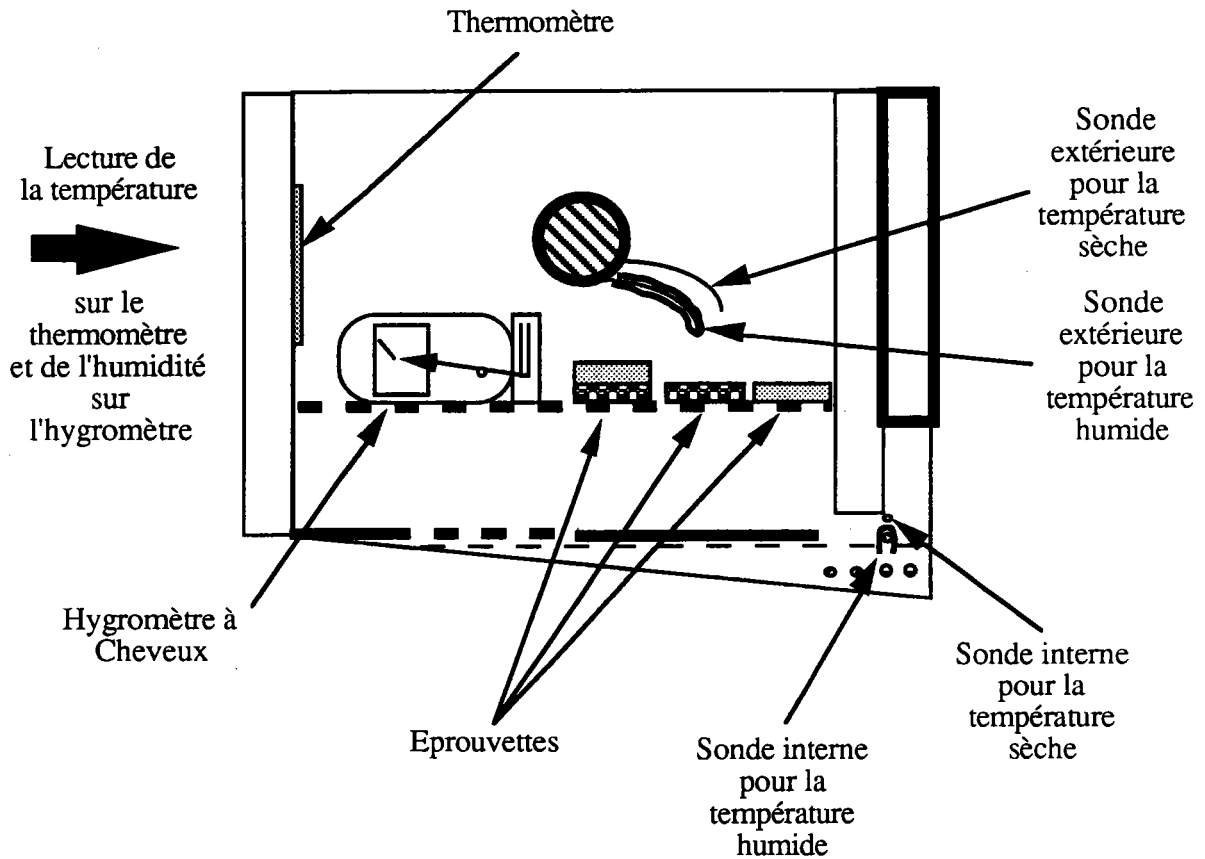


Figure 2.20 : Position des éprouvettes et des instruments de mesure dans la chambre climatique.

2 . 5 . 1 . Air .

La température de l'air est relevée :

- directement sur l'affichage de la sonde de l'enceinte climatique,
- sur un thermomètre placé à même la porte vitrée,
- sur l'appareil relié à un thermocouple étalonné, passant par une ouïe.

L'humidité de l'air est relevée :

- de façon discontinue par lecture sur un diagramme psychrométrique à partir de la température d'air humide relevée directement sur la machine et par lecture sur un appareil relié à un thermocouple étalonné passant par une ouïe,
- de façon continue par un hygromètre à cheveux placés sur la grille porte-objets et qui dispose d'un enregistreur sur papier fonctionnant pendant quatorze jours. Le changement de graphique s'opère en fin de phase humide, au moment où l'ouverture nécessaire de la porte perturbe le moins possible les conditions hygro-thermiques.

2 . 5 . 2 . Bois .

Les relevés concernant les éprouvettes impliquent leur sortie de la chambre climatique, qui s'effectue par les ouïes. La durée passée hors de l'enceinte, particulièrement lors du séjour en atmosphère sèche doit être la plus courte possible.

2 . 5 . 2 . 1 . Pesage .

L'éprouvette est placée sur une balance électronique de précision 0,1 g. Le poids enregistré, ramené au poids anhydre déterminé en fin d'essai donne l'humidité du bois.

2 . 5 . 2 . 2 . Dimensions .

Les dimensions des éprouvettes ont été prises en plusieurs points avec un pied à coulisse précis au 1/50 ème de millimètre (voir la figure 2.21). Ces mesures ne sont pas destinées aux calculs de déformation mais permettent un suivi simple des allongements relatifs en cours d'essai et de préciser les niveaux de déformation atteints pour vérifier les valeurs de déformation obtenues ultérieurement par le calcul et de mettre en évidence le gradient de retrait-gonflement longitudinal.

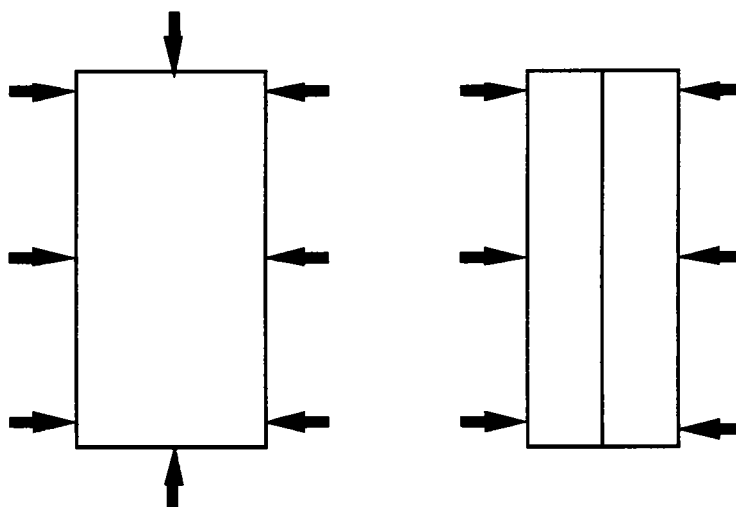


Figure 2.21 : *Position des points de mesure au pied à coulisse sur une éprouvette collée.*

2 . 5 . 2 . 3 . Photographies .

L'éprouvette est placée dans un montage (voir figure 2.22), face à l'objectif macrographique de l'appareil photographique fixe (format de négatif 24 x 36 mm²), pour retrouver la même position à chaque prise de vue. Cela permet de conserver la perpendicularité de la surface à photographier par rapport à l'axe de l'objectif et la distance au plan du film par contact avec une butée, escamotable à la prise de vue.

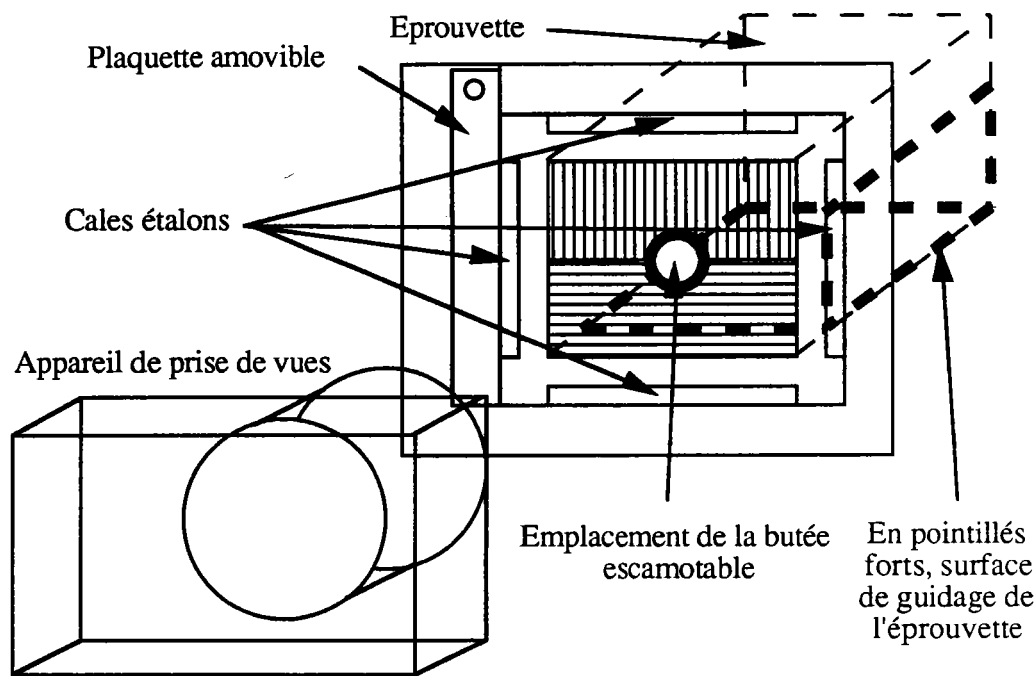


Figure 2.22 : Schéma du montage pour photographier l'éprouvette.

Dans le cas d'une éprouvette collée, on place la partie Douglas au dessus de la partie peuplier et chacune des faces marquées est photographiée. Pour les éprouvettes non collées, on reconstitue sur l'image une éprouvette collée en posant l'éprouvette de Douglas sur l'éprouvette de peuplier correspondante, les faces avant et arrière étant appariées ainsi que les faces imperméabilisées.

Le détail de la zone entourant la face photographiée est donné par la figure 2.23.

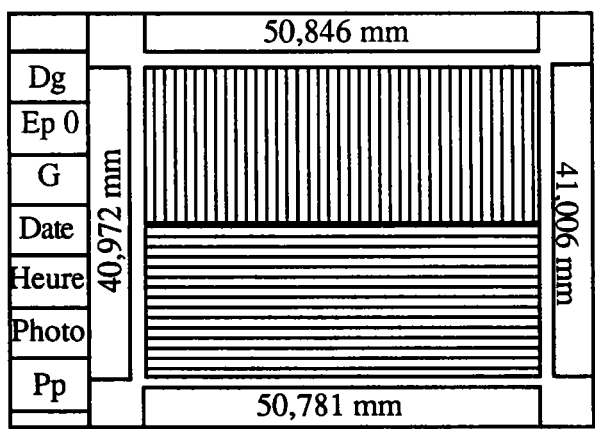


Figure 2.23 : Eléments présents sur chaque photographie de face d'éprouvette.

De nombreuses ruptures cohésives du bois sont apparues dès les deux premiers cycles de séchage. Il faut y distinguer différents cas. Dans les plans RT, pour toutes les éprouvettes marquées par faisceau laser il n'y a pas eu de propagation de fissure radiale ou tangentielle qui est naturelle comme sur des éprouvettes non marquées par ce procédé. Les rares fissures amorcées ont débouché dans les rainures créées par le faisceau laser qui les ont arrêtées.

A partir de certaines entailles de bord accidentelles mentionnées au 2.3.3, des fissures se sont propagées le long des éprouvettes collées principalement dans le Douglas, le peuplier étant moins sujet à ce phénomène. Les éprouvettes non-collées ont été très peu sujettes à ce phénomène.

Les mesures au pied à coulisse ne peuvent être utilisées car elles sont effectuées sur des éprouvettes collées déformées par tuilage du peuplier humide (voir la figure 2.25).

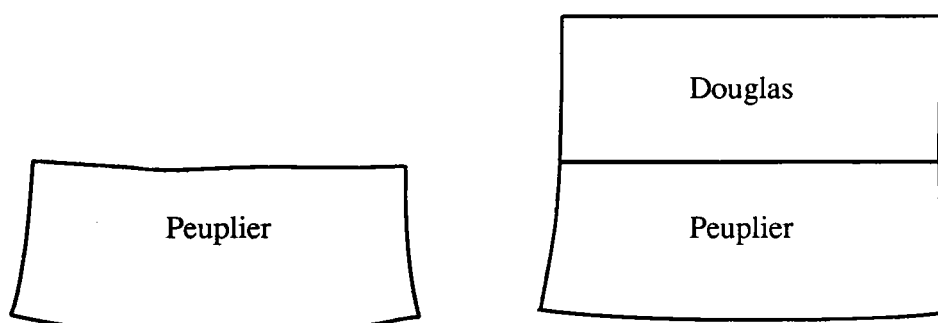


Figure 2.25 : Phénomène de tuilage provoqué par le peuplier.

Le traitement chimique des 96 pellicules photographiques de 36 photos chacune a nécessité 20 heures cumulées en cuve auxquelles il faut ajouter le temps de préparation des produits, de nettoyage des appareillages et de manipulations des films : mise en place dans la cuve de développement, séchage et conservation.

2.7. Conclusions.

Les essais ont été effectués pendant six mois, ce qui a représenté une douzaine de cycles de période 14 jours. L'arrêt a été décidé au vu de la stabilisation des déformations des éprouvettes qui n'ont pas conduit aux ruptures attendues dans un délai imparti.

De nombreuses ruptures cohésives localisées du bois sont apparues dès les deux premiers cycles de séchage ; ces fissurations radiales ou tangentielles étaient prévisibles mais leur propagation s'est arrêtée dans les rainures du marquage laser. Les pièces de bois ne se sont pas fendues globalement comme on aurait pu le craindre au début et cela permet de conserver un milieu continu pour effectuer une représentation du champ réel de déformation.

Quelques pannes ont provoqué des décalages d'au maximum quelques heures lors des changements de demi-cycle qui ont légèrement perturbé la régularité des essais. Cependant le choix de commencer les essais depuis l'état humide s'est révélé judicieux puisque c'est vers cet état qu'on retourne en cas de panne.

Quelques traces de développement très superficiel de bleuissement chez le peuplier sont apparues pendant les phases humides.

CHAPITRE 3

Chapitre 3 . Digitalisation et traitements des résultats .

3 . 1 . Introduction .

Nous disposons d'une part des valeurs numériques relevées manuellement et d'autre part des images de points à partir desquelles nous voulons calculer des déformations. Les premières ne présentent pas de difficultés particulières à saisir au clavier d'ordinateur, par contre la digitalisation d'image ne peut se faire précisément et rapidement qu'au moyen d'une table à digitaliser.

Pour le calcul qui s'ensuit, nous avons décidé de commander les logiciels à partir de la table à digitaliser car le nombre d'informations différentes à communiquer à l'ordinateur en interactif est important et source d'erreurs par le clavier.

Nous avons conçu et utilisé un logiciel pour saisir les données et deux logiciels de calcul et de représentation graphique des résultats. Le premier logiciel de calcul donne accès à l'état de déformation de toute la surface d'une face d'éprouvette digitalisée à un instant de mesure, le second donne des valeurs de déformation au fil des mesures. Les différentes représentations des résultats du chapitre 4 sont décrites dans ce chapitre.

3 . 2 . Organisation du traitement de données .

Les données dont nous disposons vont être une fois pour toutes saisies puis après conversion nécessaire, décrite au paragraphe 3 . 4, lues et servir au calcul. L'organigramme de la figure 3.1, présente succinctement les étapes rencontrées entre la saisie des données et les représentations graphiques issues des calculs.

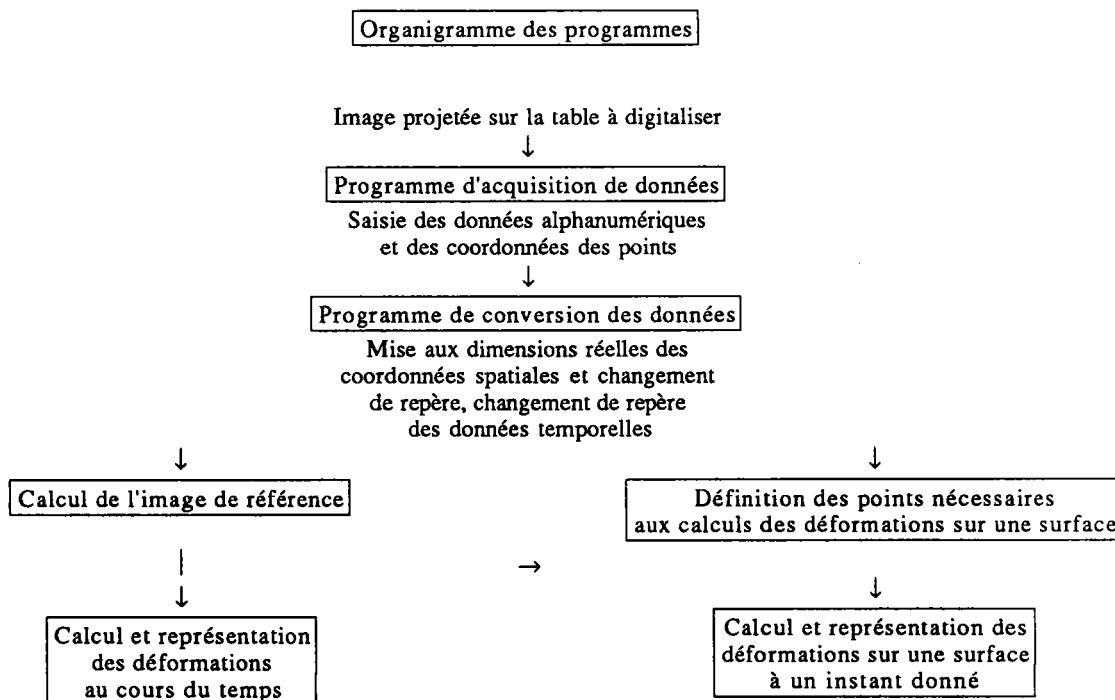


Figure 3.1 : Déroulement du traitement informatique des données.

3.3. Saisies de données.

3.3.1. Généralités.

L'image d'une face d'éprouvette est agrandie le plus possible, pour s'adapter aux dimensions de la surface sensible de la table à digitaliser (297 x 430 mm²), ce qui permet de minimiser l'erreur relative $\frac{\Delta m}{z}$ (Δm : résolution de la table à digitaliser et z : distance entre deux points sur la table à digitaliser) lors du calcul des variations de distance entre points.

La taille du négatif est de 24 x 36 mm², l'image de l'éprouvette y est plus petite (18 x 22 mm²) puisque figurent également sur la photo les renseignements relatifs à la prise de vues et les cales étalons. L'agrandissement de l'image de la face d'éprouvette semble important mais il ne faut pas oublier que sa taille réelle est de 50 x 40 mm², ce qui réduit notablement la valeur de l'agrandissement. L'image projetée de la face atteint environ 230 x 285 mm² et le rapport d'agrandissement est donc de l'ordre de 5,7 contre 12,8 pour l'agrandissement du négatif.

Dans un premier temps il a été envisagé de tirer sur papier format 305 x 406 mm² chaque photographie, puis de la placer sur la table à digitaliser, l'épaisseur du papier n'entravant pas la lecture du stylo. Les négatifs sont sombres et le temps d'exposition du papier sensible excède deux minutes, pendant lesquelles le film exposé à la chaleur de l'ampoule puissante qui l'éclaire risque de se déformer. L'image obtenue sur papier reste constante par la suite pendant la digitalisation. Le traitement chimique de la feuille impressionnée demande une demi-heure suivie d'une journée de séchage pour la manipuler sans détérioration. Les premières images sur support papier plastique se sont cornées en dépit des précautions prises au séchage. Leur mode de fixation sur la table à digitaliser les rend ondulées rendant le pointage imprécis. De plus ces images ne sont utilisées qu'une seule et unique fois ; le coût d'une telle entreprise est prohibitif en argent et temps.

Pour parer à la plupart de ces inconvénients, l'image négative est projetée sur la table à digitaliser directement depuis l'agrandisseur.

3.3.2. Description du procédé. (voir la figure 3.2)

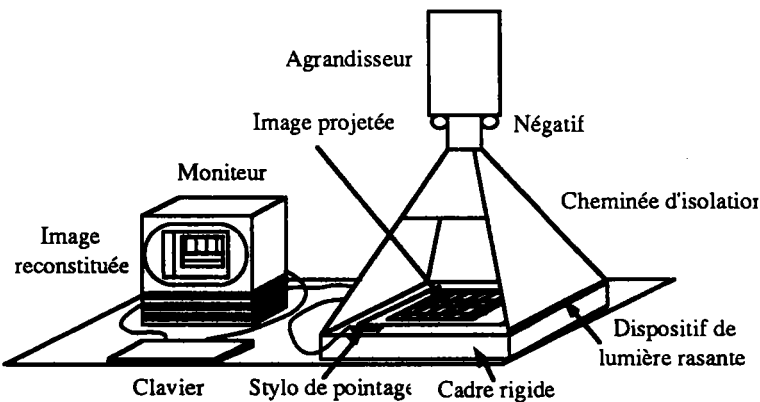


Figure 3.2 : Configuration du matériel de digitalisation d'images.

L'ordre des différentes phases est le suivant :

- éclairage de l'agrandisseur activé,
- mise en place du négatif et réglage de la netteté de l'image,
- éclairage de l'agrandisseur désactivé,
- insertion de la disquette appropriée à la face d'éprouvette dans le lecteur,
- saisie au clavier des données alphanumériques,
- éclairage de l'agrandisseur activé,
- saisie à la table à digitaliser,
- éclairage de l'agrandisseur désactivé,
- sauvegarde des données.

Les images sont enregistrées dans l'ordre des pellicules, donc à chaque image la séquence complète d'opérations est répétée.

Ce procédé simple présente toutefois un certain nombre d'inconvénients :

- le négatif doit être éclairé pendant 3 à 6 minutes, temps nécessaire aux opérations de pointage ; le travail s'effectuant en continu, les pièces métalliques de l'agrandisseur s'échauffent et l'interruption d'éclairage pratiquée dès que possible n'est pas suffisante pour éviter l'échauffement du film négatif maintenu au-dessus de l'objectif, ce qui accroît les possibilités de déformations signalées précédemment, pendant le pointage même,
- le négatif sombre initialement est difficile à lire agrandi, ce qui provoque une fatigue visuelle importante due à l'effort de concentration. En effet, il y a si peu de lumière transmise qu'une cheminée isolante, noire à l'intérieur, empêchant tout reflet lumineux parasite de venir sur la surface de projection, est nécessaire, en complément de la feuille de papier blanc, écran, posée sur la table à digitaliser,
- la pointe du stylo de pointage est invisible éclairée par le dessus avec la seule lumière traversant le négatif. Un dispositif de lumière rasante sur la table à digitaliser permet de résoudre ce problème,
- la table à digitaliser ne doit absolument pas bouger par rapport au négatif pendant toute la durée de la saisie, d'où son immobilisation dans un cadre solidaire de l'agrandisseur,
- il faut travailler constamment avec les seules lumières de l'agrandisseur, de l'écran d'ordinateur et d'une lampe de faible puissance pour lire le clavier, augmentant la fatigue visuelle.

3 . 3 . 3 . Déroulement des séquences de saisie .

3 . 3 . 3 . 1 . Saisie au clavier .

Les mesures notées sur feuilles sont introduites au clavier à la demande de l'écran présenté sur la figure 3.3. Le numéro d'éprouvette et la face sont saisies puis s'affichent le jour et l'heure de la saisie. La date et l'heure du relevé, l'humidité de l'air, le poids de l'éprouvette et la référence de la photographie sont ensuite demandés.

Saisie_1 : Mesures manuscrites		
Questions	N°	Réponses
Donner le numéro de l'éprouvette ** , 01 à 20	:	01
Donner le type de face G ou D	:	Gauche
Jour actuel	:	23 Mar 91
Heure actuelle	:	18:18:08
Donner la date	1	609
Donner l'heure	2	1519
Donner HR	3	95
Donner le poids	4	112,5
Donner Pel,pho	5	1,13

Figure 3.3 : Ecran de saisie des données alphanumériques introduites au clavier.

3 . 3 . 3 . 2 . Digitalisation des cales étalons .

La figure 3.4 représente l'écran qui reconstitue l'image photo d'une éprouvette collée pour pouvoir suivre le déroulement de la digitalisation. Il ne comprend pas alors les éléments repérés CE1, CE2, CE3 et CE4, reliés au cadre en trait fort qui représentent les contours des cales étalons.

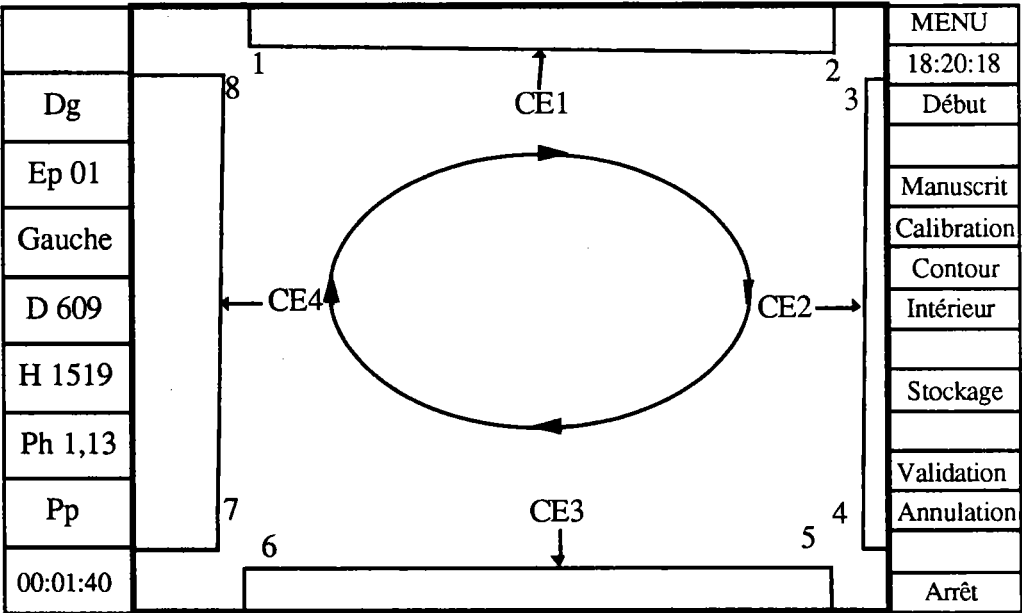


Figure 3.4 : Ecran de saisie des extrémités des cales étalons.

On pointe sur la table le point 1 qui fait apparaître le segment vertical cadre-point 1, puis on vise le point repéré 2 qui ferme alors le contour de l'élément CE1. Les autres extrémités des trois cales étalons sont pointées dans le sens des aiguilles d'une montre (3,4), (5,6) puis (7,8).

3.3.3.3. Digitalisation du contour de l'éprouvette.

On pointe maintenant les sommets du quadrilatère, les points d'intersection du marquage avec le contour et les deux points d'intersection du joint de colle et du contour, s'ils existent. L'opération s'effectue en commençant en haut à gauche et dans le sens des aiguilles d'une montre. A l'écran s'affichent dans l'ordre les nombres repérant les points enregistrés (voir la figure 3.5).

																		MENU	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	18:21:44		
Dg		48															16	Début	
Ep 01		47															17		
Gauche		46															18	Manuscrit	
		45															19	Calibration	
D 609		44															20	Contour	
H 1519		43															21	Intérieur	
		42															22	Stockage	
Ph 1,13		41															23		
Pp	40															24	Validation		
00:03:06		39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	Annulation		
																		Arrêt	

Figure 3.5 : Ecran de saisie des points du contour.

3.3.3.4. Digitalisation des points intérieurs au contour.

La figure 3.6 présente l'écran où figurent le contour dessiné et dans lequel vont apparaître progressivement les points d'intersection des lignes du marquage entre elles et avec le joint de colle, si elles existent.

															MENU	
															18:24:13	
Dg															Début	
Ep 01																
Gauche															Manuscrit	
D 609															Calibration	
H 1519															Contour	
Ph 1,13															Intérieur	
Pp																
00:05:35															Stockage	
															Validation	
															Annulation	
															Arrêt	

Figure 3.6 : Ecran de saisie des points intérieurs au contour.

3.3.3.5. Sauvegarde des données.

L'ensemble des données ainsi enregistrées est copié dans cet ordre de lecture dans un fichier ; il y a un fichier par photographie et la totalité des fichiers concernant une face d'éprouvette se trouve sur une disquette.

3.3.3.6. Remarques.

L'image de la photographie à l'instant du début des essais pour chaque face d'éprouvette est digitalisée dix fois pour permettre de quantifier la précision du pointage et fabriquer une image initiale moyenne. C'est en référence à cette image que les calculs de déformation seront effectués.

La précision du pointage est également étudiée par un programme d'essai qui a mis en évidence l'influence des paramètres suivants :

- sens de déplacement du stylo,
- direction de déplacement,
- vitesse d'exécution,
- fatigue de l'opérateur.

A la saisie des données, il est possible d'effectuer des corrections instantanées :

- les données saisies au clavier sont modifiables individuellement pendant la première phase,
- une donnée digitalisée est corrigible uniquement après sa saisie. On peut recommencer chacune des trois phases de digitalisation mais on ne peut pas revenir à la phase précédente. Un contrôle sur le nombre de points à digitaliser dans chacune des deux dernières phases est effectué puisque les images successives de la même face d'éprouvette doivent impérativement comporter le même nombre de points,

- les données digitalisées de chaque face d'éprouvettes ont été contrôlées ultérieurement visuellement en les reconstituant sur l'écran pour y déceler d'éventuelles erreurs de pointage.

A partir des durées relevées pour la saisie de toutes les données, nous pouvons quantifier en temps cette opération :

- 2054 images ont été digitalisées,
- plus de 300 000 pointages ont été effectués,
- 180 heures de manipulation ont été nécessaires.

3 . 4 . Conversion des données .

3 . 4 . 1 . Restitution de l'image digitalisée .

Les données digitalisées sont exprimées en unités graphiques de la table et dans son repère, représenté sur la figure 3.7.

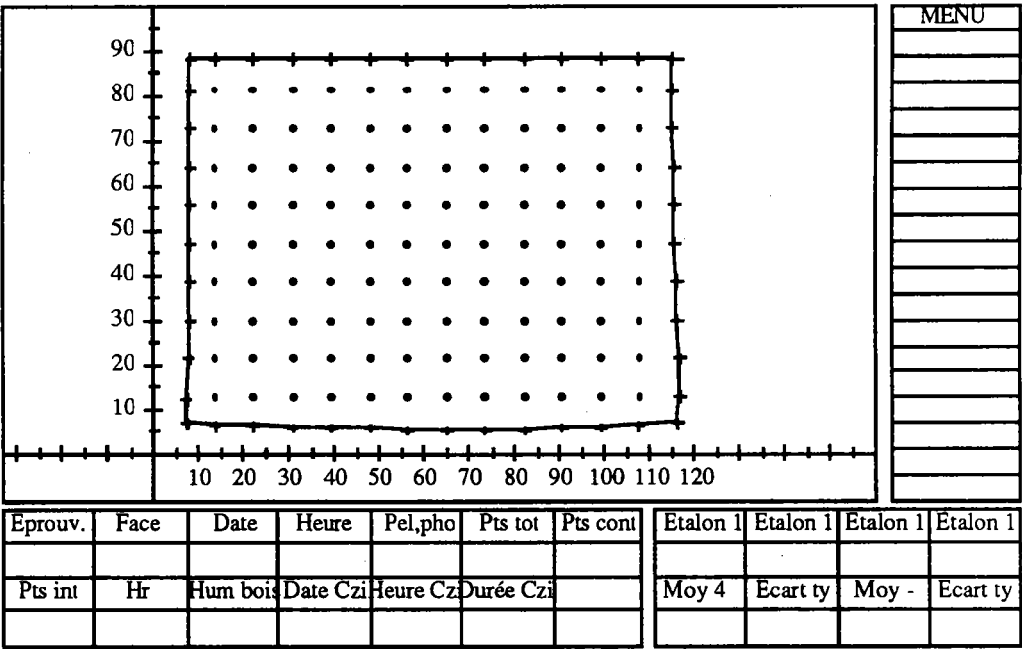


Figure 3.7 : Image à l'écran d'une face d'éprouvette collée dans le repère de la table à digitaliser avec ses unités.

3 . 4 . 2 . Calibration des images .

Chaque photographie de face d'éprouvette est supposée ne pas avoir été prise dans les mêmes conditions de distance au film négatif, puis ne pas avoir été projetée avec le même agrandissement lors de la digitalisation : les coordonnées des extrémités des cales étalons vont permettre de calibrer chaque image en calculant le coefficient de conversion entre les longueurs de cales exprimées en millimètres et ces mêmes longueurs exprimées en unités de la table à digitaliser.

La figure 3.8 montre l'image de la face d'éprouvette avec les unités en millimètres toujours exprimées dans le repère de la table.

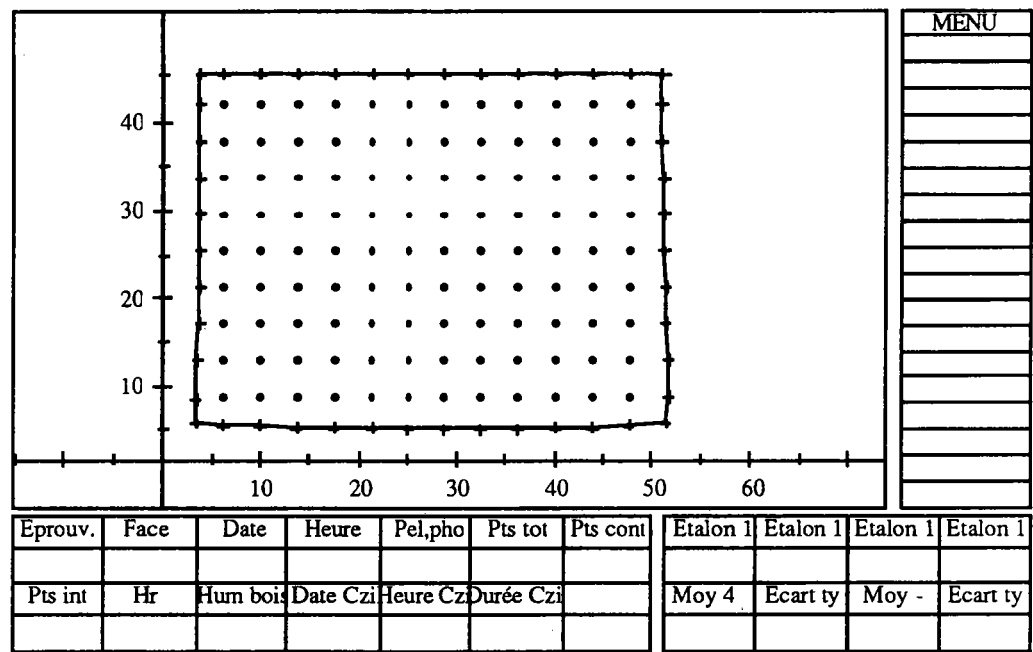


Figure 3.8 : Image à l'écran d'une face d'éprouvette collée dans le repère de la table à digitaliser en millimètres.

Nous disposons de quatre cales étalons disposées autour de la surface de l'éprouvette. Nous avons calculé le changement d'échelle à partir de la moyenne des trois valeurs du coefficient de conversion les plus proches sur chaque image. La cale la plus rejetée est la cale CE4 avec 34 % de rejet puis la cale CE3 avec 33,5 %, ensuite nous trouvons la cale CE1 avec 21 %. La cale la plus fiable est la cale CE2 avec 11,5 %. Ces écarts sont dus en partie aux conditions de pointage différentes décrites au paragraphe 3 . 3 . 6.

3 . 4 . 3 . Changement de repère .

Pour suivre la représentation à l'écran des différentes valeurs représentées ultérieurement, les données vont être exprimées dans le même repère pour chacune des faces d'éprouvettes :

- pour les éprouvettes collées, l'origine est choisie à l'intersection du joint de colle et du contour gauche et l'axe Ox passe par l'intersection du joint de colle et du contour droit,
- pour les éprouvettes non collées de Douglas dont l'image est dans la partie supérieure, l'origine est au coin en bas à gauche de la section et l'axe Ox passe par le coin en bas à droite,
- pour les éprouvettes non collées de peuplier dont l'image est dans la partie inférieure, l'origine est au coin en haut à gauche de la section et l'axe Ox passe par le coin en haut à droite.

La nouvelle configuration obtenue pour une éprouvette collée est visualisée sur la figure 3.9.

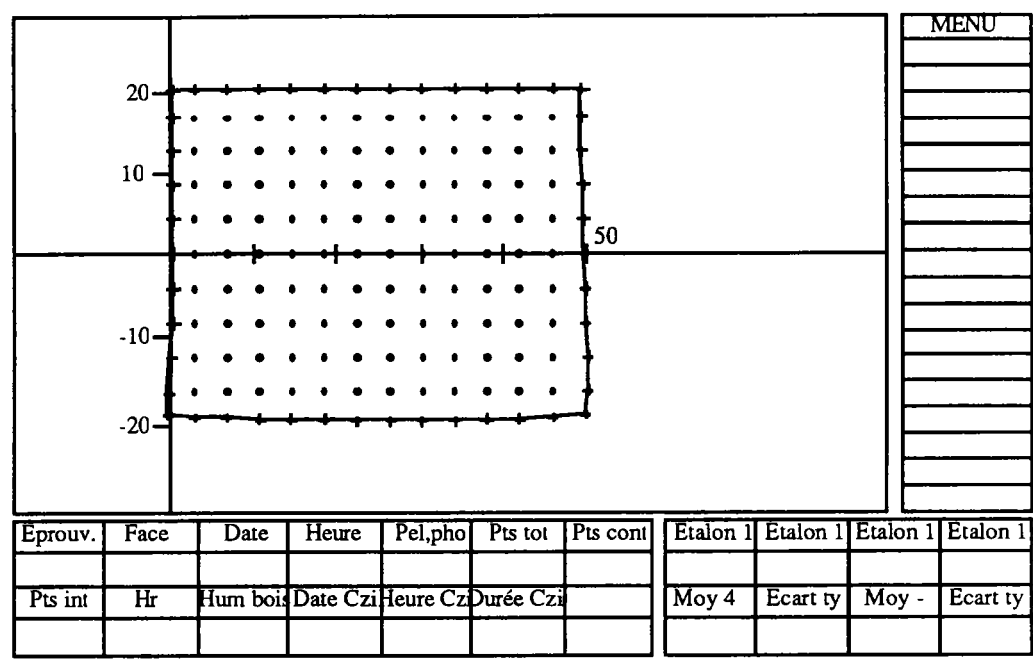


Figure 3.9 : Image à l'écran d'une face d'éprouvette collée dans son repère en millimètres.

3.5. Calculs.

3.5.1. Théorie des déformations. Rappel du problème plan.

Nous voulons connaître l'état de déformation d'une surface. Les données dont nous disposons sont les coordonnées de points, répartis régulièrement sur cette surface et distants les uns des autres d'environ quatre millimètres.

La théorie des déformations est établie en supposant la continuité du milieu déformé et la localisation de la déformation à une zone infiniment petite. Ainsi on peut définir un champ de déplacement, numérique ou analytique, duquel se déduit le champ de déformation.

Nous nous proposons d'utiliser les formules de calcul obtenues pour nous permettre de quantifier la déformation, bien que les hypothèses mentionnées précédemment ne soient pas parfaitement respectées sur le matériau. Connaissant les limites dans lesquelles nous évoluons, nous pouvons expliciter les différences de valeurs des déformations enregistrées en tenant compte du non respect de ces hypothèses.

Pour connaître les composantes du tenseur de déformations planes en un point P, ϵ_{xx} , ϵ_{yy} et ϵ_{xy} , nous allons introduire la déformation apparente ϵ de vecteurs issus de ce point.

Considérons la surface (S) de la figure 3.10 :

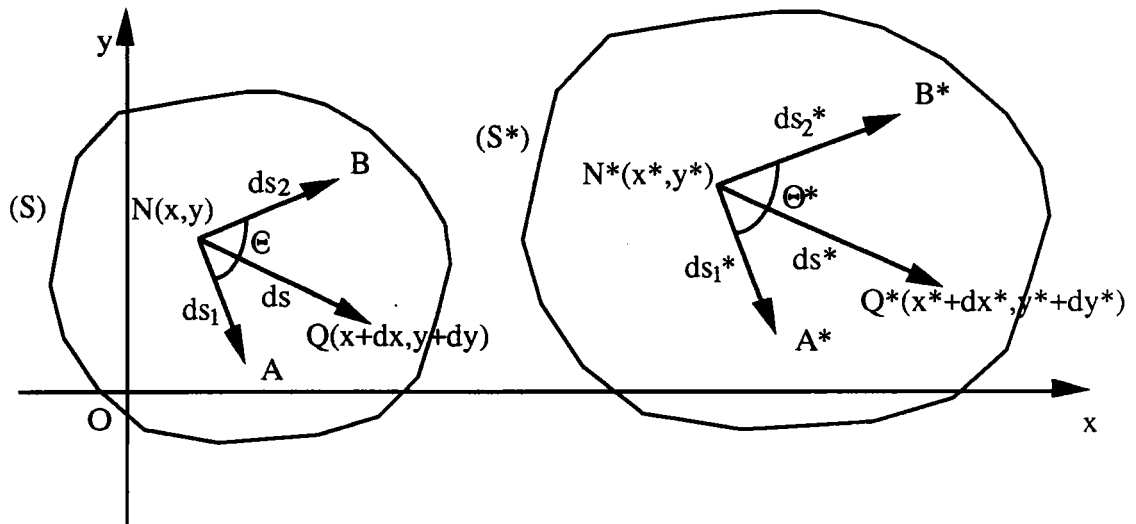


Figure 3.10 : Représentation d'une surface (S) avant et après déformation.

Les points situés en N, Q, A et B de (S) se déplacent respectivement en N*, Q*, A* et B* de (S*) après déformation. Sur l'élément linéaire NQ :

$$N = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, Q = \begin{pmatrix} x + dx \\ y + dy \end{pmatrix} \text{ deviennent sur l'élément linéaire } N^*Q^* : N^* = \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \end{pmatrix}, Q^* = \begin{pmatrix} x^* + dx^* \\ y^* + dy^* \end{pmatrix}$$

$$\text{avec } \begin{cases} x^* = x + u \\ y^* = y + v \end{cases}, u \text{ et } v \text{ composantes du vecteur déplacement en N.}$$

$$\text{et } \begin{cases} (ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2 \\ (ds^*)^2 = (dx^*)^2 + (dy^*)^2 \end{cases}$$

Nous définissons la déformation apparente ϵ du segment NQ :

$$\epsilon_E = \frac{ds^* - ds}{ds} \quad (\text{Formule 3.1})$$

Cette déformation apparente est reliée aux composantes du tenseur de déformation exprimées au point N par :

$$\epsilon + \frac{1}{2} \epsilon^2 = l^2 \epsilon_{xx} + m^2 \epsilon_{yy} + 2 l m \epsilon_{xy} \quad (\text{Formule 3. 2})$$

Avec :

ϵ_{xx} : déformation dans la direction Ox,
 ϵ_{yy} : déformation dans la direction Oy,
 ϵ_{xy} : cisaillement.

$$\left. \begin{matrix} l : \frac{dx}{ds} \\ m : \frac{dy}{ds} \end{matrix} \right\} \text{cosinus directeurs de } \overrightarrow{NQ}$$

Nous voulons connaître la valeur de ϵ_{xx} , ϵ_{yy} et ϵ_{xy} au point N. Deux autres équations similaires à la formule 3.2 peuvent être écrites en considérant les segments NA (indice 1) et NB (indice 2), la valeur des déformations étant indépendante de la direction dans laquelle elles sont mesurées. Nous obtenons alors le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \epsilon + \frac{1}{2} \epsilon^2 = l^2 \epsilon_{xx} + m^2 \epsilon_{yy} + 2 l m \epsilon_{xy} \\ \epsilon_1 + \frac{1}{2} \epsilon_1^2 = l_1^2 \epsilon_{xx} + m_1^2 \epsilon_{yy} + 2 l_1 m_1 \epsilon_{xy} \\ \epsilon_2 + \frac{1}{2} \epsilon_2^2 = l_2^2 \epsilon_{xx} + m_2^2 \epsilon_{yy} + 2 l_2 m_2 \epsilon_{xy} \end{cases} \quad (\text{Formule 3.3})$$

Avec :

$$\left. \begin{matrix} l_1 \\ m_1 \end{matrix} \right\} \text{cosinus directeurs de } \overrightarrow{NA}, \quad \left. \begin{matrix} l_2 \\ m_2 \end{matrix} \right\} \text{cosinus directeurs de } \overrightarrow{NB}$$

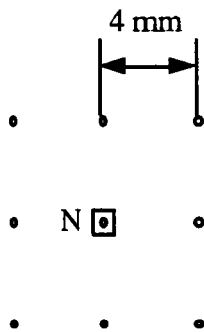
Les coordonnées des points expérimentaux permettent d'accéder à ces quantités en résolvant le système en chaque point N relevé sur la surface déformée avec les points Q, A et B associés, formant un quadruplet . On peut considérer la surface comme continue en remarquant toutefois que les distances entre ces quatre points ne sont pas infiniment petites.

3 . 5 . 2 . Application à la surface d'une éprouvette infinie .

3 . 5 . 2 . 1 . Introduction .

Le milieu déformé sur lequel les déformations sont recherchées est discrétisé. Nous commençons par le considérer infini avant d'apporter par la suite les modifications liées à la présence d'un contour.

3 . 5 . 2 . 2 . Orientation des segments NQ .



Autour d'un point central considéré N (encadré sur la figure 3.11), il y a huit plus proches voisins qui définissent huit directions pour huit segments NQ. Pour une direction choisie, les segments NA et NB associés sont alors sélectionnés parmi les sept points voisins restants.

Figure 3.11 : Position des points voisins d'un point origine N.

Le tableau 3.1 présente les huit orientations, leur dénomination complète et abrégée.

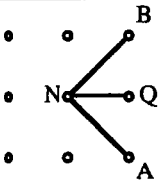
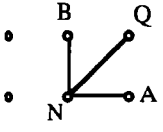
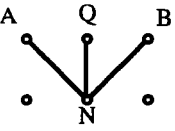
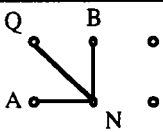
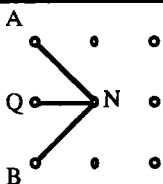
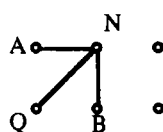
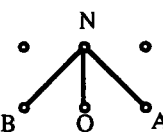
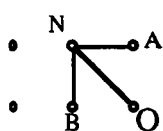
Orientation des points du quadruplet	Dénomination	Dénomination abrégée
	Est-Est	EE
	Nord-Est	NE
	Nord-Nord	NN
	Nord-Ouest	NO
	Ouest-Ouest	OO
	Sud-Ouest	SO
	Sud-Sud	SS
	Sud-Est	SE

Tableau 3.1 : Dénomination des orientations de quadruplets.

Il existe de part la structure du matériau bois une influence de la direction de mesure.

3.5.2.3. Précision du calcul.

Un quadruplet (N,Q,A,B) forme un quadrilatère. La plus petite distance entre deux points est environ quatre millimètres. Considérons un segment NQ avant et après déformation (voir le tableau 3.2) :

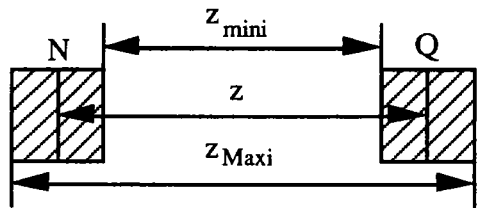
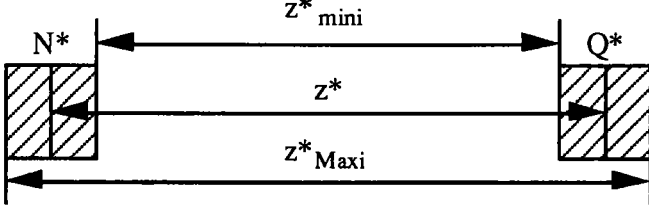
Positions de deux points de l'éprouvette sur la photographie projetée sur la table à digitaliser	
	Avant déformation
	Après déformation

Tableau 3.2 : Définitions des valeurs relatives de position de deux points avant et après déformation.

- z : distance entre N et Q avant déformation.
- z_{mini} : longueur calculée à partir des coordonnées de N et Q avec l'erreur de digitalisation par défaut.
- z_{Maxi} : longueur calculée à partir des coordonnées de N et Q avec l'erreur de digitalisation par excès.

$z_{\text{mini}} = z - 2\Delta m$ (Formule 3.4) et $z_{\text{Maxi}} = z + 2\Delta m$ (Formule 3.5)

Δm est la résolution de la table à digitaliser.

De même :

- z' : distance entre N et Q après déformation.
- z'_{mini} : longueur calculée à partir des coordonnées de N et Q avec l'erreur de digitalisation par défaut.
- z'_{Maxi} : longueur calculée à partir des coordonnées de N et Q avec l'erreur de digitalisation par excès.

$z'_{\text{mini}} = z' - 2\Delta m$ (Formule 3.6) et $z'_{\text{Maxi}} = z' + 2\Delta m$ (Formule 3.7)

La déformation du segment NQ est :

$$\varepsilon = \frac{z' - z}{z} \quad (\text{Formule 3.8})$$

La déformation minimale calculée du segment NQ est :

$$\varepsilon_{\text{mini}} = \frac{z'_{\text{mini}} - z_{\text{Maxi}}}{z_{\text{Maxi}}} \quad (\text{Formule (3.9)})$$

La déformation maximale calculée du segment NQ est :

$$\varepsilon_{\text{Maxi}} = \frac{z'_{\text{Maxi}} - z_{\text{mini}}}{z_{\text{mini}}} \quad (\text{Formule 3.10})$$

En exprimant z_{mini} , z_{Maxi} , z'_{mini} et z'_{Maxi} et avec $z' - z = \varepsilon z$:

$$\varepsilon_{\text{Maxi}} - \varepsilon_{\text{mini}} = \frac{4 z \Delta m (\varepsilon + 2)}{(z^2 - 4 \Delta m^2)} = \frac{4 \Delta m (z + z')}{(z^2 - 4 \Delta m^2)} \quad (\text{Formule 3.11})$$

Cette formule donne l'incertitude de mesure d'une déformation. La résolution de la table à digitaliser est donnée par le constructeur et vaut 0,6 mm avec une implantation de fils sensibles tous les 0,1 mm. Cet écart est attribuable à la prise en compte de la dimension de l'extrémité arrondie du stylo de pointage, en contact avec la table à digitaliser. Cependant les essais de pointage mentionnés au paragraphe 3 . 3 . 3 . 6 ont montré qu'une valeur plus faible de Δm est réalisable.

La figure 3.12 présente $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\text{Maxi}} - \varepsilon_{\text{mini}}$ en fonction de la base de mesure, c'est à dire des distances en millimètres relevées sur la table à digitaliser, avec en particulier les valeurs correspondant à trois tailles de quadruplet multiples de 4 mm, multipliées par le coefficient d'agrandissement 5,7.

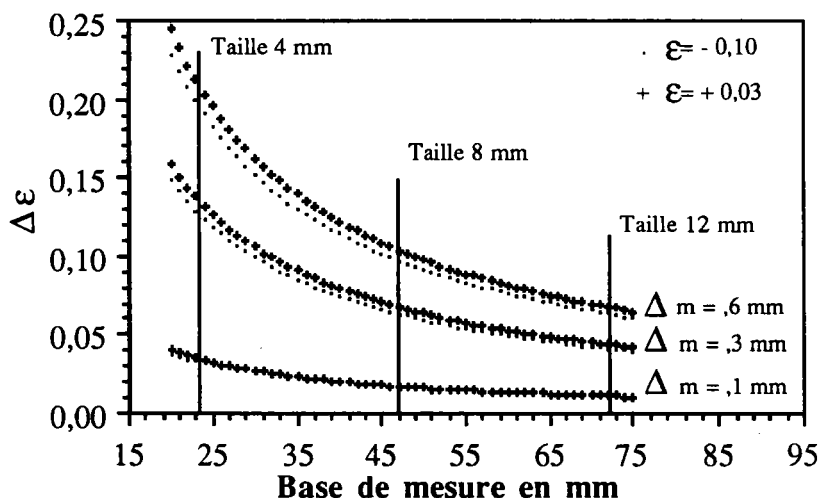


Figure 3.12 : Variations de l'incertitude de la mesure d'une déformation en fonction de la résolution de la table à digitaliser et de la longueur relevée sur cette table.

L'influence de l'amplitude de la résolution est très importante, celle de l'intensité de la déformation très faible (il y a peu de différence entre les courbes correspondant à $\epsilon = - 0,10$ et $\epsilon = + 0,03$). Ceci montre que quelque soit le cas rencontré, l'incertitude sur une mesure reste très grande.

3 . 5 . 2 . 4 . Taille du quadruplet .

La résolution de la méthode de dépouillement étant faible cela nous conduit à utiliser des tailles de quadruplets multiples de 4 pour minimiser l'erreur relative sur les mesures (voir le tableau 3.3).

	Taille 4 mm	Taille 8 mm	Taille 12 mm
Pour les orientations EE, NN, OO et SS.			
Pour les orientations NE, NO, SO et SE.			

Tableau 3.3 : Définitions des trois tailles de quadruplets.

3 . 5 . 2 . 5 . Recouvrement des quadruplets .

Si nous choisissons de calculer les déformations en chaque point de la surface, pour les tailles 8 et 12 mm il y a recouvrement des quadruplets (voir les exemples du tableau 3.4). Cette situation correspondrait, si nous faisons l'analogie avec une mesure par jauges électriques, à faire se recouvrir partiellement ces jauges. Il y aurait alors une perturbation dans la transmission de la déformation de l'éprouvette aux jauges.

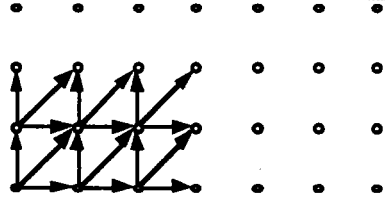
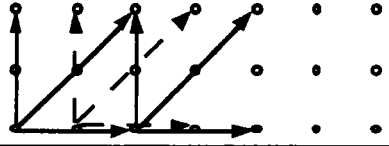
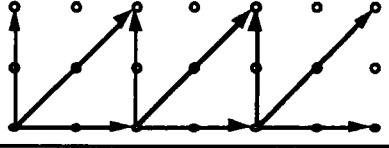
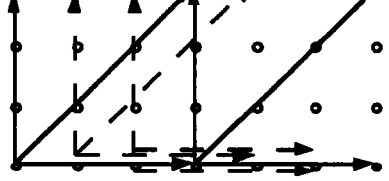
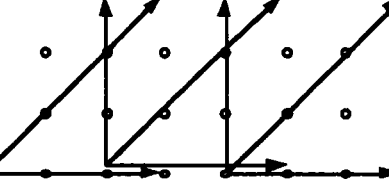
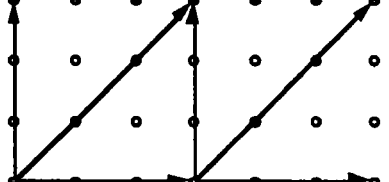
Distance NQ	Configurations	Observations
$\approx 5\text{ mm}$		Pas de 4 mm suivant Ox et Oy Les déformations sont calculées sur des segments disjoints
$\approx 11\text{ mm}$		Pas de 4 mm suivant Ox Les déformations sont calculées sur des segments superposés
		Pas de 8 mm suivant Ox Les déformations sont calculées sur des segments disjoints
$\approx 17\text{ mm}$		Pas de 4 mm suivant Ox Les déformations sont calculées sur des segments superposés
		Pas de 8 mm suivant Ox Les déformations sont calculées sur des segments superposés
		Pas de 12 mm suivant Ox Les déformations sont calculées sur des segments disjoints

Tableau 3.4 : Présentation des recouvrements des quadruplets avec l'orientation NE.

Dans notre cas pour éviter ce recouvrement, il faudrait exclure des maillages de taille 8 et 12 millimètres les points entourés de la figure 3.13.

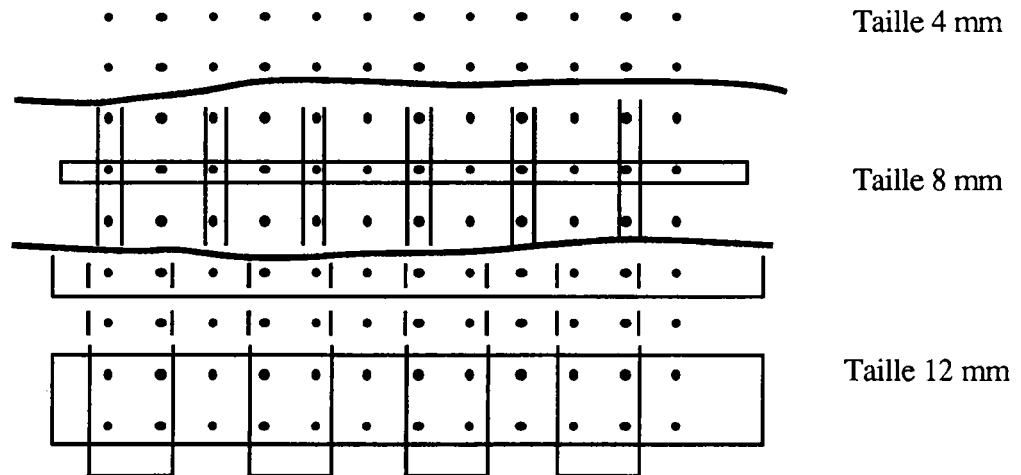


Figure 3.13 : Présentation des points de maillage avec et sans élimination.

Puisque dans notre cas il n'y a pas de recouvrement physique d'objets, cette élimination extrêmement fréquente et pénalisante n'est en fait pas nécessaire. Nous prenons l'option de calculer sur chaque point N_i la déformation quelque soit la taille du quadruplet.

3 . 5 . 3 . Application à la surface d'une éprouvette réelle .

3 . 5 . 3 . 1 . Introduction .

La surface de l'éprouvette n'est pas infinie. Elle compte un certain nombre de points intérieurs au contour, régulièrement espacés et des points délimitant ce contour moins régulièrement répartis. Nous expliquons les choix de maillage adoptés à partir des points de la surface réelle.

3 . 5 . 3 . 2 . Points pris en compte .

Lors de la digitalisation de l'image, nous avons enregistré la position des points particuliers suivant :

- les sommets du quadrilatère,
- les intersections du marquage laser avec le contour,
- les intersections du joint de colle, s'il existe, avec le marquage laser et le contour,
- les intersections du marquage laser.

La figure 3.14 montre en pointillés la zone de validité des calculs telle qu'elle ressort des hypothèses énoncées au paragraphe 3 . 5 . 1, c'est à dire un milieu assimilé sans contour, infini. Si nous choisissons une taille de quadruplet de 4 millimètres avec une orientation NE, nous avons accès aux déformations de la zone encadrée en trait fort fin. Nous supposons que nous pouvons inclure les points du contour au calcul ce qui permet d'augmenter l'étendue de cette zone (trait fort épais).

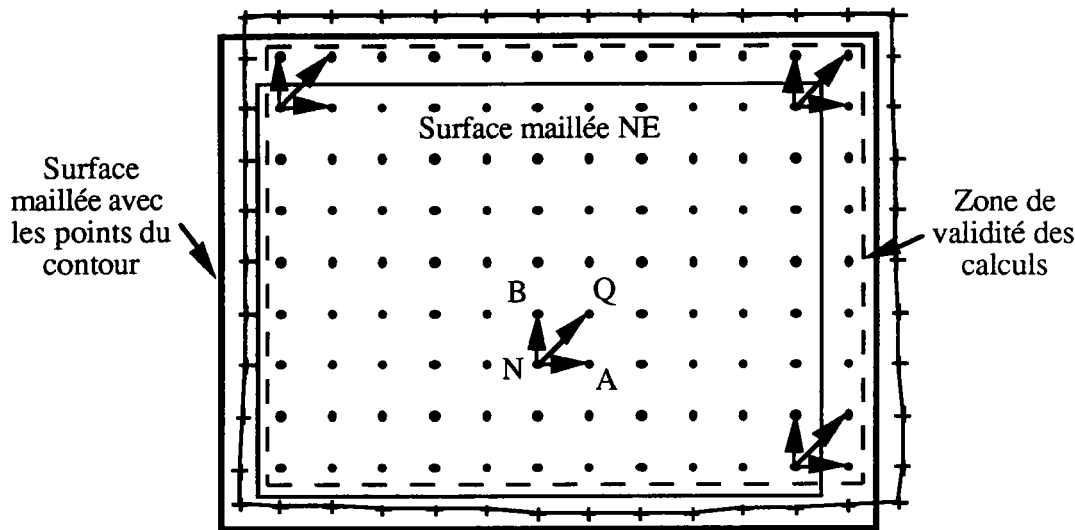


Figure 3.14 : Présentation des zones de maillage avec et sans points de contour.

Si nous prenons l'exemple du maillage NE de cette figure, le nombre de points N_i disponibles hors points du contour est de :

$$n_1 = \left((r - 2) - \left(\frac{\text{Taille}}{4} \right) \right) \left((s - 2) - \left(\frac{\text{Taille}}{4} \right) \right) \quad (\text{Formule 3.12})$$

r et s étant le nombre total de points respectivement suivant Ox et Oy .

En englobant les points du contour, ce nombre devient :

$$n_2 = \left((r - 1) - \left(\frac{\text{Taille}}{4} \right) \right) \left((s - 1) - \left(\frac{\text{Taille}}{4} \right) \right) \quad (\text{Formule 3.13})$$

Le tableau 3.5 présente le gain d'information moyen, arrondi à l'unité, par le rapport de la formule 3.14 en fonction de la taille de quadruplet pour une petite surface (éprouvette non collée) et une grande surface (éprouvette collée) :

$$\text{Gain d'information} = \frac{N_2 - N_1}{N_1} \quad (\text{Formule 3.14})$$

Taille de quadruplet en mm	Gain en % pour les petites faces	Gain en % pour les grandes faces
04	46	25
08	66	28
12	125	33

Tableau 3.5 : Gain d'information en utilisant les points du contour.

3 . 5 . 3 . 3 . Maillage multidirectionnel .

Au paragraphe 3 . 5 . 3 . 2 les points du contour ont été intégrés au calcul. Cependant tous ces nouveaux points ajoutés ne peuvent être origine d'un quadruplet avec une orientation fixe comme représenté sur la figure 3.15.

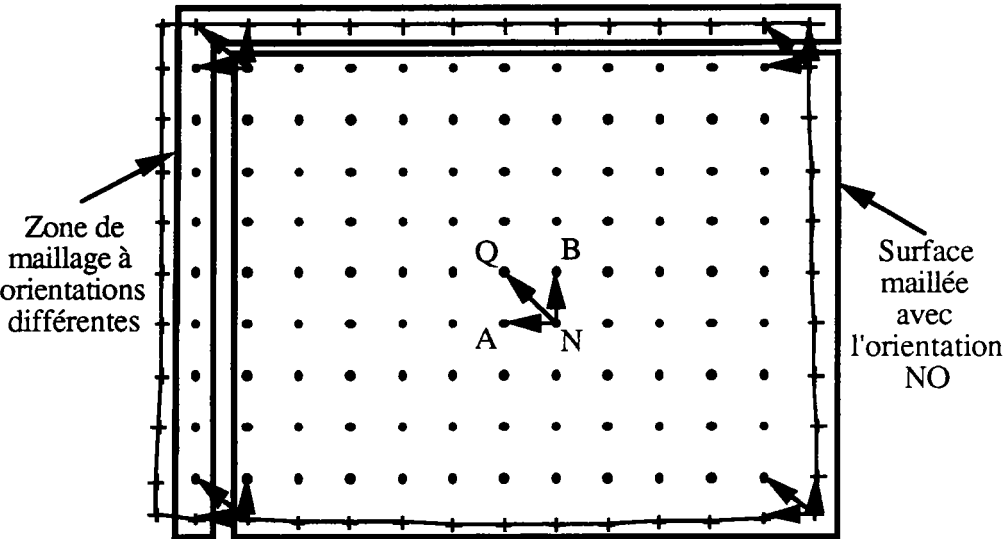


Figure 3.15 : Répartition des zones de maillage sur la face d'éprouvettes. Cas d'un quadruplet avec l'orientation NO.

Nous pouvons toujours trouver trois proches voisins Q, A, B à chacun des points origines si nous n'imposons pas l'orientation. L'ordre d'enregistrement des points conditionne en fait la répartition des orientations sur la surface. En l'occurrence, et après correction de quelques points particuliers, nous obtenons la répartition de la figure 3.16 pour toutes les faces, après avoir abandonné les orientations EE, NN, OO et SS, trop restrictives.

r points				
s p o i n t s	SE	(Formule 3.15)	(Formule 3.16)	SO
		$\frac{\left(\frac{\text{Taille}}{4}\right)^2}{r * s}$	$\frac{\left(r - \left(\frac{\text{Taille}}{4}\right)\right) \left(\frac{\text{Taille}}{4}\right)}{r * s}$	
		$\frac{\left(s - \left(\frac{\text{Taille}}{4}\right)\right) \left(\frac{\text{Taille}}{4}\right)}{r * s}$	$\frac{\left(r - \left(\frac{\text{Taille}}{4}\right)\right) \left(s - \left(\frac{\text{Taille}}{4}\right)\right)}{r * s}$	
	NE	(Formule 3.17)	(Formule 3.18)	NO

Figure 3.16 : Proportion des différentes orientations de quadruplet en fonction du nombre de points r et s, et de la taille du quadruplet sur une face d'éprouvette.

La proportion de chaque orientation dépend du nombre de points r et s, et de la taille du quadruplet. Une proportion proche de 1 pour la zone NO traduit l'homogénéité du maillage.

Le tableau 3.6 présente les proportions moyennes de chaque orientation, exprimées en pourcentages du nombre total de points, pour une petite surface avec r = 13 et s = 6.

Taille de quadruplet	SE	SO	NE	NO	Total
4	1	15,5	6,5	77	100
8	5	28	10	57	100
12	11,5	38,5	11,5	38,5	100

Tableau 3.6 : Proportion moyenne de points avec les différentes orientations du maillage en fonction du pas pour une petite surface.

De même le tableau 3.7 présente ces proportions moyennes de chaque orientation pour une grande surface avec r = 13 et s = 11.

Taille de quadruplet	SE	SO	NE	NO	Total
4	1	9	7	83	100
8	2,5	15,5	12,5	69,5	100
12	6,5	21	16,5	56	100

Tableau 3.7 : Proportion moyenne de points avec les différentes orientations du maillage en fonction du pas pour une grande surface.

La proportion de quadruplets orientés NO reste en majorité la plus importante des quatre orientations et cette proportion est plus importante pour une grande surface que pour une plus petite, ce qui traduit dans ce cas une plus grande homogénéité du maillage. Enfin pour une même surface, elle décroît lorsque la taille du quadruplet augmente.

Ce maillage multidirectionnel permet un gain d'information par rapport au maillage à direction imposée NO, en ajoutant les quadruplets orientés SE, SO et NE de :

$$\text{Gain} = \frac{\left(\frac{\text{Taille}}{4}\right) \left(r + s - \left(\frac{\text{Taille}}{4}\right)\right)}{\left(r - \left(\frac{\text{Taille}}{4}\right)\right) \left(s - \left(\frac{\text{Taille}}{4}\right)\right)}$$

(Formule 3.19)

Le tableau 3.8 donne des valeurs arrondies de ce gain d'information exprimé en pourcentage pour une petite et une grande face, utilisées précédemment.

Taille de quadruplet	Petite face $r = 13, s = 6$	Grande face $r = 13, s = 11$
4	30	19
8	77	44
12	160	79

Tableau 3.8 : Gain d'information moyen en fonction de la taille de la surface et de la taille du quadruplet.

Le maillage multidirectionnel fait apparaître cependant quelques points remarquables où d'après le mode de calcul, il y a des valeurs numériques pratiquement identiques de part et d'autres des frontières entre zones, si la déformation est homogène. Le tableau 3.9 présente pour les trois tailles de quadruplets, les bandes de valeurs des déformations ϵ_{xx} et ϵ_{yy} qui peuvent être identiques, les points étant pris en vis à vis.

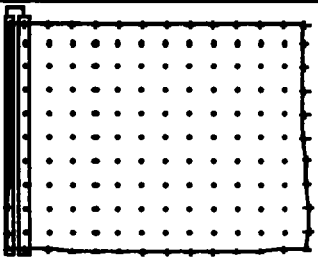
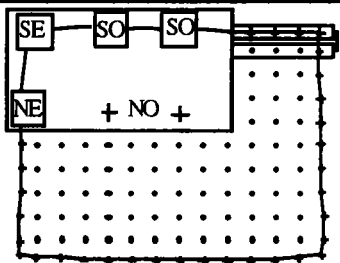
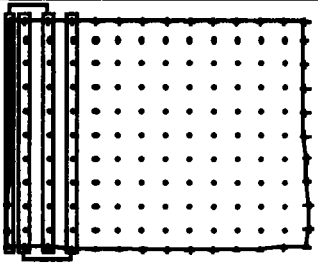
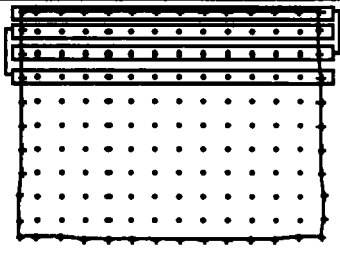
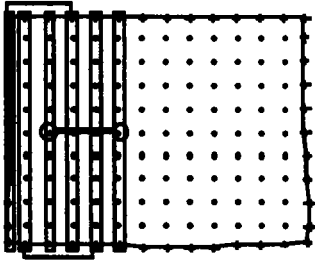
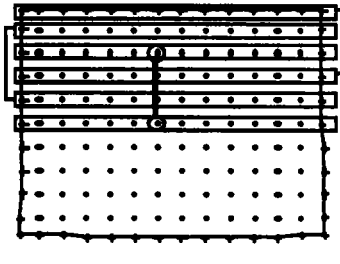
Taille de quadruplet	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}
4 mm		
8 mm		
12 mm		

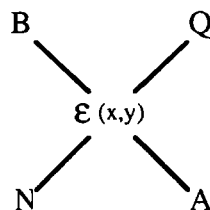
Tableau 3.9 : Bandes de valeurs identiques des déformations sur une surface maillée.

L'explication de cette identité de valeurs se fait avec par exemple la déformation ϵ_{yy} à partir de la taille 4 millimètres d'un quadruplet. Sur la première ligne, le premier quadruplet est orienté SE et les suivants SO. Sur la deuxième ligne, le premier quadruplet est orienté NE et les suivants NO. L'influence des segments NB est prépondérante pour le calcul, puis vient celle des segments NQ, celle des segments NA horizontaux est négligeable. Chaque segment $N_i B_i$ de la première ligne coïncide avec un segment $N_j B_j$ de la deuxième ligne. En général les valeurs de la déformation ϵ_{yy} vont être identiques en N_i et N_j pour de faibles amplitudes de déformation à cause de l'incertitude de la méthode de mesure et si nous effectuons un arrondi des valeurs pour la représentation graphique. Ce raisonnement permet de déduire quels sont les points où les valeurs sont identiques avec l'autre composante de la déformation ϵ_{xx} et avec les deux autres tailles de quadruplet.

3.5.4. Position et lissage des déformations.

La théorie des déformations permet de calculer la déformation en un point N_i de coordonnées quelconques. La méthode de dépouillement que nous avons adoptée est similaire à la méthode des rosettes utilisées avec des jauges électriques. Dans le cas des jauges, nous parlons de déformation moyenne de la surface de mesure et nous la plaçons en son centre géométrique.

La figure 3.17 montre la position de la valeur de la déformation que nous pouvons choisir sur un quadruplet en se référant à la remarque précédente :



L'état de déformation
est connu au
barycentre des points
N, Q, A et B.

Figure 3.17 : Position théorique de la déformation.

Ce choix est raisonnable si nous avons un maillage à orientation unique et une taille de quadruplet de 4 mm. Pour augmenter le nombre de points dans le calcul, nous avons introduit quatre orientations de quadruplet sur la surface de l'éprouvette. Un problème se pose alors pour les points frontières comme le montre la figure 3.18.

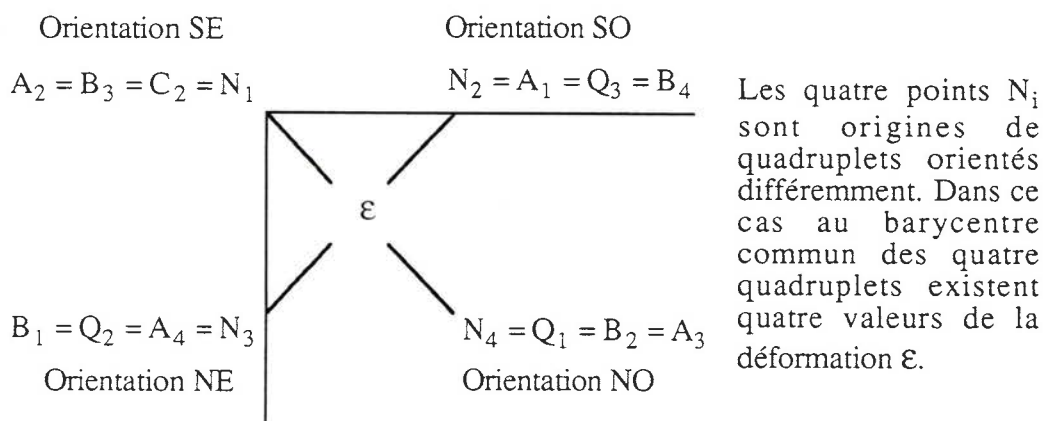


Figure 3.18 : Etat de déformation multiple en un point.

Devant cette situation nous placerons, sauf mention contraire, la valeur de la déformation aux points N_i , origines des quadruplets, de façon à avoir l'allure du champ de déformation sans se soucier de l'exactitude de la position des sites déformés. Chaque valeur de déformation est arrondie à la valeur entière la plus proche, si nécessaire.

3.5.5. Représentation d'un instant t .

Pour représenter l'instant de la mesure sur une éprouvette, nous marquons sur une courbe de l'humidité de l'éprouvette en fonction du temps, sa position et sa valeur exprimées en jours comme le montre la figure 3.19.

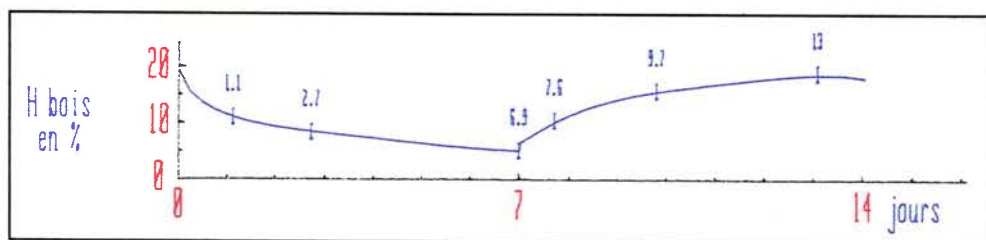


Figure 3.19 : Représentation de l'instant d'une mesure sur une courbe de l'humidité de l'éprouvette en fonction du temps.

3.5.6. Représentations des déplacements.

Le champ de déplacement, lié au repère, est matérialisé par un ensemble de flèches en couleur, issues chacune de la position initiale d'un point et dont les dimensions sont proportionnelles à l'intensité du déplacement. La figure 3.20 montre, sur la reconstitution d'une face d'éprouvette collée, la représentation du champ de déplacement, avec l'origine du repère de tracé au centre de la face. Le contour initial est en trait fort continu noir, le contour final en trait pointillé noir et le joint de colle en trait continu rouge.

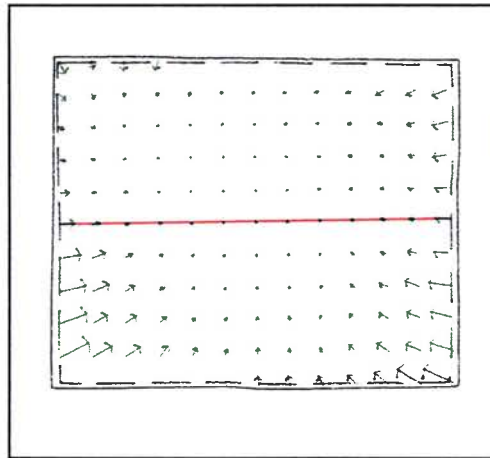


Figure 3.20 : Représentation du champ de déplacement sur une face d'éprouvette.

3 . 5 . 7 . Déformations sur une surface à un instant donné .

3 . 5 . 7 . 1 . Maillage .

Nous avons choisi d'avoir un nombre constant de points sur chaque ligne et dans chaque colonne. Un tri des points est effectué dans ce sens. Nous avons conçu un programme de recherche des quadruplets avec des orientations fixées qui permet le maillage à partir de tous les points retenus d'une surface. Ce programme ne requiert que la taille du quadruplet. Nous choisissons un sens particulier aux segments NA et NB de telle façon que NA soit de préférence dans la direction Ox et PB dans la direction Oy pour les orientations NE, NO, SO et SE retenues.

Les valeurs relevées par le programme de maillage ne sont pas les coordonnées des points au temps = 0 et qui changent par la suite, mais les indices de la coordonnée x de ces points dans le fichier contenant les valeurs successives de tous les couples (x,y) au cours du temps, généré par le programme de changement d'échelle et de repère.

3 . 5 . 7 . 2 . Représentation des déformations par polygones .

Nous utilisons deux représentations globales des valeurs des déformations par polygones colorés, sur la reconstitution de l'image de la face de l'éprouvette :

- les polygones sont centrés au barycentre initial des points des quadruplets, dans le cas de la recherche de l'influence des cernes qui sont représentés. le contour représenté est le contour initial et les cotes sont données (partie gauche de la figure 3.21),
- les polygones sont centrés en chaque point N origine de quadruplet avec cette fois le tracé du contour déformé et sans les cotes (partie droite de la figure 3.21).

Le joint de colle est comme précédemment représenté par un trait rouge continu.

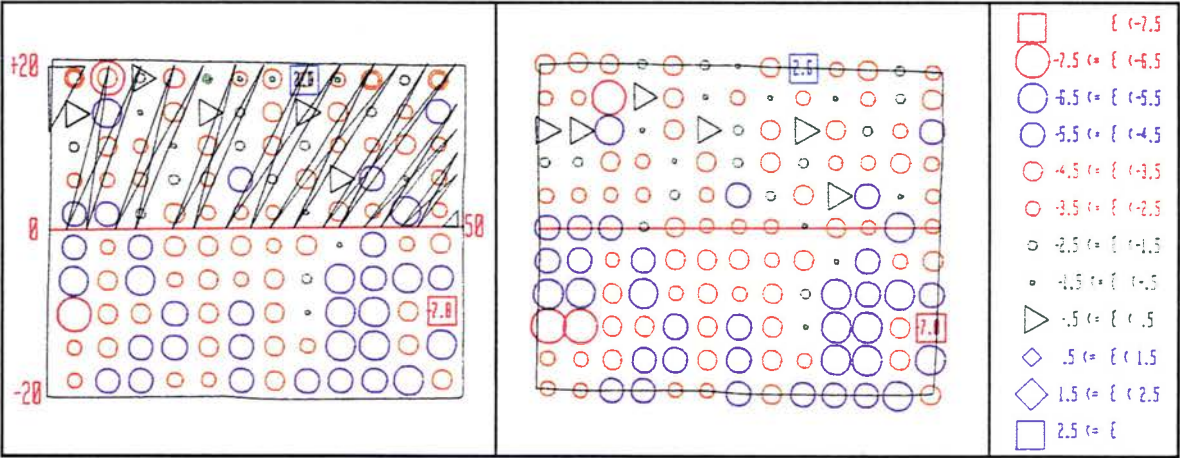


Figure 3.21 : Représentation des déformations sous forme de polygones colorés.

Les cercles représentent les valeurs négatives de déformation, correspondant à l'état de compression par rapport à l'état humide initial, les triangles noirs les valeurs nulles et les losanges les valeurs positives de tension. Le niveau de référence est établi en fonction des valeurs les plus fréquemment rencontrées et du nombre de couleurs, toute amplitude s'en écartant est représentée par un carré coloré entourant la valeur hors échelle. La valeur de la composante de la déformation en chacun des points utilisés est reportée. Dans la partie gauche de la figure, il y a deux polygones centrés sur chacun des points de la première ligne. C'est le problème évoqué au paragraphe 3 . 5 . 4. Pour la même face dans la partie droite de la figure les deux premières colonnes sont identiques, comme cela a été envisagé au paragraphe 3 . 5 . 3 . 3. Il s'agit dans cet exemple de la représentation des valeurs de ϵ_{xx} , calculées avec la taille de quadruplet 4 millimètres.

Pour comparer les champs de déformation entre une éprouvette collée et un assemblage similaire non collé, nous préférons la représentation des deux pièces disjointes (partie droite de la figure 3.22) à celle faisant coïncider leur axe Ox pour simuler le plan de collage (partie gauche de la figure 3.22).

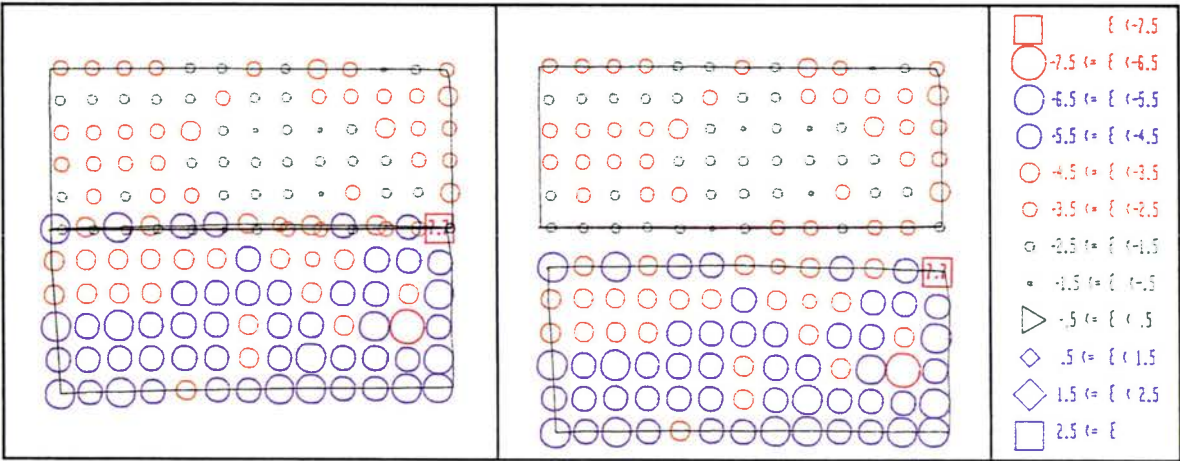


Figure 3.22: Représentations des déformations sous forme de polygones colorés sur un assemblage non collé.

Avec les orientations de quadruplets retenues pour une surface, les maillages des parties Douglas d'une éprouvette collée ou de l'assemblage non collé est équivalent. Par contre l'orientation NO des quadruplets dans la partie supérieure de la section de peuplier de l'assemblage collé est différente de celle SO de la section de l'éprouvette de peuplier non collée. La comparaison des valeurs des déformations dans cette zone n'est plus possible.

Il faut également remarquer qu'il n'y a pas coïncidence géométrique des maillages au plan de contact de ces éprouvettes non collées.

3 . 5 . 7 . 2 . Fréquences relatives des valeurs d'une composante .

Nous représentons sous la forme de la courbe de la figure 3.23, les fréquences relatives de toutes les valeurs calculées sur une surface.

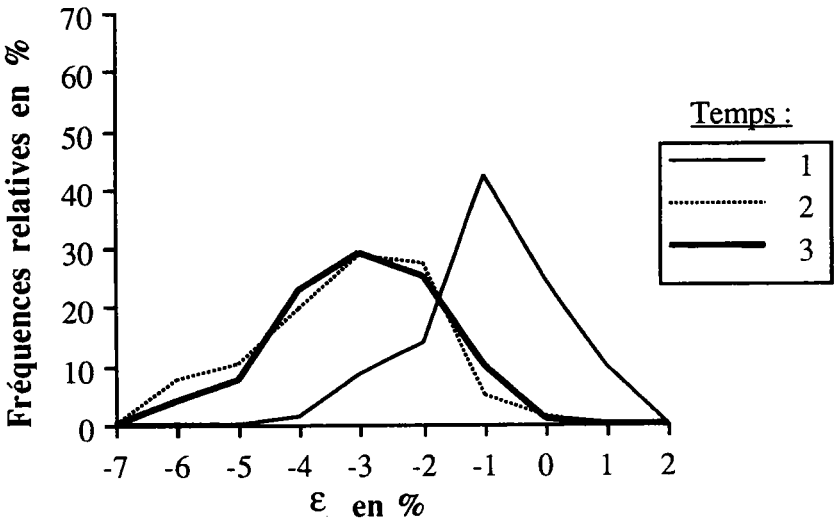


Figure 3.23 : Fréquences relatives des valeurs d'une composante sur une face d'éprouvette à un instant donné.

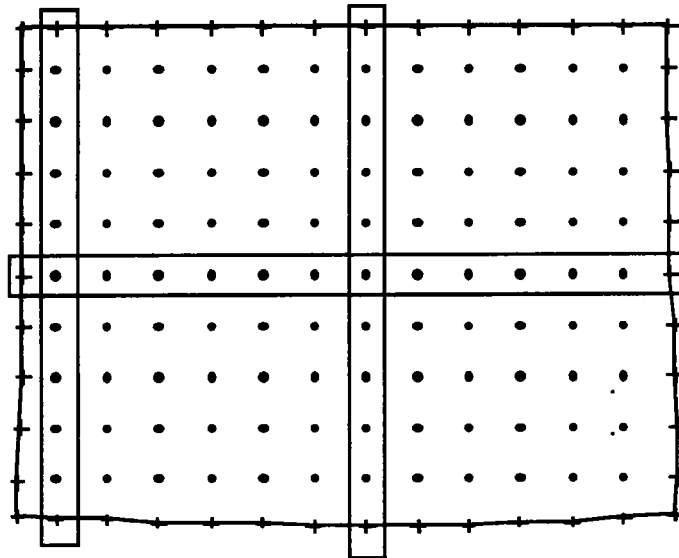
L'amplitude des abscisses est en rapport avec celle utilisée pour la représentation globale. L'ordonnée atteint soit 70 %, soit 100 %. Avec cette représentation, les valeurs des bandes identiques sont prises en compte deux fois.

3 . 5 . 8 . Déformations au cours du temps .

Le paragraphe précédent a présenté les opérations permettant d'établir l'état de déformation sur une surface complète à un instant donné et sa représentation. Pour étudier plus particulièrement le phénomène de fatigue, il faut maintenant représenter l'évolution du niveau de déformation au cours du temps. Les moyens informatiques ne nous permettent pas de se représenter l'évolution de tous les points d'une même surface au cours du temps. Il faut donc sélectionner d'abord les points intéressants et disponibles.

3 . 5 . 8 . 1 . Choix des points .

Avec les mêmes restrictions que précédemment eu égard à la frontière, aux points surnuméraires et aux possibilités de tailles et orientations des quadruplets, il est judicieux de s'intéresser à un ensemble de points alignés qui permettent de suivre le gradient local de déformation comme le montrent les exemples sur la figure 3.24.



Le nombre maximum de points utilisables est celui d'une ligne complète.

Figure 3.24 : Exemples de points alignés sur lesquels est effectué le calcul de la déformation au cours du temps.

Le programme de recherche des éléments du quadruplet est analogue à celui du programme concernant toute la surface.

3 . 5 . 8 . 2 . Représentation des déformations .

Les valeurs des déformations expérimentales en un point, ou leur valeur moyenne sur une face d'éprouvette et l'écart-type associé, sont reportés sur une courbe $y = f(t)$ comme le montre l'exemple de la figure 3.25. Les barres d'incertitude de chaque valeur ne sont pas reportées pour ne pas surcharger la représentation.

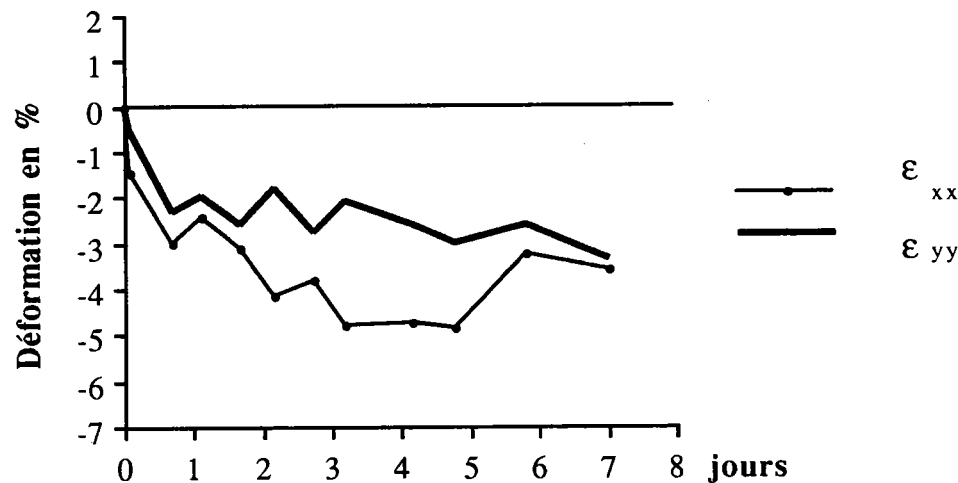


Figure 3.25 : Représentation des déformations expérimentales en un point en fonction du temps.

L'échelle de temps est fonction des variations étudiées.

3 . 5 . 9 . Variations de la déformation dans une direction au cours du temps .

En complément aux deux représentations précédentes, nous traçons la valeur de la déformation suivant une direction (voir les exemples de la figure 3.24), à 5 instants différents au maximum pour conserver la lisibilité de la courbe (voir la figure 3.26). Les nombres sur les courbes font référence à des points particuliers.

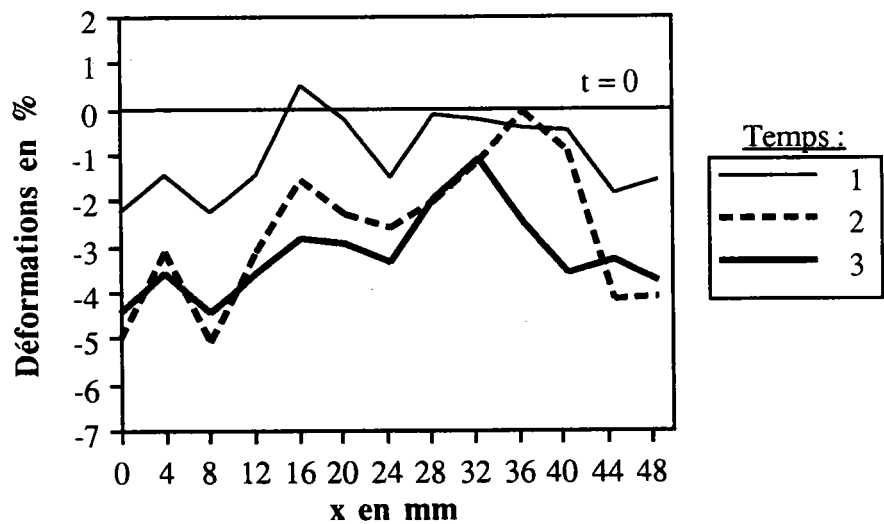


Figure 3.26 : Représentation de la variation de la déformation dans une direction au cours du temps.

3.6. Conclusions.

Connaissant la qualité des résultats auxquels nous souhaitons aboutir et la nature des données initiales, nous avons développé différents logiciels où l'exécution des tâches est commandée par table à digitaliser. Nous n'avons toutefois pas cherché à optimiser leur fonctionnement.

Toutes les images des faces d'éprouvettes ont été digitalisées suivant le même protocole. Les résultats des calculs ultérieurs sont comparables en faisant l'hypothèse que l'erreur commise à la saisie des données s'est répercutée de façon identique sur chaque mesure.

A l'issue de la digitalisation, les données se rapportant à une face d'éprouvette à un instant donné, constituant un fichier sur une disquette, ont été toutes regroupées en un seul fichier concernant cette face sur disque dur. Ce changement de support de données est nécessaire pour améliorer la cinétique de la lecture par les programmes de calcul et de représentation des résultats, qui lisent et utilisent uniquement les coordonnées des points.

Nous avons utilisé la théorie des déformations en connaissant les limites de son application. Les points enregistrés des surfaces sont regroupés par quatre et la valeur du changement de leur positions relatives quantifie l'état de déformation en chaque point de la surface discrétisée.

Les différentes représentations des valeurs permettent à la fois une localisation dans le temps et sur une surface de l'évolution des déformations.

CHAPITRE 4

Chapitre 4 . Résultats et analyse .

4 . 1 . Introduction .

Tous les paramètres intervenant dans le dépouillement ont été présentés au chapitre 3.

Nous commençons par l'examen des valeurs expérimentales de l'humidité de l'air et celles des différentes éprouvettes ainsi que leurs représentations simplifiées qui vont servir dans la présentation des résultats ultérieurement.

Le champ de déplacement fait l'objet du paragraphe suivant où l'aspect qualitatif du phénomène de séchage est montré.

L'influence de la taille du quadruplet (défini au chapitre 3 comme un ensemble de quatre points formant un quadrilatère sur lequel est calculé l'état de déformation) sur la valeur des déformations est ensuite abordée, ainsi que celle du collage.

Nous nous intéressons alors aux différents états de déformation caractéristiques :

- au cours du premier séchage,
- au cours de la première humidification,
- à la fin des séchages successifs,
- à la fin des humidifications successives.

Les représentations globales des valeurs des composantes du champ de déformation expérimental sur une face d'éprouvette sont principalement celles de l'éprouvette collée 01. Ces représentations sont associées aux courbes expérimentales des variations des valeurs des déformations en des points particuliers de cette face. Les comparaisons entre faces et entre éprouvettes sont effectuées à partir des valeurs moyennes des composantes du champ de déformation et de l'écart-type associé.

4 . 2 . Variations de l'humidité de l'air et du bois .

La figure 4.1 représente en haut les valeurs expérimentales de l'humidité de l'air, relevées comme il est décrit au chapitre 2, et en bas les valeurs expérimentales de l'humidité de l'éprouvette 01, déduites de la pesée.

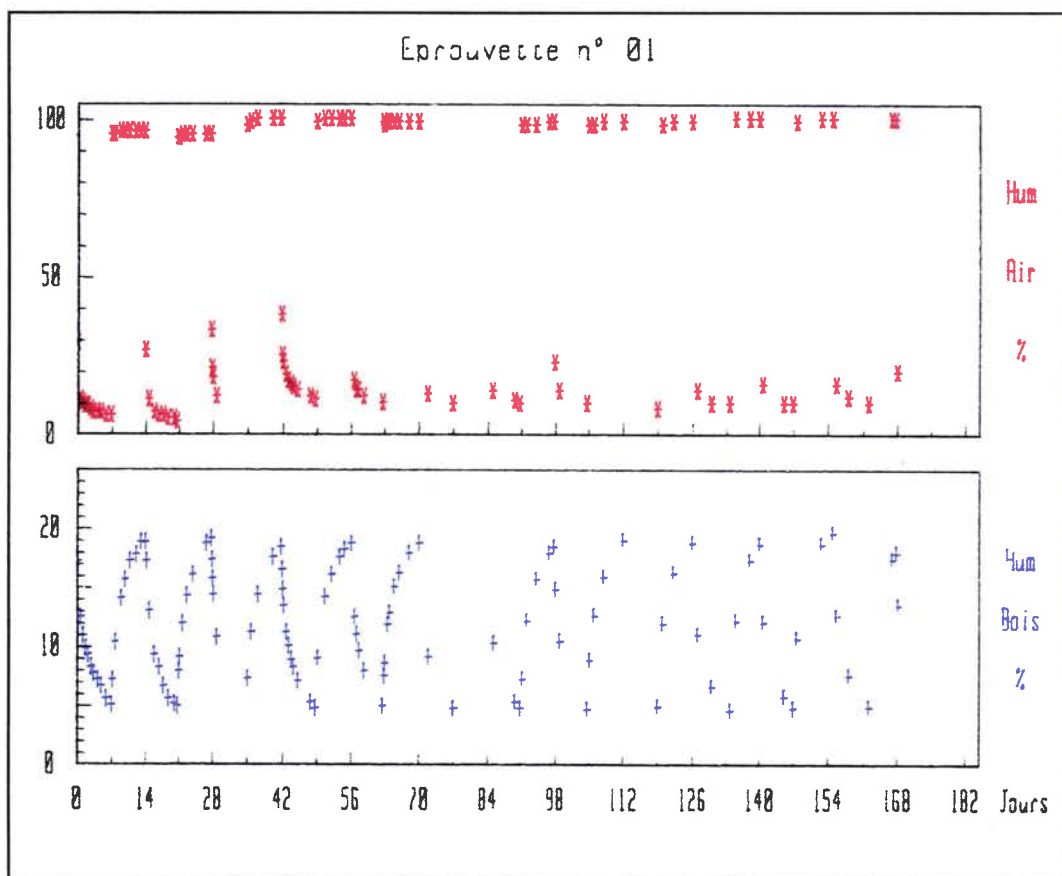


Figure 4.1 : Valeurs expérimentales de l'humidité de l'air et d'une éprouvette collée 01 en fonction du temps.

La partie supérieure de la figure 4.2 montre la représentation simplifiée des variations de l'humidité de l'air qui était souhaitée. Aux dixième et douzième cycles des incidents techniques ont perturbé la régularité des cycles. A ces moments les cycles réalisés (en rouge) s'écartent de ceux initialement prévus (en violet) de quelques heures pour toutes les éprouvettes.

La partie inférieure montre le lissage polynomial ($H = f(\sqrt{t})$) de l'humidité du bois en fonction du temps. Ce lissage correspond au report dans chaque cycle des deux courbes obtenues au premier cycle là où le nombre de points disponibles est suffisant. Nous n'avons pas modélisé à l'aide des équations de la diffusion de l'eau dans un matériau poreux en fonction du temps dans chaque cycle, le nombre de points étant insuffisant.

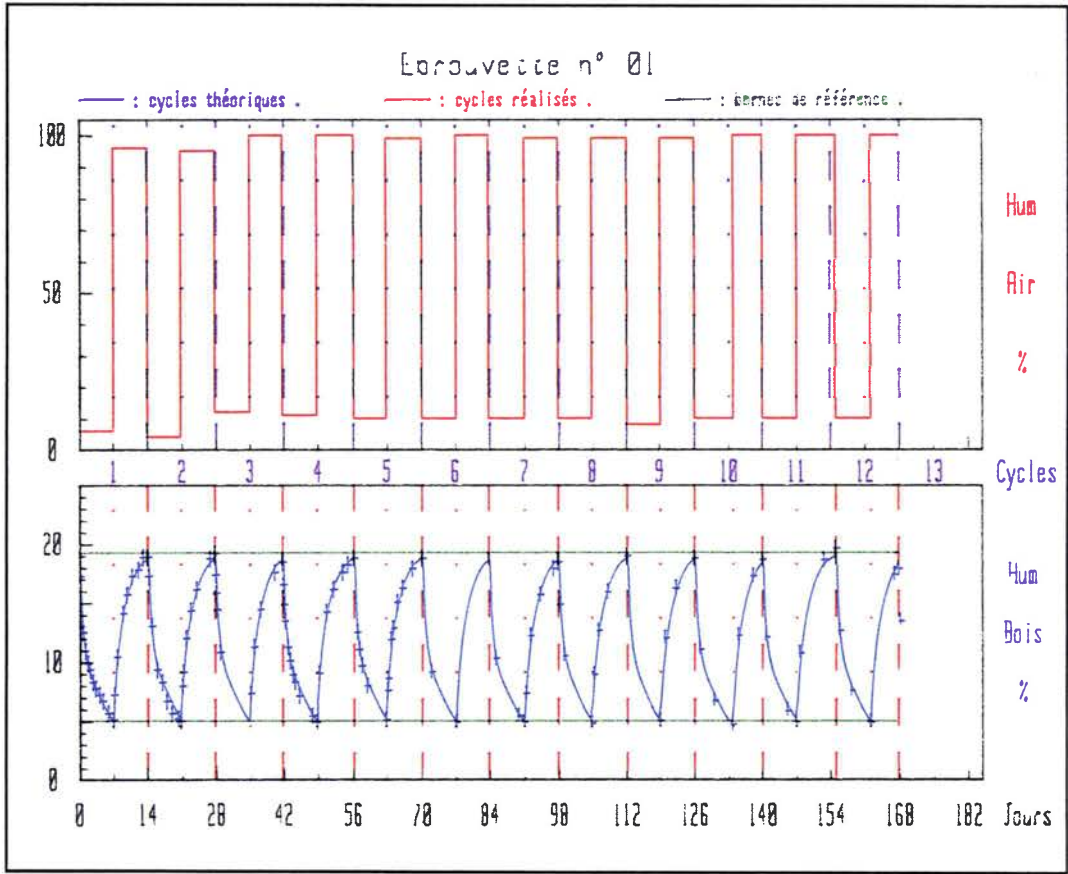


Figure 4.2 : Variations d'humidité de l'air et de l'éprouvette collée 01 en fonction du temps.

Le choix de cette modélisation simplifiée de l'humidité d'une éprouvette tient compte des remarques suivantes concernant quatre types de courbes :

- la courbe de la figure 4.3 montre qu'il y a peu de variation de la cinétique de la désorption d'eau au cours de cinq séchages consécutifs et au delà non représenté,

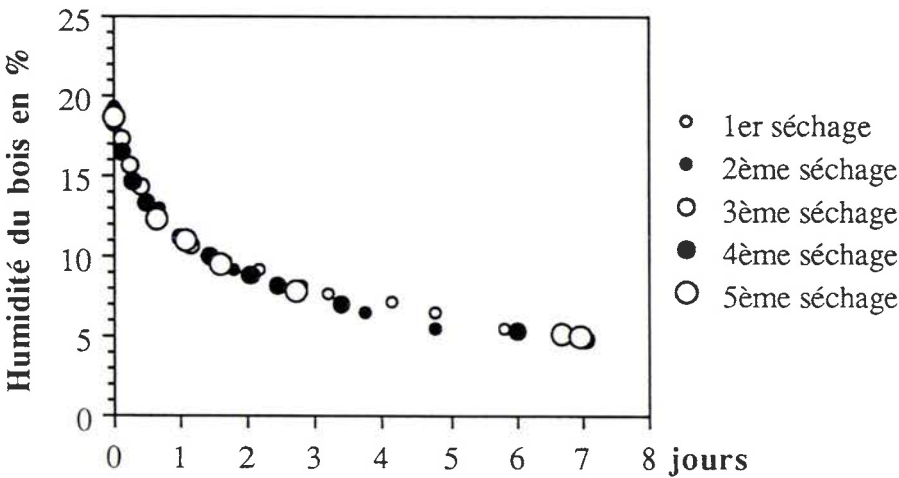


Figure 4.3 : Valeurs expérimentales de l'humidité de l'éprouvette collée 01 au cours de 5 séchages à origine de temps commune.

- la courbe de la figure 4.4 montre qu'il y a peu de variation de la cinétique de la désorption d'eau au cours du premier séchage entre les huit éprouvettes considérées,

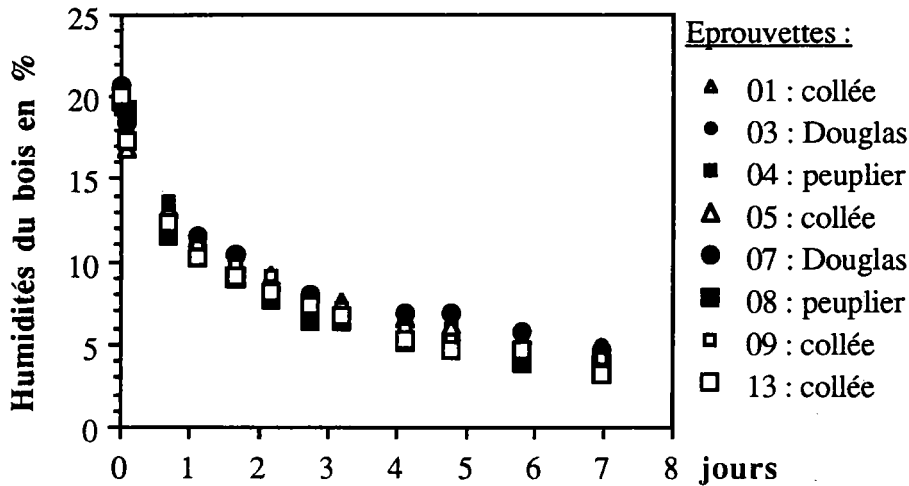


Figure 4.4 : Valeurs expérimentales de l'humidité de huit éprouvettes au cours du premier séchage.

- la courbe de la figure 4.5 montre qu'il y a peu de variation de la cinétique de l'adsorption d'eau au cours de quatre humidifications et au delà non représenté,

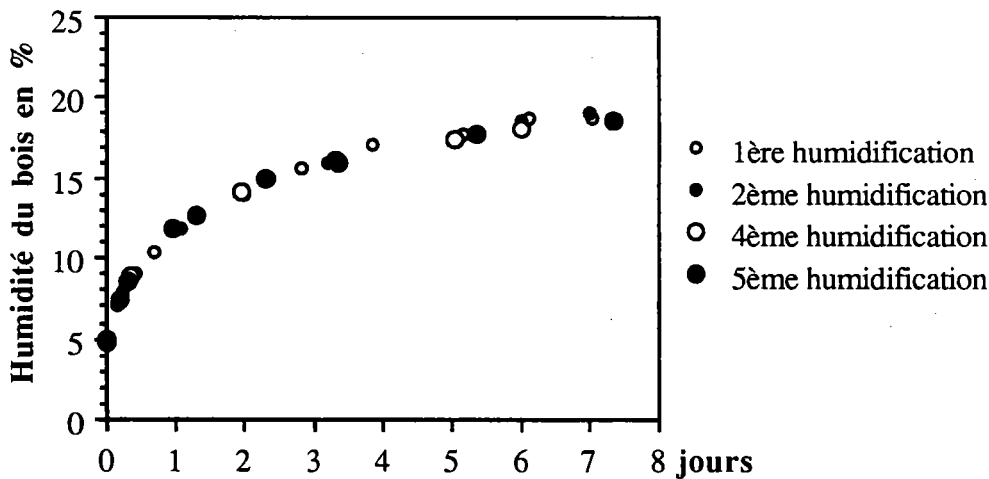


Figure 4.5 : Valeurs expérimentales de l'humidité de l'éprouvette collée 01 au cours de quatre humidifications à origine de temps commune.

- enfin, la courbe de la figure 4.6 montre qu'il y a peu de variation de la cinétique de l'adsorption d'eau au cours de la première humidification entre les huit éprouvettes considérées.

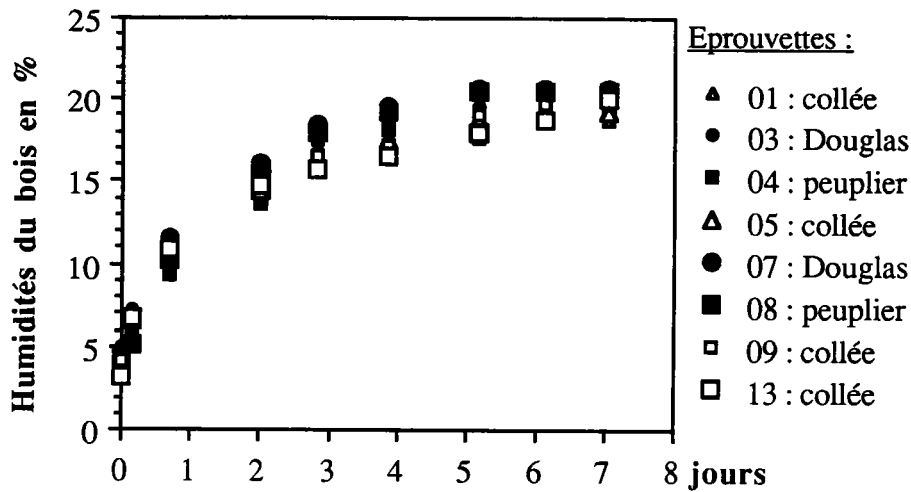


Figure 4.6 : Valeurs expérimentales de l'humidité de huit éprouvettes au cours de la première humidification.

L'apparition et la croissance de fissures débouchantes dans le matériau au fil des séchages provoquent l'augmentation des surfaces d'échange avec l'environnement. On peut déceler une variation de la cinétique de désorption à chaque fin de demi-cycle de séchage de sept jours sur des éprouvettes par rapport auxquelles les dimensions des fissures sont grandes. A cet instant, l'humidité des éprouvettes n'atteint environ que 80 % de la différence entre humidité maximale en atmosphère humide initiale et humidité minimale en atmosphère sèche comme le montre la figure 4.7.

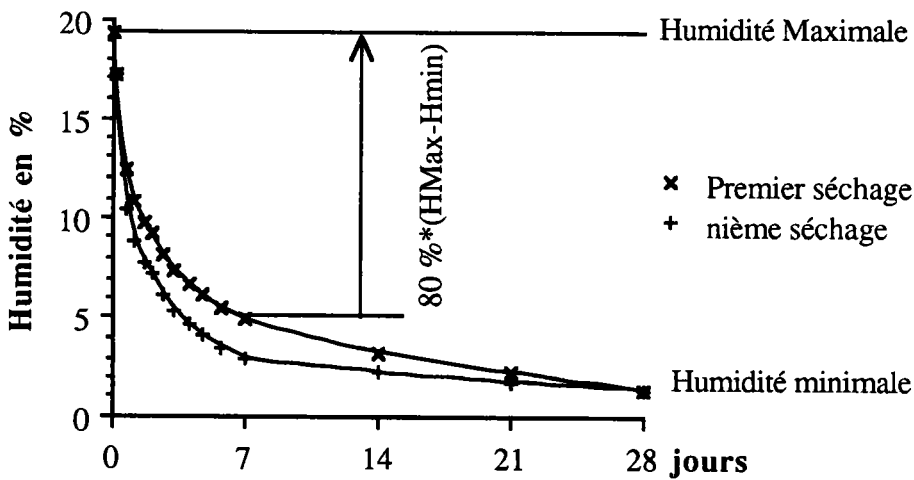


Figure 4.7 : Variations de l'humidité d'une éprouvette au cours de deux séchages, à origine de temps commune, avec variation de la cinétique de désorption.

Si la vitesse de désorption augmente de façon significative (cas représenté au nième séchage) au fil des cycles avec des conditions hygrothermiques constantes, cela traduira des modifications physiques du bois. Nous avons reporté sur la figure 4.8 les valeurs minimales successives de l'humidité de huit éprouvettes en fin de séchages de durée sept jours et sur la figure 4.9 les valeurs maximales correspondant aux humidifications.

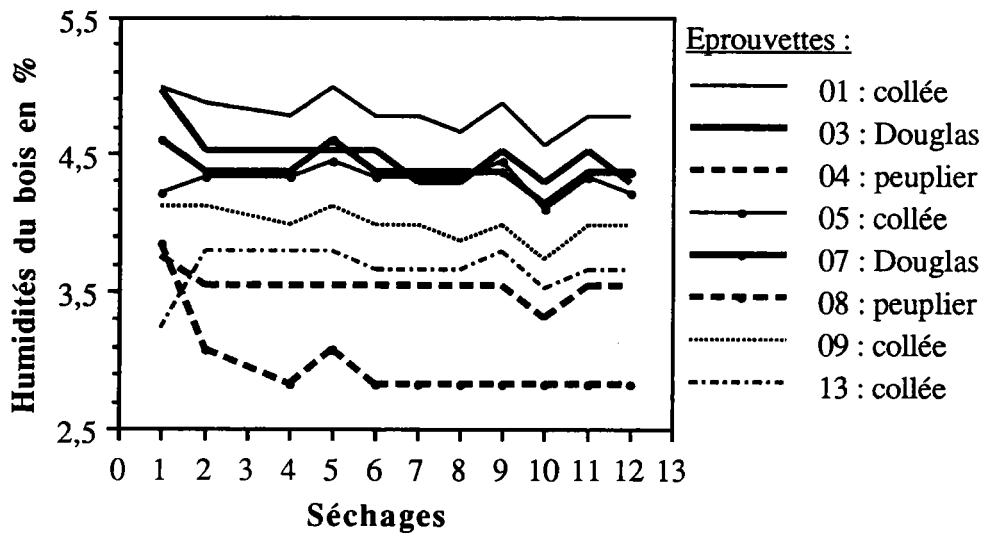


Figure 4.8 : Valeurs des humidités des éprouvettes en fin de séchage .

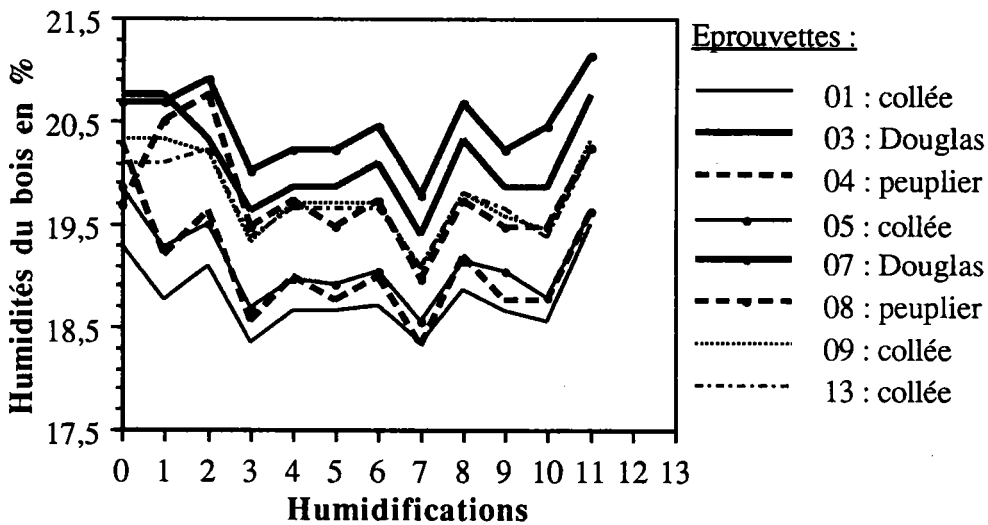


Figure 4.9 : Valeurs des humidités des éprouvettes en fin d'humidification .

On peut déceler une diminution des valeurs finales des humidités du bois au cours des trois premiers séchages et des trois premières humidifications puis une stabilisation. Si on se reporte à la figure 4.2, on constate qu'il aurait dû se produire une augmentation avant stabilisation de ces valeurs à partir du troisième cycle, d'une part en fin de séchages puisque l'air obtenu était moins sec, et d'autre part en fin d'humidifications avec l'augmentation de l'humidité maximale de l'air.

Sachant que l'humidité de l'air est connue à $\pm 5\%$ et que les amplitudes de variation des humidités des éprouvettes sont de l'ordre de 1% , on peut dire qu'il n'y a pas d'évolution significative. Ceci corrobore la constatation de l'absence de fissures, voire d'entailles, très importantes et permanentes sur les éprouvettes. Cependant la variation de la cinétique du transfert d'eau par les surfaces d'échange avec l'air peut ne pas être aussi grande qu'on l'espère et la détection de l'apparition de grandes fissurations n'est pas possible par ce moyen simple. La dernière humidification à laquelle correspondent les dernières valeurs des courbes de la figure 4.9 ne sera pas prise en compte, sa durée ayant excédé sept jours.

- Sur ces mêmes courbes, il y a concordance des valeurs des humidités entre :
- les éprouvettes 01 et 05 qui sont les moins humides,
 - les éprouvettes de Douglas 03 et 07 qui sont les plus humides,
 - les éprouvettes de peuplier 04 et 08 qui sont les plus sèches,
 - les éprouvettes 09 et 13.

Le tableau 4.1 rappelle les densités des différentes pièces en présence et leur humidité moyenne de fin de séchage et de fin d'humidification (l'écart-type des valeurs de l'état humide est plus important que celui des valeurs de l'état sec) ; le diagramme de la figure 4.10, où sont reportées les valeurs de ces humidités en fonction de la densité moyenne, ne fait pas apparaître de corrélation significative entre ces valeurs.

Eprouvette		01	03	04	05	07	08	09	13
		Collée	Douglas	peuplier	Collée	Douglas	peuplier	Collée	Collée
Humidité en % Etat sec	moyenne	4,80	4,46	3,53	4,31	4,38	2,96	3,99	3,65
	écart type	0,13	0,20	0,10	0,10	0,12	0,31	0,11	0,17
Humidité en % Etat humide	moyenne	18,79	20,12	19,09	19,11	20,45	19,78	19,79	19,74
	écart type	0,36	0,46	0,55	0,40	0,39	0,50	0,42	0,36
Densité Douglas		0,519	0,502	XXXX XXXX	0,502	0,502	XXXX XXXX	0,410	0,412
Densité peuplier		0,519	XXXX XXXX	0,519	0,402	XXXX XXXX	0,402	0,512	0,402
Densité moyenne		0,519	0,502	0,519	0,452	0,502	0,402	0,461	0,407

Tableau 4.1 : Densités initiales et humidités moyennes à l'état sec et à l'état humide des éprouvettes.

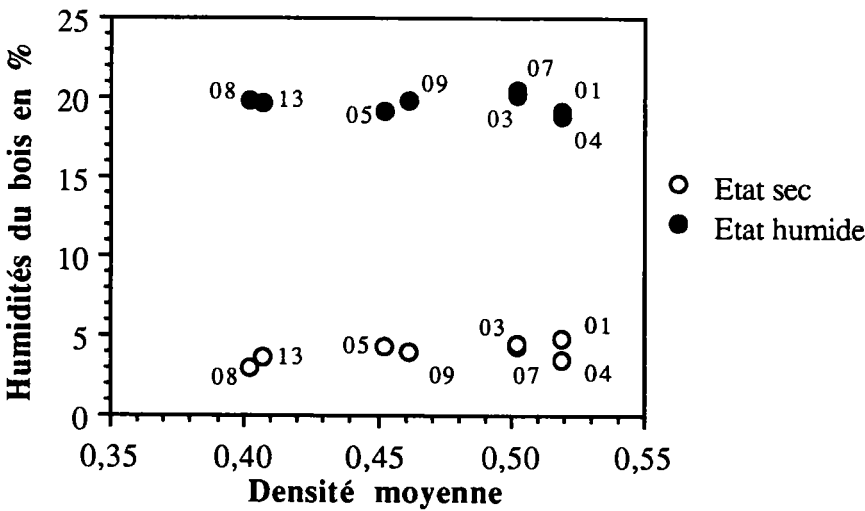


Figure 4.10 : Humidités moyennes en fin de séchage et d'humidification en fonction de la densité moyenne des éprouvettes.

4.3. Champs de déplacements.

Les tableaux 4.2 et 4.3 montrent l'évolution du champ de déplacement au cours du premier séchage sur la face Gauche de l'éprouvette 01. L'origine du repère d'expression des valeurs des composantes des vecteurs de déplacement est le barycentre des points expérimentaux, qui correspond au centre de la face.

En des points symétriques de part et d'autre du joint de colle, l'amplitude des déplacements dans le peuplier (partie inférieure de la face) est plus importante que celle dans le Douglas. Cette différence correspond à la juxtaposition de la pièce de Douglas débitée sur quartier avec celle de peuplier débitée sur dosse, sur laquelle apparaît le tuilage signalé au paragraphe 2.6.

Les déplacements sont symétriques par rapport à la médiane verticale.

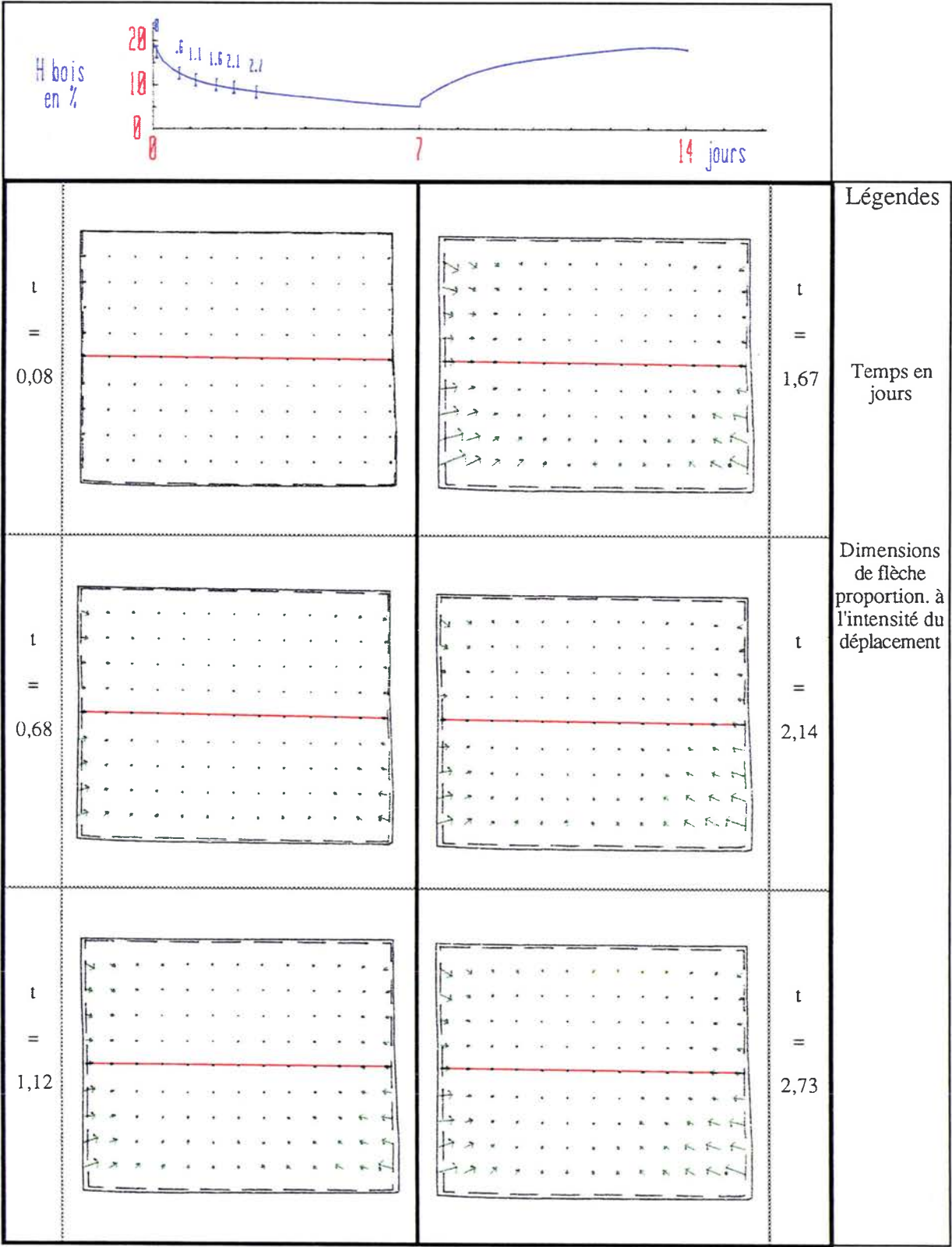


Tableau 4.2 : Représentation du champ de déplacement centré sur la face gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des six premières mesures au premier séchage.

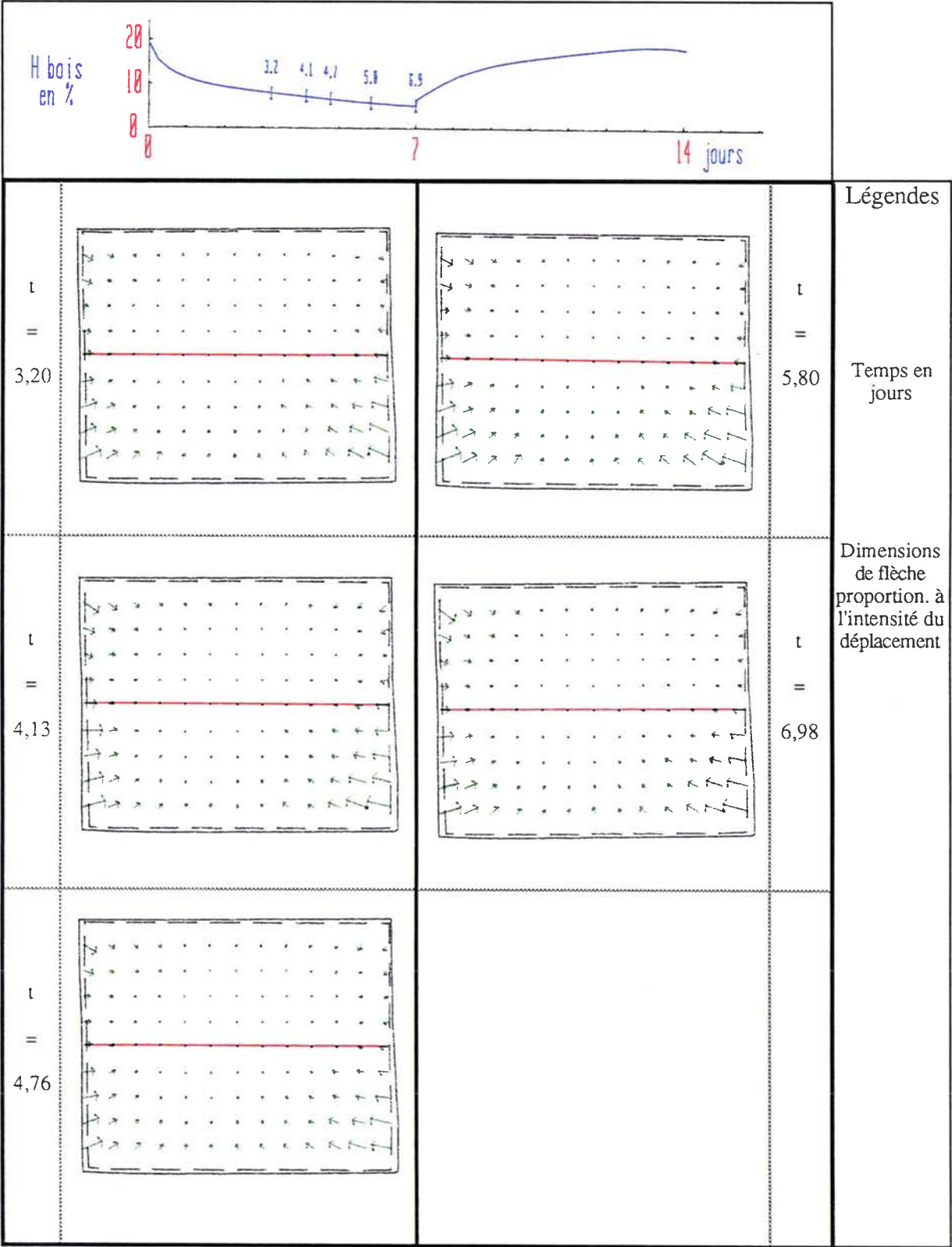


Tableau 4.3 : Représentation du champ de déplacement centré sur la face gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des cinq dernières mesures au premier séchage.

4.4. Influence de la taille des quadruplets et du collage.

Dans les tableaux 4.4, 4.5 et 4.6 nous avons juxtaposé les représentations globales des composantes du champ de déformation de la face Gauche de l'éprouvette collée 01 et de la reconstitution d'un assemblage analogue non collé (face Gauche de l'éprouvette de Douglas 03 et face Gauche de l'éprouvette de peuplier 04) en fonction de la taille de quadruplet, à la fin du premier séchage.

Le tableau 4.4 présente la composante ϵ_{xx} du champ de déformation (rappelons qu'elle est placée au point origine de chaque quadruplet). Nous remarquons :

- la continuité de la déformation au passage du joint de colle,
- l'influence du collage qui se traduit par une diminution de l'amplitude des déformations côté peuplier à l'approche du joint de colle : la déformation du Douglas n'est pas modifiée par contre celle du peuplier semble limitée lorsqu'on compare le peuplier non collé de l'éprouvette 04 à celui collé de l'éprouvette 01,
- la déformation ϵ_{xx} du Douglas qui correspond au retrait radial est inférieure à celle du peuplier traduisant le retrait tangentiel.

Avec la taille de quadruplet 4 millimètres, des zones en tension cotoient des zones en compression dans la partie en Douglas de l'éprouvette collée. Ce phénomène disparaît aux tailles supérieures qui donnent des valeurs plus homogènes de déformation. La représentation de la fréquence relative des valeurs de ϵ_{xx} sur la face Gauche de l'éprouvette 01 montre cette évolution.

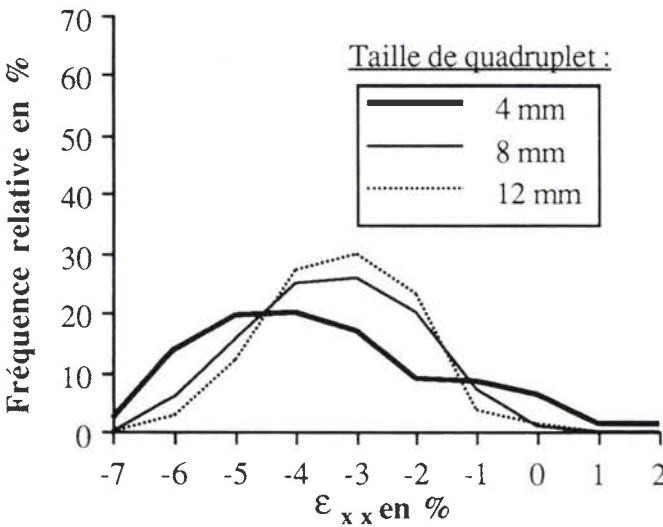
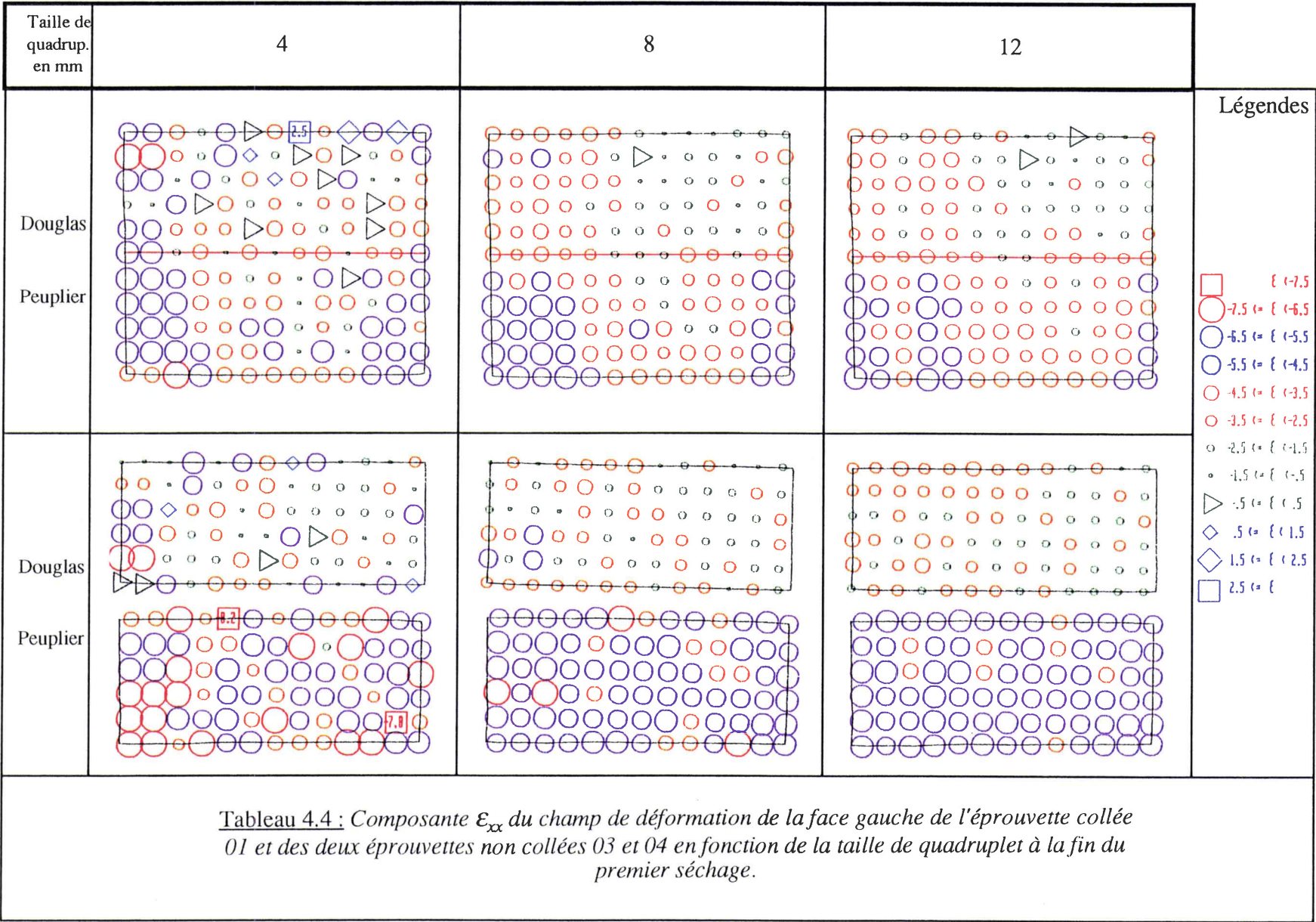


Figure 4.11 : Fréquences relatives des valeurs de ϵ_{xx} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 à la fin du premier séchage en fonction de la taille du quadruplet.

On peut noter également que les courbes correspondant aux tailles 8 et 12 millimètres sont presque égales. Si nous observons les histogrammes de la figure 4.12, nous voyons que la valeur moyenne de la déformation sur la face Gauche de trois éprouvettes diminuent faiblement, alors que l'écart-type associé décroît fortement de 4 à 8 millimètres et moins ensuite. Il en est de même pour toutes les éprouvettes.



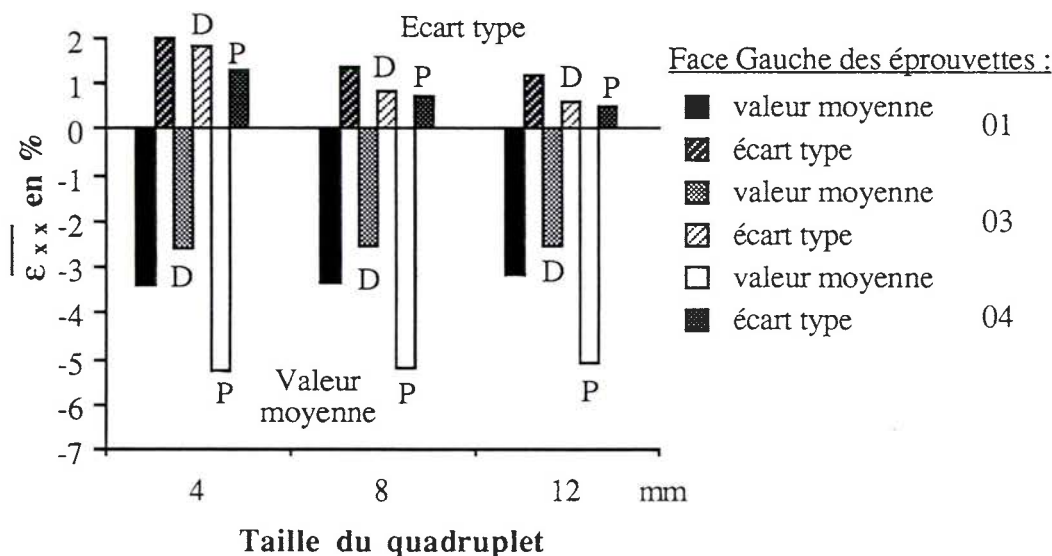


Figure 4.12 : Valeur moyenne de la composante ϵ_{xx} et de l'écart-type associé sur la face Gauche des éprouvettes 01, 03 et 04, à la fin du premier séchage en fonction de la taille de quadruplet.

Lorsque la plus petite taille est choisie, les calculs peuvent être effectués à l'échelle d'un cerne et les discontinuités relevées peuvent traduire l'alternance du bois de printemps et du bois d'été. Toutefois l'introduction (voir la figure 4.13) de la position des cernes (les traits noirs croisés se rapportent au bois d'été) sur les faces Gauche et Droite de cette même éprouvette 01 à la fin du premier séchage ne montre pas de relation. La valeur de la déformation ϵ_{xx} est placée au barycentre des quadruplets, ce qui provoque la superposition de certaines valeurs au bord de l'éprouvette, mentionnée au paragraphe 3 . 5 . 4. La distinction des cernes du peuplier, parallèles au joint de colle, est très difficile et ils ne sont donc pas représentés.

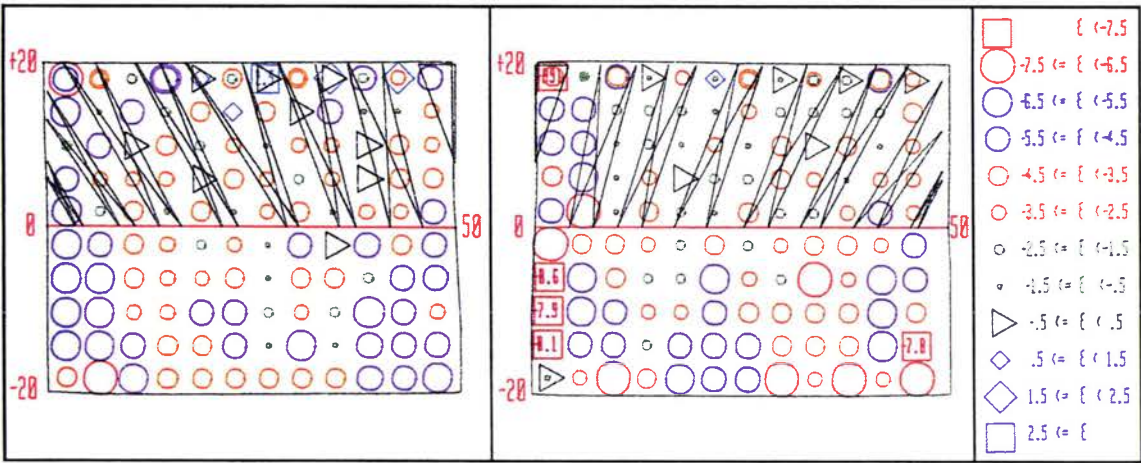
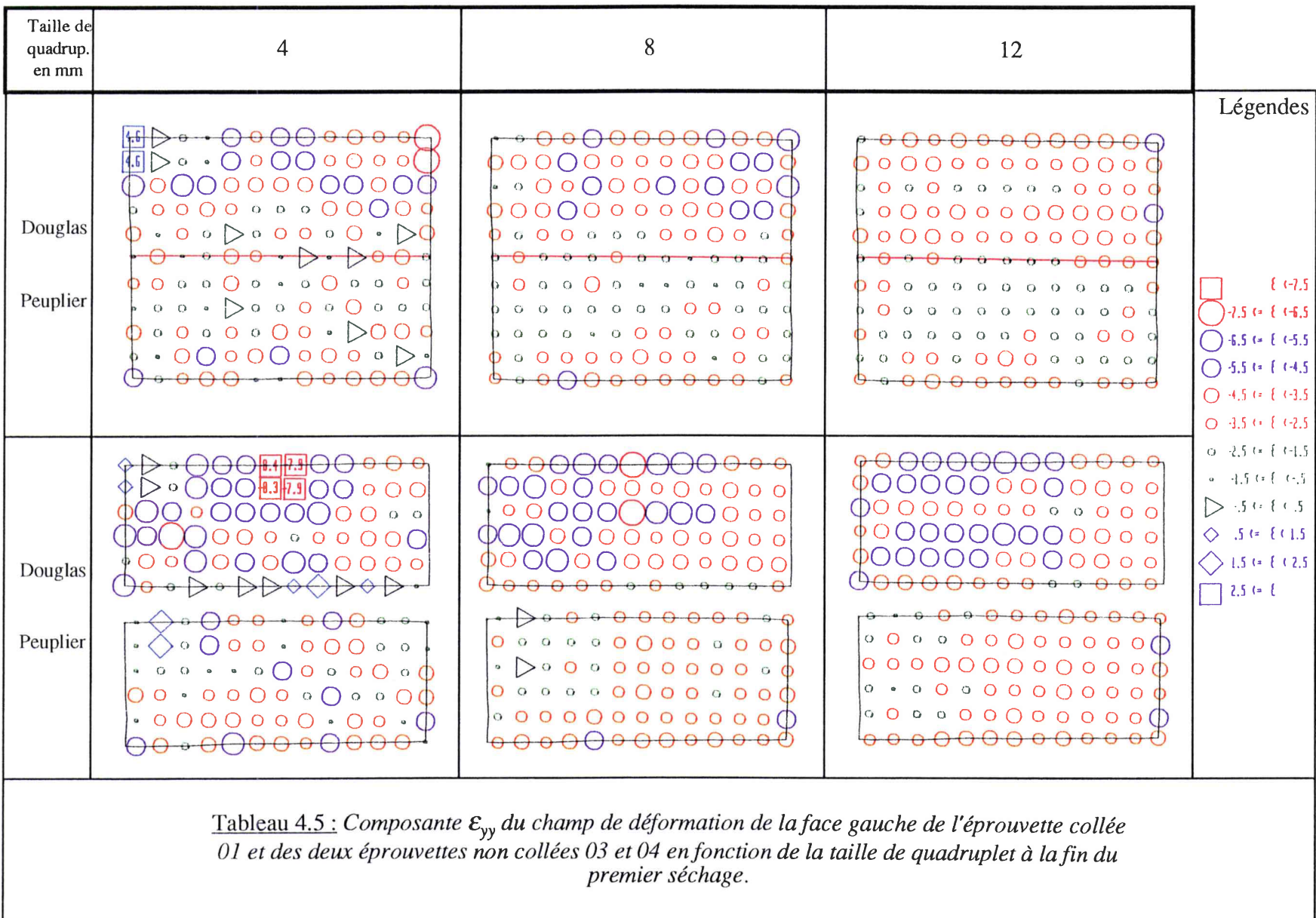


Figure 4.13 : Champ de déformation ϵ_{xx} sur les deux faces de l'éprouvette collée 01 à la fin du premier séchage avec une taille de quadruplet de 4 millimètres et la représentation de la position des cernes dans le Douglas.



La représentation de la déformation ϵ_{yy} sur les mêmes faces confirme la remarque précédente (voir la figure 4.14). Il faut se rappeler que la valeur des composantes de la déformation dépend de l'orientation adoptée, ce qui implique pour notre cas que les valeurs particulières des déformations sur le joint de colle sont calculées à partir des coordonnées des points situés sur le joint de colle et dans le Douglas.

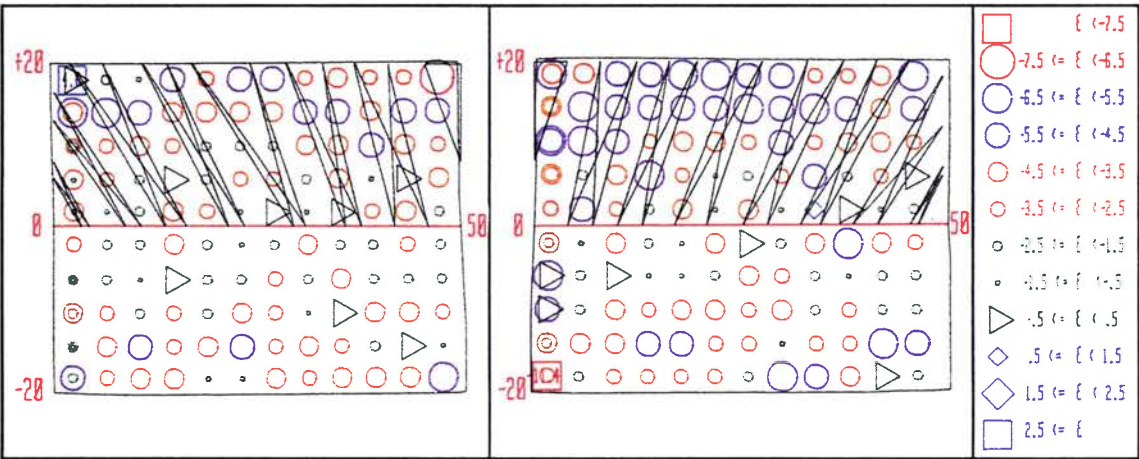


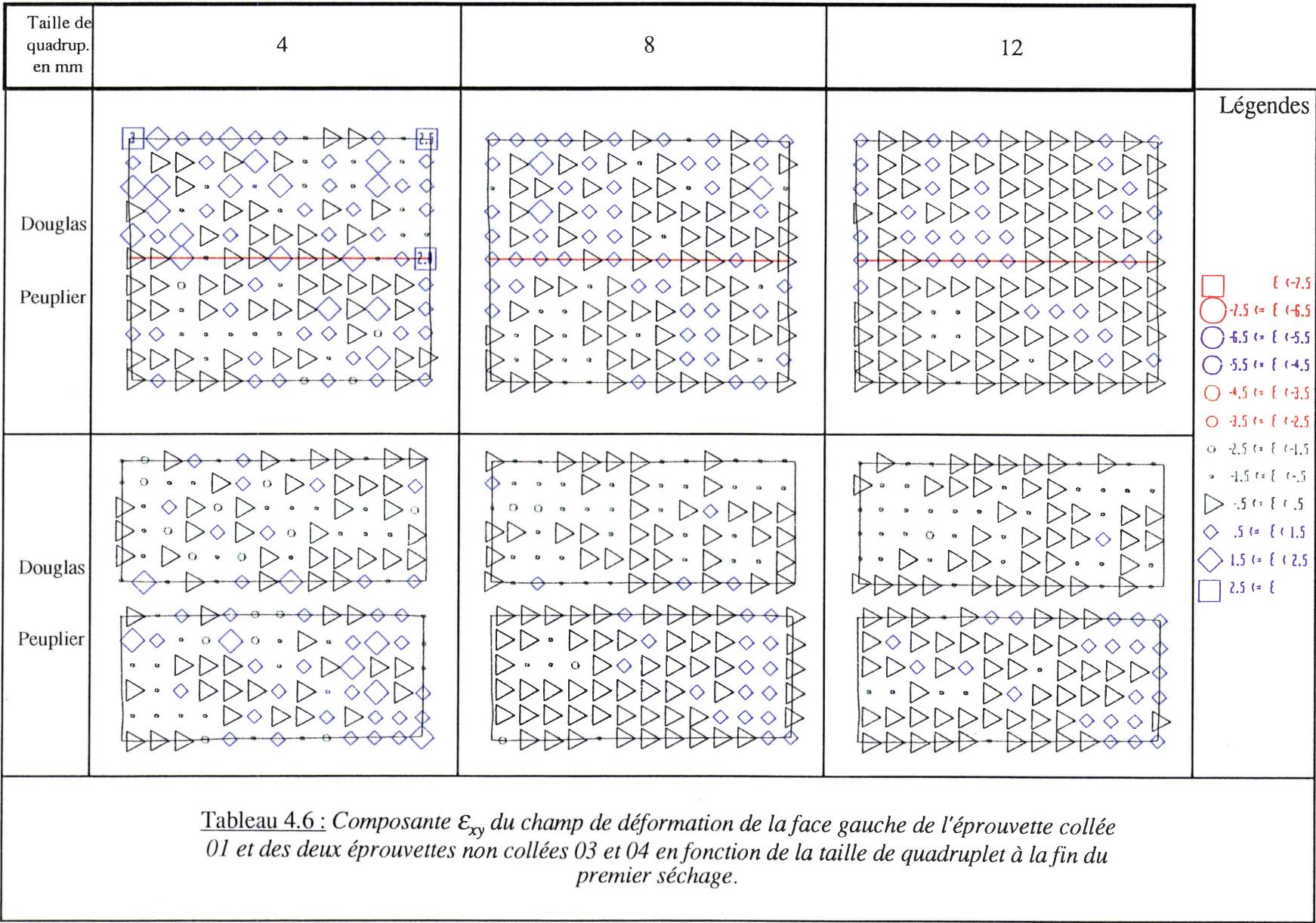
Figure 4.14 : Champ de déformation ϵ_{yy} sur les deux faces de l'éprouvette collée 01 à la fin du premier séchage avec une taille de quadruplet de 4 millimètres et la représentation de la position des cernes dans le Douglas.

Dans le tableau 4.5 l'homogénéisation des déformations ϵ_{yy} et la réduction des amplitudes avec l'augmentation de la taille de quadruplet sont également constatées.

Des remarques analogues à celles concernant le tableau 4.4 peuvent être faites :

- continuité de la déformation au passage du joint de colle,
- influence du collage avec cette fois diminution de l'amplitude des déformations ϵ_{yy} coté Douglas à l'approche de joint de colle lorsqu'on compare le Douglas non collé de l'éprouvette 03 au Douglas collé de l'éprouvette 01,
- la déformation ϵ_{yy} du Douglas qui correspond au retrait tangentiel est supérieure à celle du peuplier traduisant le retrait radial,
- apparition de l'influence du film de protection en silicone sur la face inférieure de l'éprouvette non collée de Douglas (rappelons que ce film recouvre également la face supérieure des éprouvettes non collées de peuplier).

Enfin le tableau 4.6 représente la composante de cisaillement ϵ_{xy} . Il y est beaucoup plus difficile de retirer des enseignements des résultats obtenus. Les amplitudes se situent entre -2 et +2 % mais on ne distingue pas clairement l'influence de la taille du quadruplet et du collage. La figure 4.15 nous montre que la valeur de cette composante est faible comparée aux deux autres, quelque soit la taille de quadruplet. Néanmoins nous pouvons voir qu'au cours du premier séchage en un point particulier d'une face éprouvette, la dispersion des valeurs est beaucoup plus importante avec la plus petite taille. La méthode de dépouillement utilisée n'est pas assez précise pour l'étude de cette composante, aussi n'est elle que peu mentionnée.



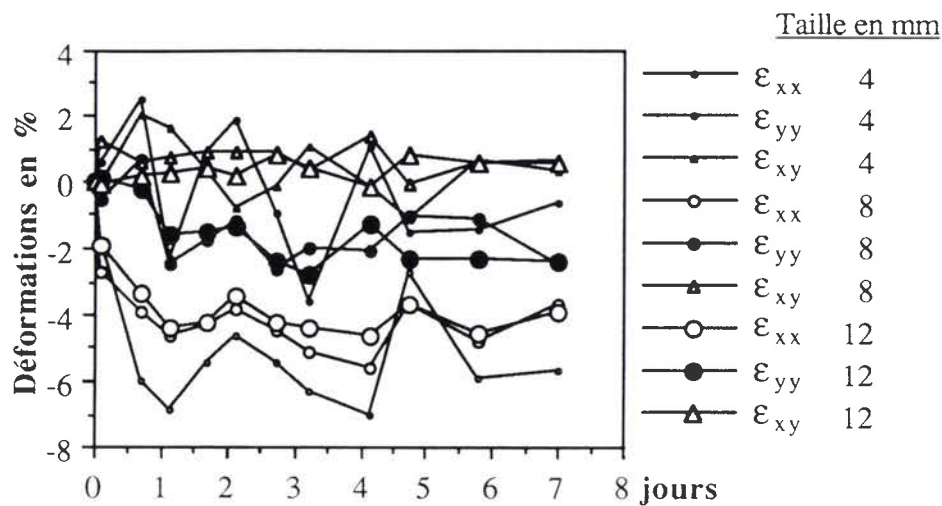


Figure 4.15 : Variations en fonction du temps des composantes du champ de déformation au cours du premier séchage au point origine du repère, sur le joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette collée 01, suivant la taille de quadruplet.

Les remarques précédentes restent valables si nous nous intéressons cette fois à la valeur moyenne des composantes sur la face et à leur écart-type sur l'histogramme de la figure 4.16. Toutes les valeurs moyennes diminuent peu, contrairement aux écart-types.

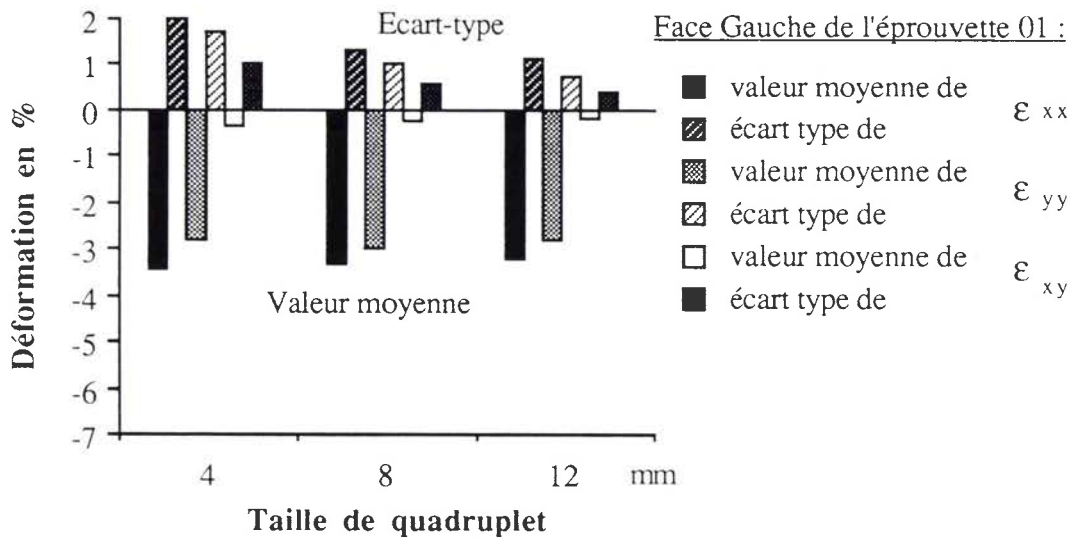


Figure 4.16 : Valeurs moyennes des composantes de la déformation et écart-type associés, sur la face Gauche de l'éprouvette 01 à la fin du premier séchage, en fonction de la taille de quadruplet.

Nous choisissons par la suite sauf mention contraire d'effectuer les calculs avec des quadruplets de taille 8 millimètres.

Pour les représentations globales des composantes du tenseur des déformations, comme cela a été décrit au paragraphe 3 . 5 . 3 . 3 :

- les déformations ϵ_{xx} des première et troisième colonnes et celles des deuxième et quatrième colonnes sont en général identiques, les différences proviennent principalement de l'arrondi pratiqué sur les valeurs,
- les déformations ϵ_{yy} des première et troisième lignes et celles des deuxième et quatrième lignes également.

4 . 5 . Variabilité longitudinale .

- Dans le tableau 4.7 sont comparées toujours en se plaçant à la fin du premier séchage :
- les composantes ϵ_{xx} de la face Gauche de l'éprouvette collée 01 à celles de la face Droite,
 - les composantes ϵ_{yy} de la face Gauche de l'éprouvette collée 09 à celles de la face Droite,
 - les composantes ϵ_{xx} de la face Gauche des éprouvettes non collées 07 en Douglas et 08 en peuplier à celles de leur face Droite.

Sur une même éprouvette les champs de déformation de deux faces parallèles, supposées identiques et séparées de 100 millimètres, sont semblables. Cependant on ne trouve ni symétrie, ni antisymétrie de la répartition des valeurs, en accolant les images des deux faces par rapport à leur ligne de contact. Il y a conservation des amplitudes de déformation, à savoir qu'on retrouve sensiblement le même nombre de points à déformation donnée sur les deux faces, ce que montre la figure 4.17 où sont représentées les fréquences relatives des valeurs de la composante ϵ_{xx} sur l'éprouvette 01.

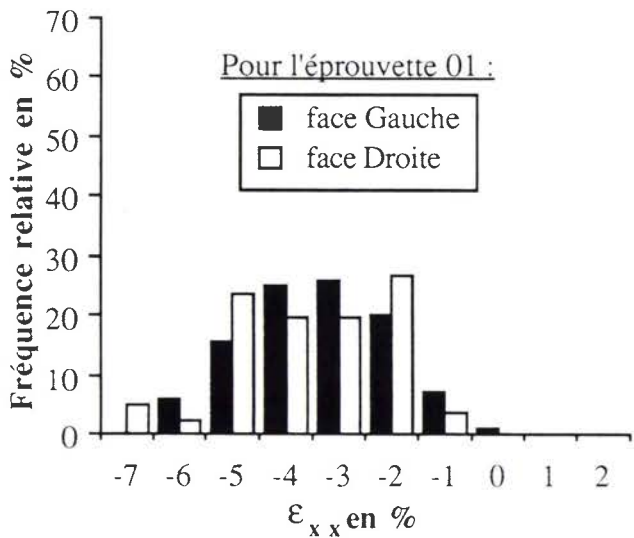


Figure 4.17 : *Fréquences relatives des valeurs de ϵ_{xx} sur la face Gauche et la face Droite de l'éprouvette collée 01, à la fin du premier séchage.*

La figure 4.18 montre par ailleurs que la valeur moyenne des composantes considérées dans le tableau 4.7 sont équivalentes sur les deux faces d'une même éprouvette, l'écart-type est plus variable.

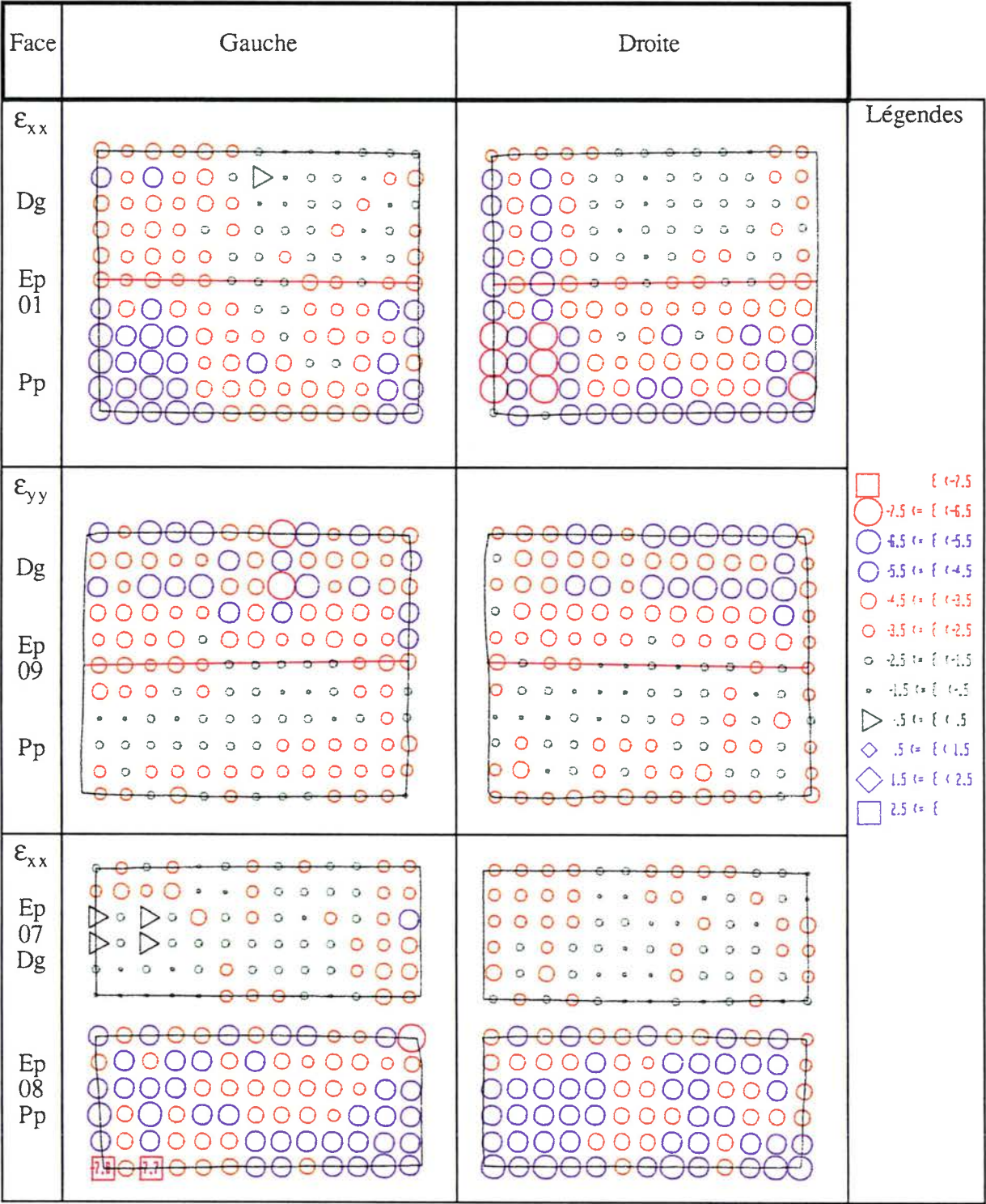


Tableau 4.7 : Variabilité du champ de déformation entre la face gauche et la face droite d'une même éprouvette à la fin du premier séchage.

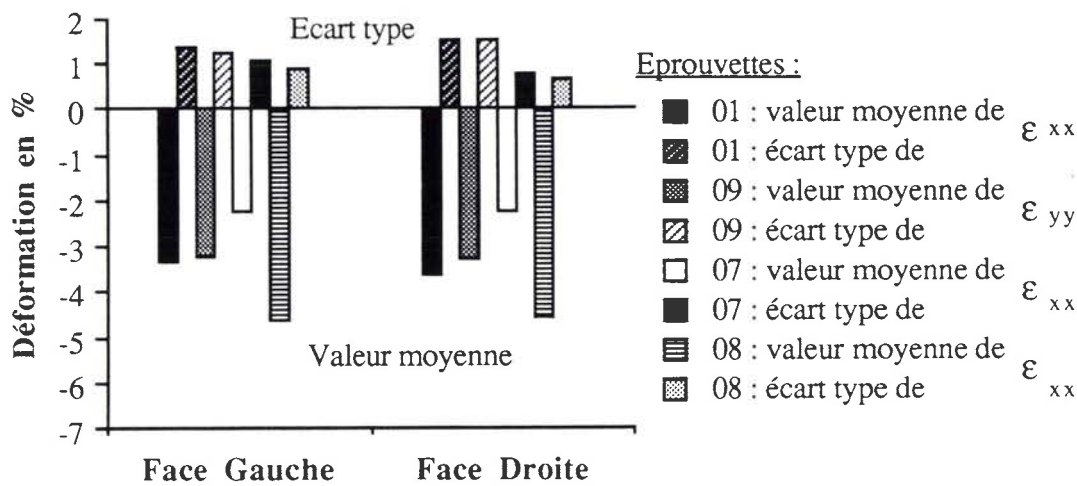


Figure 4.18 : Valeurs moyennes et écart-types de composantes de la déformation sur les deux faces des éprouvettes 01, 07, 08 et 09 à la fin du premier séchage.

On peut considérer que la variabilité longitudinale des déformations est faible et obtenir ainsi deux séries de mesures comparables d'un même phénomène de déformation.

4.6. Variabilité entre éprouvettes.

L'observation des champs de déformation ϵ_{xx} , à la fin du premier séchage, des faces Gauches des éprouvettes collées du tableau 4.9 et celles des éprouvettes non collées du tableau 4.10 montre quelques différences que nous pouvons relier à la densité du bois. A cet effet nous utilisons le tableau 4.8 présentant les densités des pièces des assemblages et la figure 4.19, où la valeur moyenne de la déformation de la face Gauche de chaque éprouvette et l'écart-type associé sont fournis.

N° Epreuve	ρ_{Douglas}	ρ_{peuplier}	ρ_{moyen}
01	0,519	0,519	0,519
05	0,502	0,402	0,452
09	0,410	0,512	0,461
10	0,410	0,512	0,461
13	0,412	0,402	0,407
20	0,412	0,402	0,407
03	0,502	XXXXXXXXXX	0,502
04	XXXXXXXXXX	0,519	0,519
07	0,502	XXXXXXXXXX	0,502
08	XXXXXXXXXX	0,402	0,402

Tableau 4.8 : Relevé des densités moyennes du bois des éléments constituant les éprouvettes.

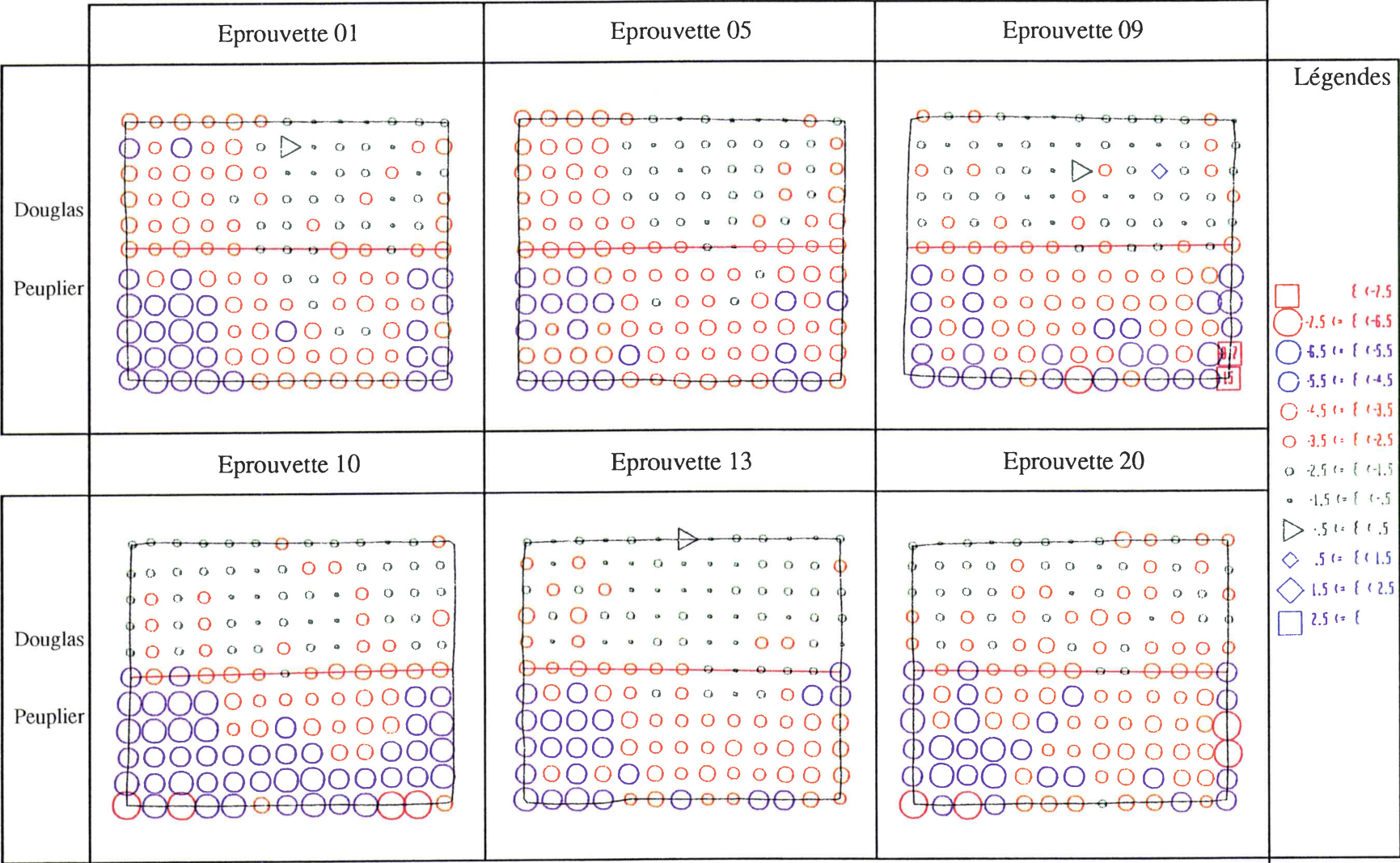


Tableau 4.9 : Composante ϵ_{xx} du champ de déformation des faces gauches des éprouvettes collées 01, 05, 09, 10, 13 et 20 à la fin du premier séchage.

Nous voyons d'après le tableau 4.9 que les déformations de la partie Douglas des éprouvettes 01 et 05 ont une amplitude plus importante que celles des éprouvettes 09, 10, 13 et 20 : la densité du Douglas de ces deux éprouvettes est de l'ordre de 0,5 contre 0,4 pour les autres éprouvettes. Par contre si les densités des parties peuplier des éprouvettes 01, 09 et 10 de l'ordre de 0,5 sont différentes de la valeur 0,4 des éprouvettes 05, 13 et 20, on ne peut les distinguer facilement. L'éprouvette 10 est une copie de l'éprouvette 09 mais l'amplitude des déformations sur la face peuplier de l'éprouvette 10 est beaucoup plus importante que sur l'éprouvette 09. De même l'éprouvette 20 est une copie de l'éprouvette 13 et là aussi à densités de peuplier équivalentes il y a une disparité dans les amplitudes de déformations.

L'observation des composantes ϵ_{xx} de la face droite de ces éprouvettes et des composantes ϵ_{yy} sur les deux faces confirme ces tendances en particulier le comportement singulier de l'éprouvette 20.

Néanmoins sur la figure 4.19, les différences entre les valeurs moyennes de la déformation sur ces éprouvettes collées sont plus faibles qu'avec les valeurs moyennes des éprouvettes non collées. La tendance est la même pour les écart-types. Il faut se souvenir que l'aire des surfaces des éprouvettes collées est double de celle des éprouvettes non collées et que le nombre de points pris en compte dans le calcul de la moyenne est en rapport.

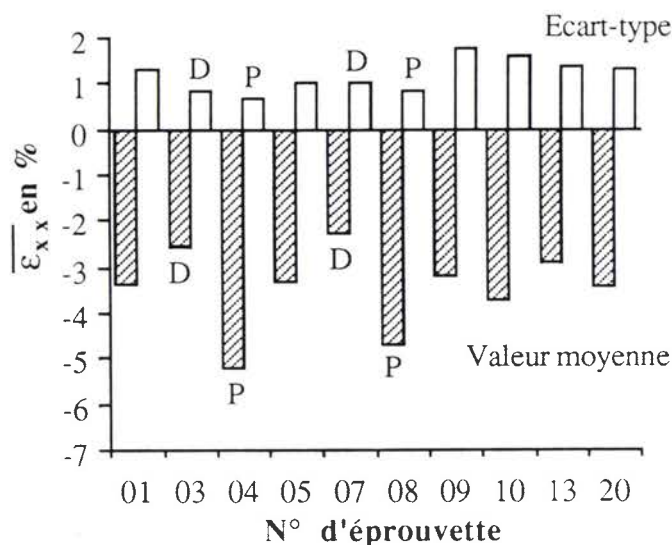


Figure 4.19 : Valeurs moyennes de la composante ϵ_{xx} et de l'écart-type associé sur la face Gauche des éprouvettes, à la fin du premier séchage.

Sur cette même figure 4.19, la corrélation entre les éprouvettes 03 et 07, et les éprouvettes 04 et 08, apparait clairement. Nous retrouvons ce résultat avec le tableau 4.10 : identité des valeurs pour les éprouvettes 03 et 07 (même densité de Douglas) et plus grande amplitude avec l'éprouvette 04 avec 0,5 de densité qu'avec l'éprouvette 08 de densité 0,4. Les remarques sont identiques pour la face Droite. Par contre pour la composante ϵ_{yy} sur les deux faces des éprouvettes, l'amplitude des déformations est plus importante pour l'éprouvette 03 que pour l'éprouvette 07 alors que leur densité sont équivalentes. Pour le peuplier les densités différentes n'affectent pas les amplitudes des déformations des éprouvettes 04 et 08.

Nous retrouvons ici une similitude avec les concordances des variations des humidités constatées au paragraphe 4.2.

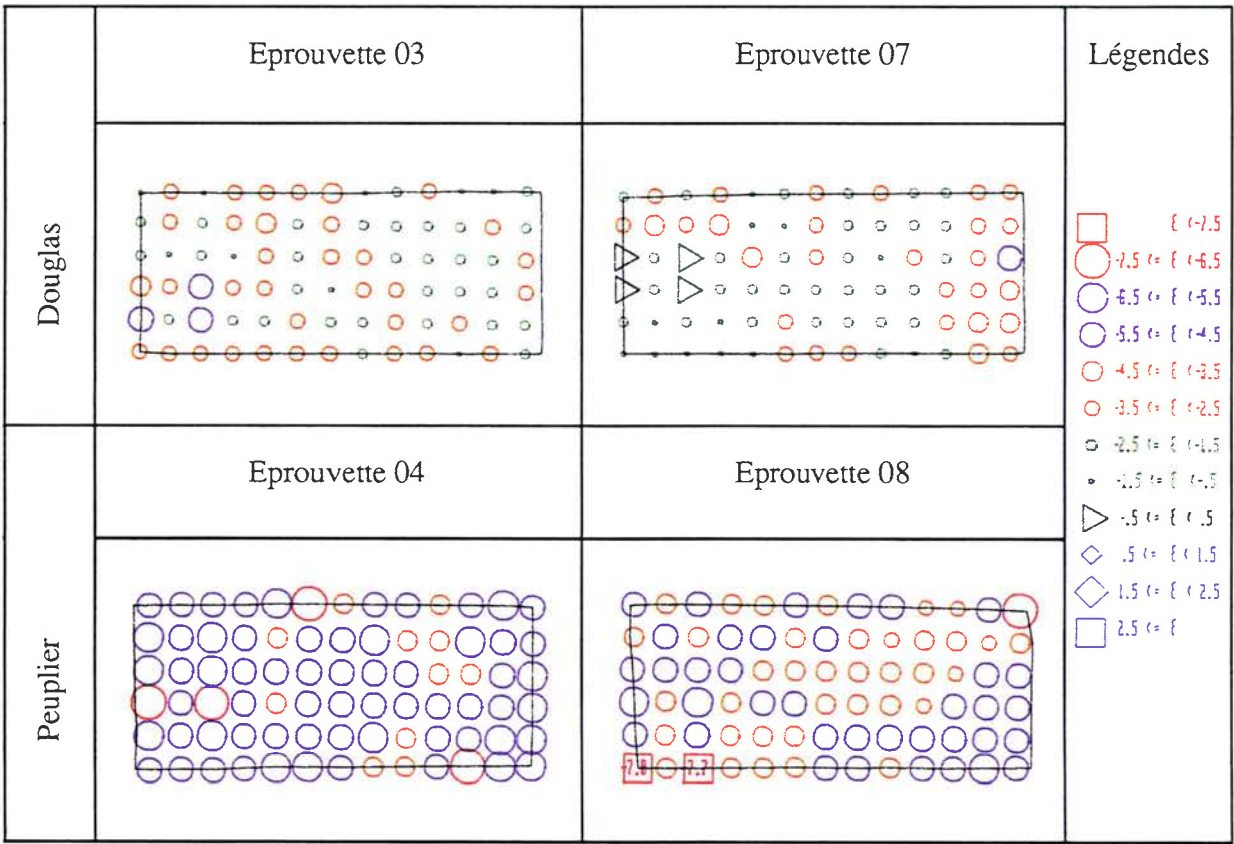


Tableau 4.10 : Composante ϵ_{xx} du champ de déformation des faces Gauches des éprouvettes non collées 03, 04, 07 et 08 à la fin du premier séchage.

Il subsiste donc une différence des valeurs des déformations en des points comparables entre les éprouvettes, plus importante qu'entre les deux faces d'une même éprouvette, mais nous pouvons considérer que les résultats obtenus sur chaque face expriment la même tendance de réponse du matériau aux mêmes sollicitations d'origine hygroscopiques.

4. 7 . Evolution du champ de déformation au cours du premier séchage .

Le tableau 4.11 représente la composante ϵ_{xx} du champ de déformation de la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des six premières mesures du premier séchage (origine comprise) et le tableau 4.12 les six suivantes.

Après deux heures de séchage ($t = 0,08$ jour) il apparait des zones en tension surtout dans le Douglas qui vont régresser environ 14 heures plus tard ($t = 0,68$ jour). Après une journée, toute la face est en compression. Par la suite il n'y a pas d'évolutions majeures des intensités en chaque point. Les différences observées proviennent principalement de la méthode d'enregistrement de l'image.

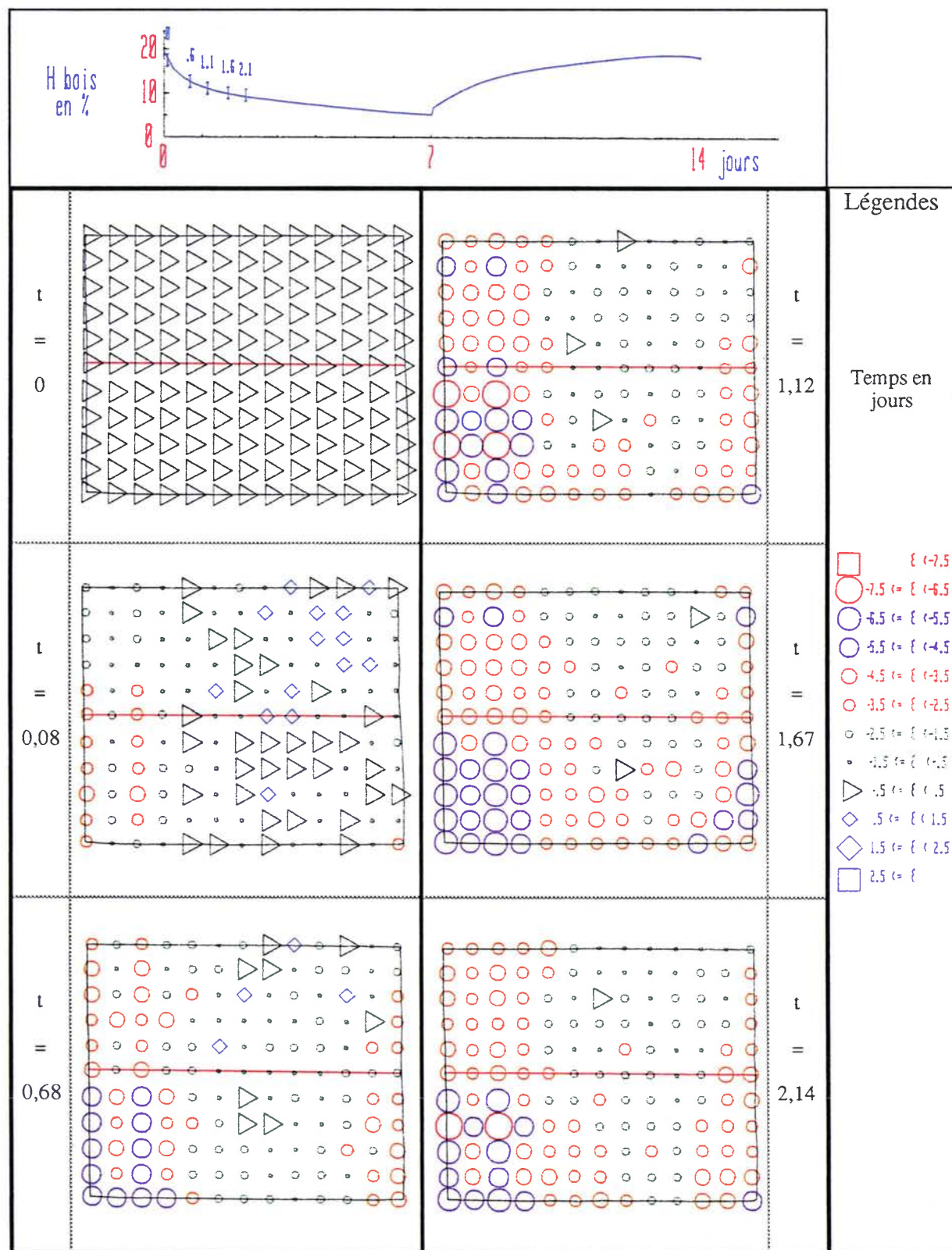


Tableau 4.11 : Champ de déformation ε_{xx} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des six premières mesures du premier séchage.

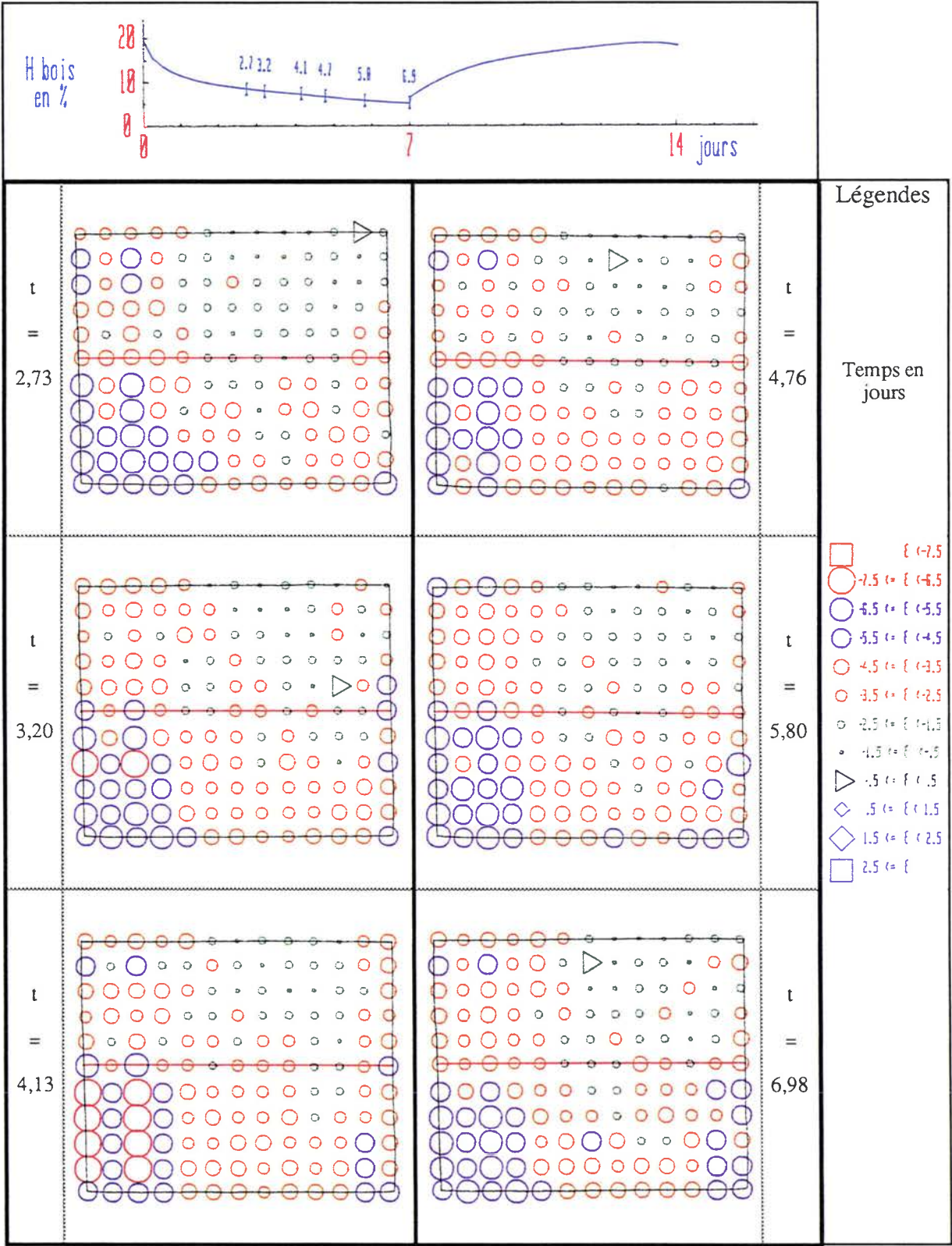


Tableau 4.12 : Champ de déformation ϵ_{xx} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des six dernières mesures du premier séchage.

Ceci est confirmé par le changement de pente observable sur la courbe de la figure 4.21 où sont représentées les valeurs de la composante ϵ_{xx} en cinq points, espacés de 12 millimètres depuis l'origine, le long du joint de colle (voir la figure 4.20) sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01.

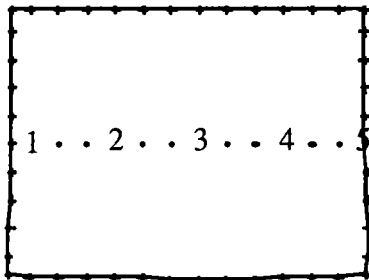


Figure 4.20 : Représentation sur une face d'éprouvette collée de la localisation de cinq points représentatifs du joint de colle.

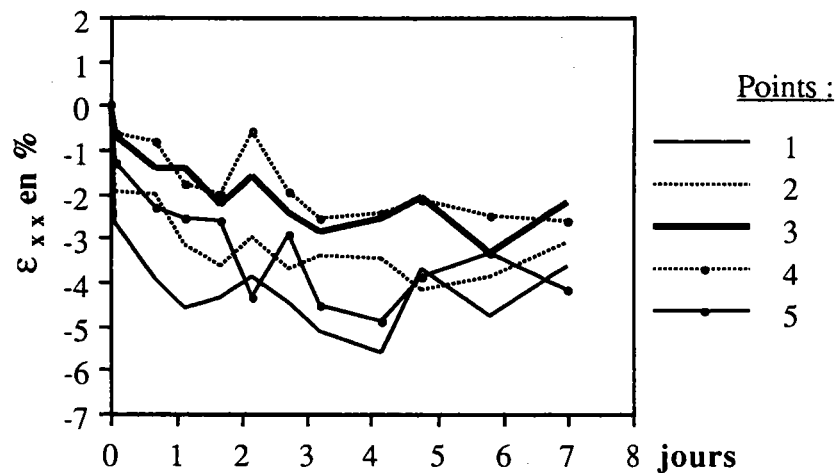


Figure 4.21 : Variations de la composante ϵ_{xx} au cours du premier séchage en cinq points régulièrement répartis sur le joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette collée 01.

On peut noter que si les points extrêmes 1 et 5 présentent la même évolution de la déformation, les points 2 et 4 également répartis symétriquement par rapport au centre du joint de colle ne subissent pas la même intensité de déformation à chaque instant, mettant en évidence l'asymétrie de la variation sur le joint de colle en particulier, et l'hétérogénéité de la surface considérée.

La fréquence relative des valeurs de ϵ_{xx} sur la même face (voir la figure 4.22) fait apparaître l'existence de valeurs positives de tension.

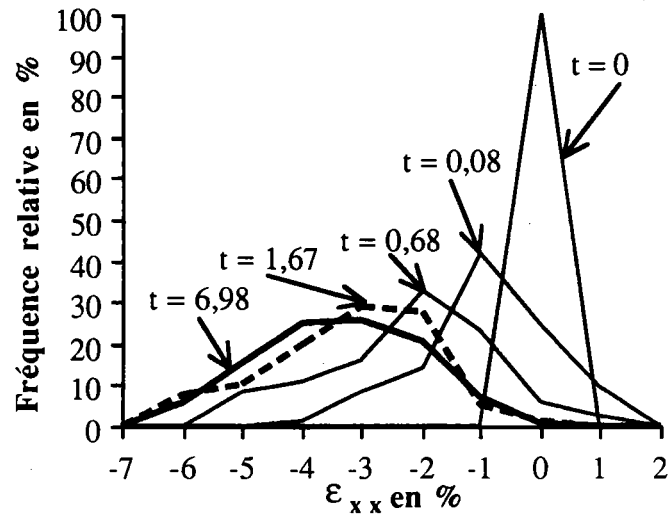


Figure 4.22 : Fréquences relatives des valeurs de la composante ϵ_{xx} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours du premier séchage.

Les déformations sont plus importantes aux bords de l'éprouvette qu'à l'intérieur comme le montrent les courbes de la figure 4.23 où est représenté le profil de la composante ϵ_{xx} le long du joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette 01, aux instants de la figure 4.22. On retrouve aux abscisses 0, 12, 24, 36 et 48 millimètres les cinq points de la figure 4.20.

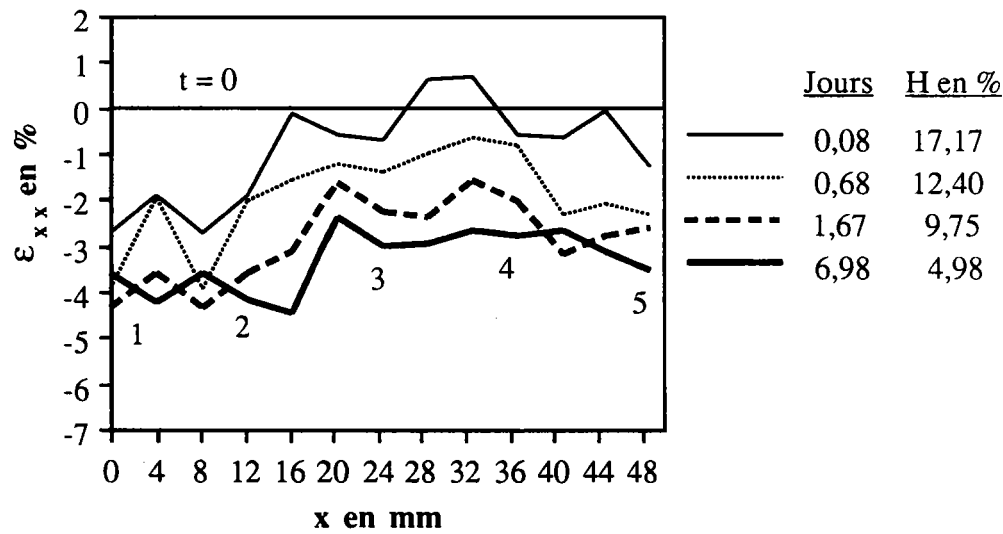


Figure 4.23 : Profil de la composante ϵ_{xx} au cours des six premières valeurs du premier séchage en 13 points régulièrement répartis sur le joint de colle sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01.

La faible variabilité longitudinale apparaît clairement sur les courbes de la valeur moyenne de ϵ_{xx} sur les deux faces des trois éprouvettes de la figure 4.24. L'amplitude sur l'éprouvette 04 est bien supérieure à celle de l'éprouvette 03, l'éprouvette 01 présentant une valeur intermédiaire.

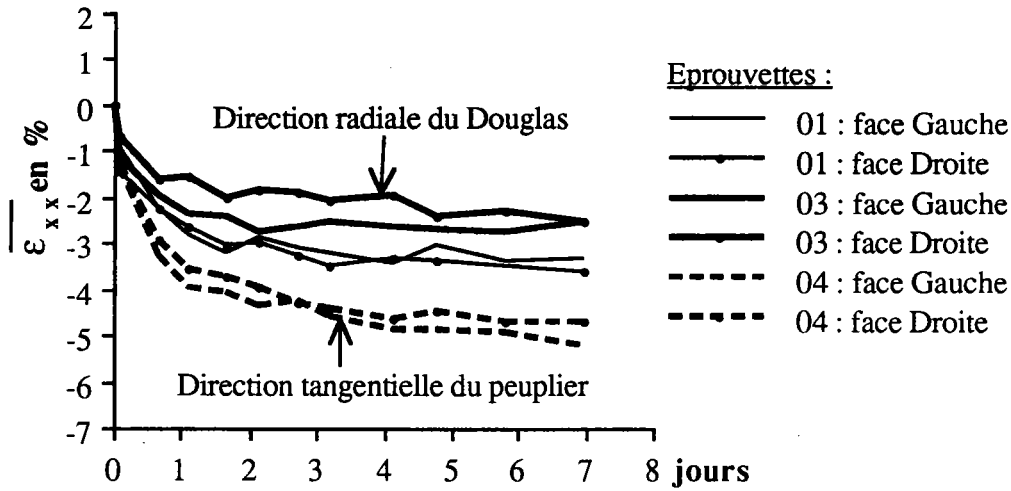


Figure 4.24 : Valeur moyenne de la composante ϵ_{xx} sur les faces Gauche et Droite des éprouvettes 01, 03 et 04 au cours du premier séchage.

La déformation se produit de façon plus homogène sur les faces des éprouvettes 03 et 04 que sur celle de l'éprouvette 01. L'écart-type est plus important sur cette dernière avec une aire plus grande. Les écarts-types des valeurs sur les éprouvettes 03 et 04 sont comparables (voir la figure 4.25).

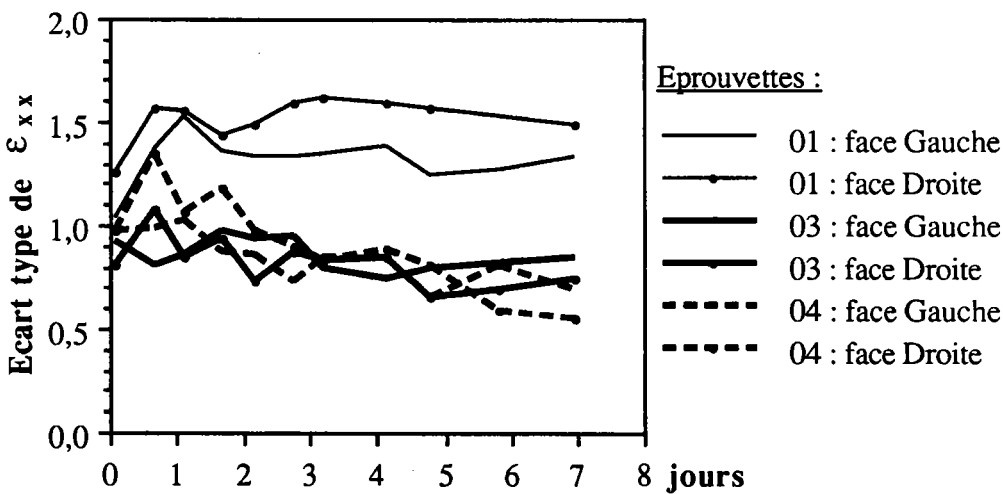


Figure 4.25 : Ecart-type de la composante ϵ_{xx} sur les faces Gauche et Droite des éprouvettes 01, 03 et 04 au cours du premier séchage.

La valeur moyenne de la composante ϵ_{xx} des éprouvettes collées est inférieure à celle des éprouvettes non collées de Douglas et supérieure à celle des éprouvettes non collées de peuplier (voir la figure 4.26).

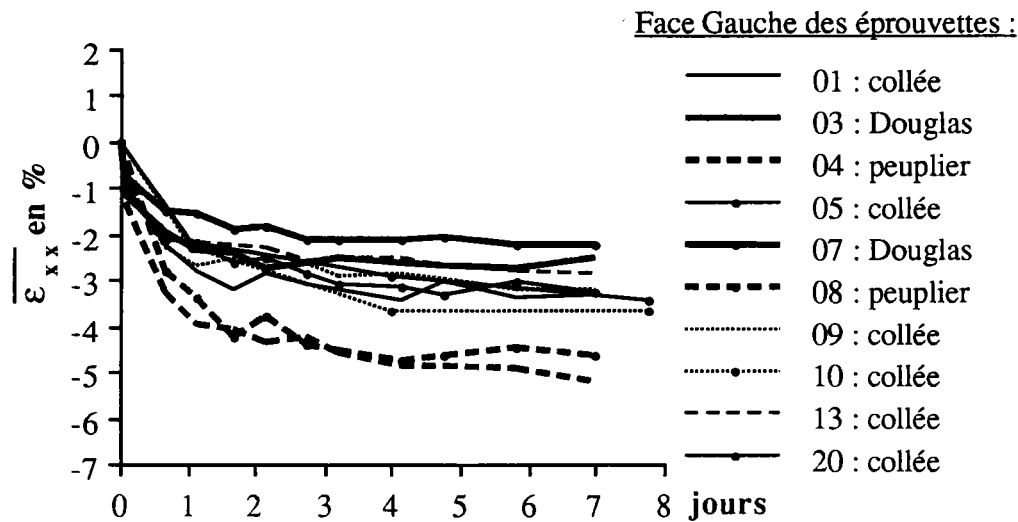


Figure 4.26 : Valeur moyenne de la composante ϵ_{xx} sur la face Gauche de toutes les éprouvettes au cours du premier séchage.

La dispersion des valeurs est plus importantes sur les éprouvettes collées que sur les éprouvettes non collées dont l'aire est plus faible. Il y a également correspondance entre les valeurs des écart-types des éprouvettes 01 et 05, 09 et 10, et 13 et 20, qui sont des éprouvettes équivalentes deux à deux (voir la figure 4.27).

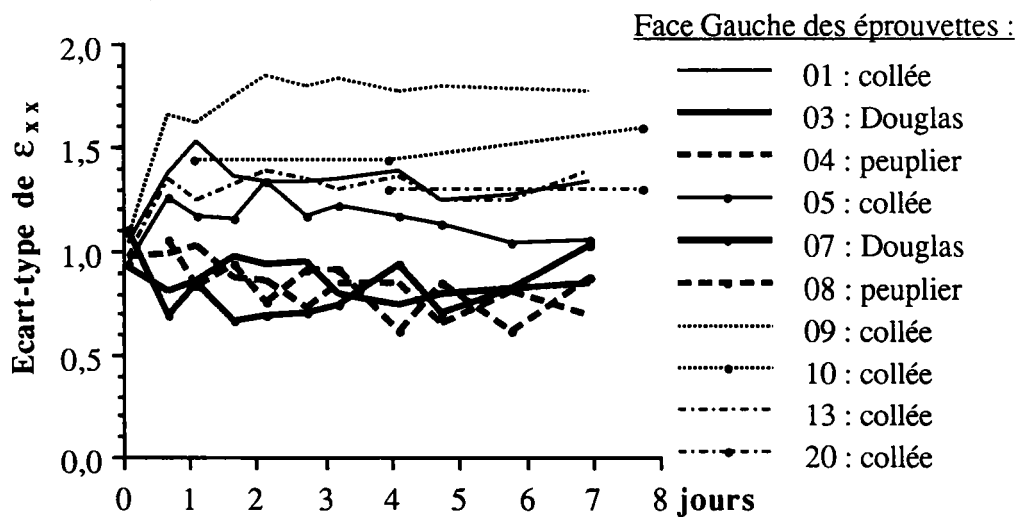


Figure 4.27 : Ecart-type de la composante ϵ_{xx} sur la face Gauche de toutes les éprouvettes au cours du premier séchage.

Le tableau 4.13 représente la composante ϵ_{yy} du champ de déformation de la face Gauche de l'éprouvette 01 au cours des six premières mesures du premier séchage (origine comprise) et le tableau 4.14 les six suivantes. Les valeurs des déformations sur le joint de colle présentent la particularité d'être positives (zone en tension) pendant quelques dizaines d'heures avant de diminuer pour finalement traduire une légère compression dans la direction Oy, avec la réserve déjà émise concernant la position dans le Douglas des points du quadruplet ayant leur origine sur le joint de colle. La stabilisation des valeurs se produit plus rapidement.

La figure 4.28 représente les valeurs des déformations ϵ_{yy} également aux cinq points définis sur la figure 4.20 sur la face Gauche de l'éprouvette 01. Le changement de pente est moins observable que sur la courbe de la figure 4.21 pour l'autre composante du tenseur des déformations, avec la conservation de l'asymétrie.

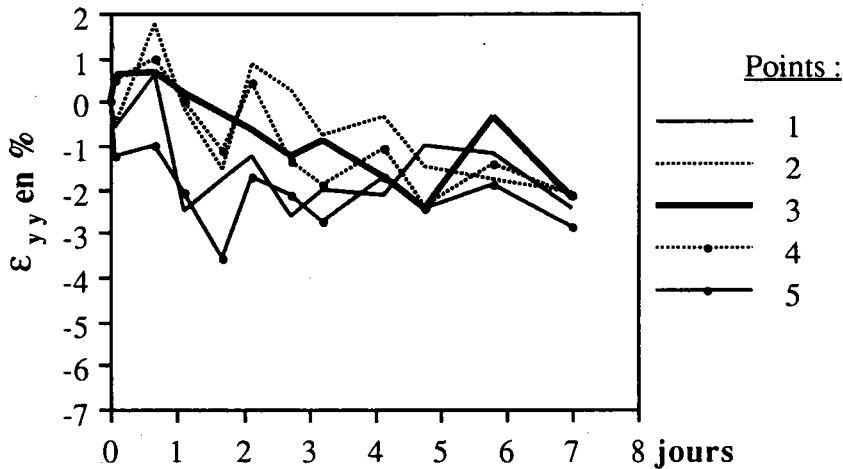


Figure 4.28 : Variations de la composante ϵ_{yy} au cours du premier séchage en cinq points régulièrement répartis sur le joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette collée 01.

Par contre sur la figure 4.29, les courbes des fréquences relatives de la valeur de la composante ϵ_{yy} font apparaître que la stabilisation a lieu en une journée. Une fluctuation est apparue entre le sixième et le septième jour de ce premier séchage pour cette éprouvette mais elle n'est pas significative.

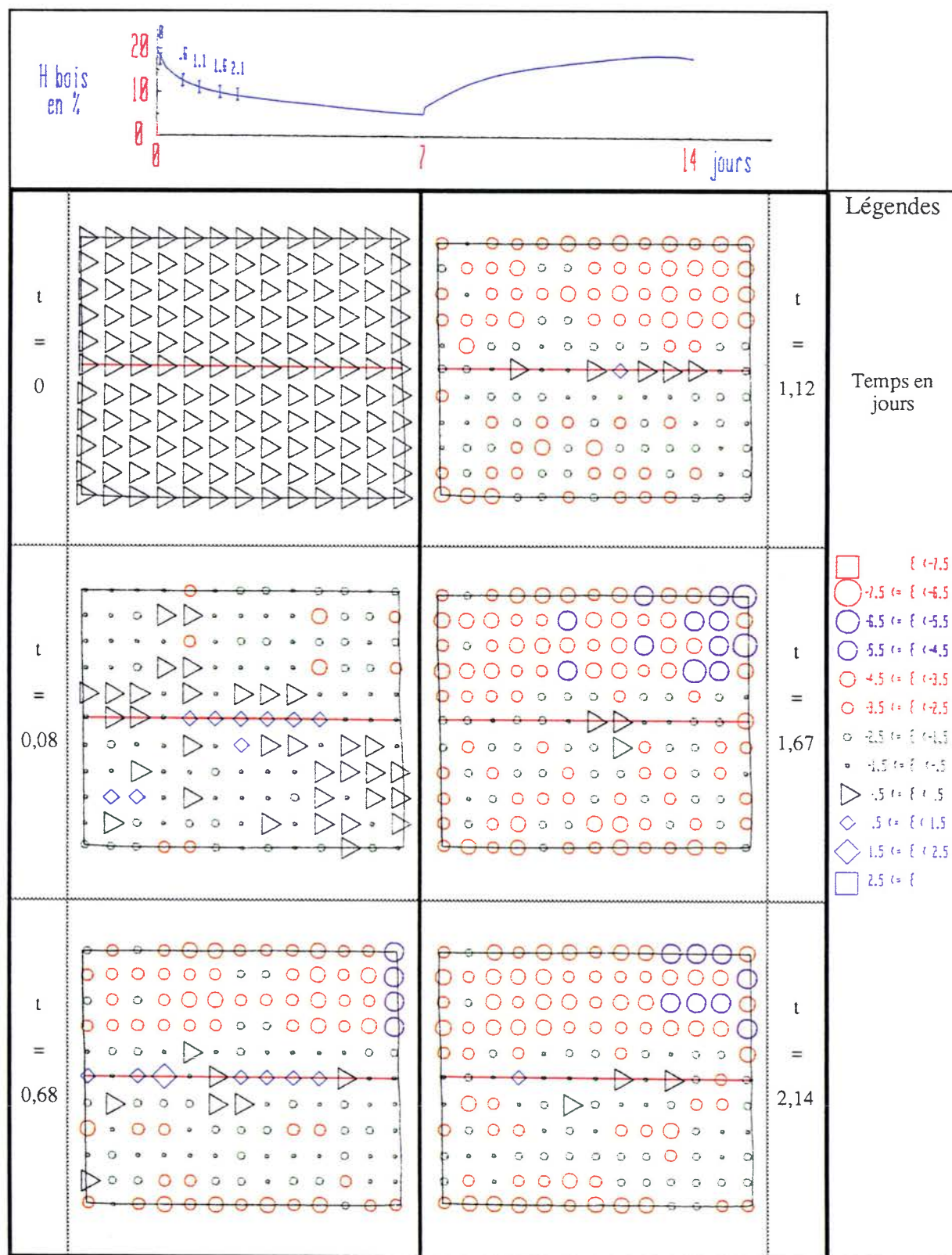


Tableau 4.13 : Champ de déformation ϵ_{yy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des six premières mesures du premier séchage.

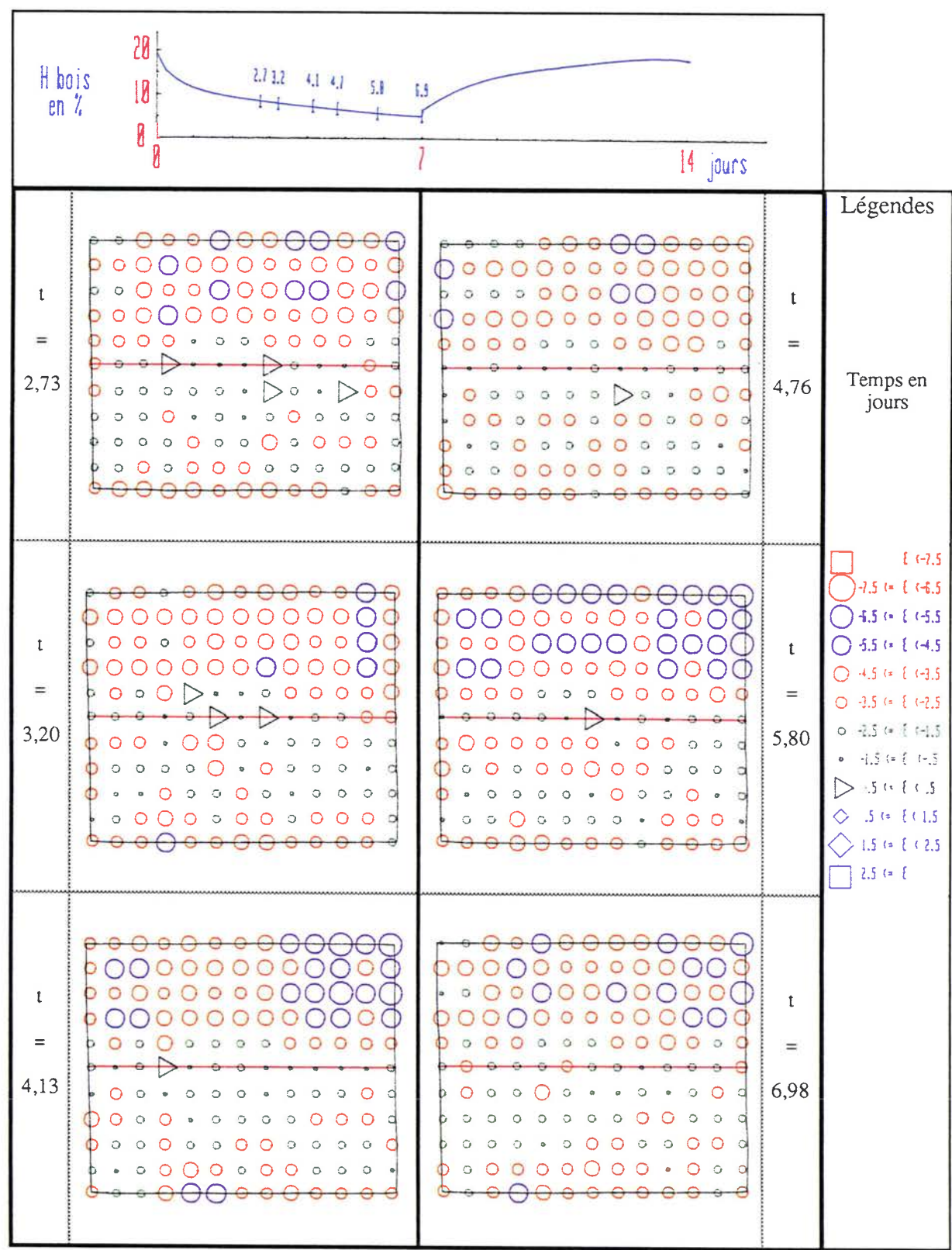


Tableau 4.14 : Champ de déformation ϵ_{yy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des six dernières mesures du premier séchage.

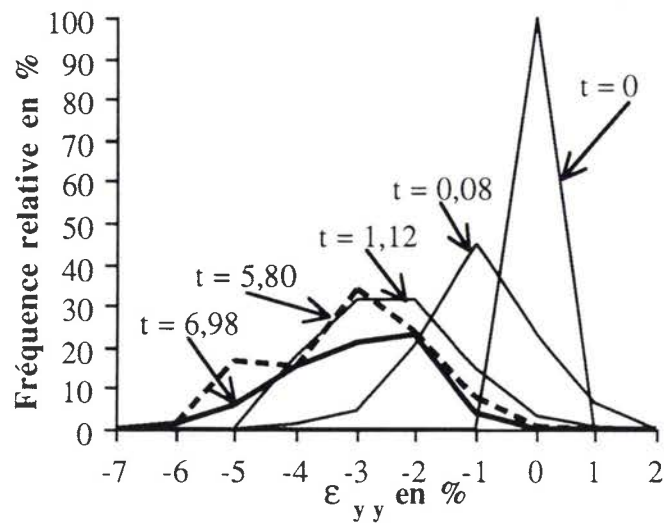


Figure 4.29 : Fréquences relatives des valeurs de la composante ϵ_{yy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours du premier séchage.

Les courbes de la figure 4.30 où sont représentés les profils de la composante ϵ_{yy} le long du joint de colle aux instants de la figure 4.29, traduisent les deux remarques précédentes.

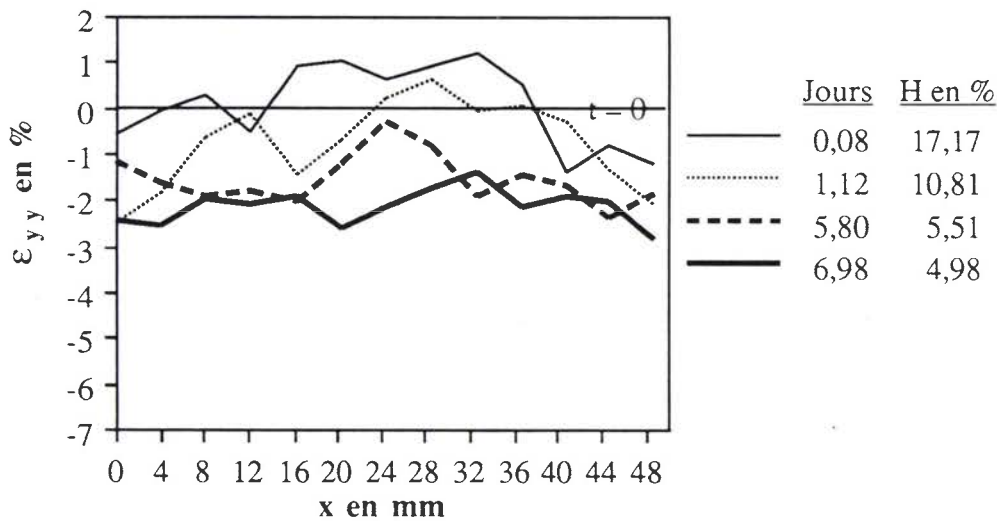


Figure 4.30 : Profil de la composante ϵ_{yy} au cours du premier séchage en 13 points régulièrement répartis sur le joint de colle sur la face Gauche de l'éprouvette 01.

La stabilisation des valeurs est également perceptible sur ces courbes. L'amplitude de la composante ϵ_{yy} est plus constante sur le joint de colle que celle de ϵ_{xx} .

La confirmation de la stabilisation plus rapide de la composante ϵ_{yy} est obtenue sur la courbe des variations de la valeur moyenne de la composante sur les faces Gauches de toutes les éprouvettes (voir la figure 4.31). En une journée les valeurs atteignent un palier bas.

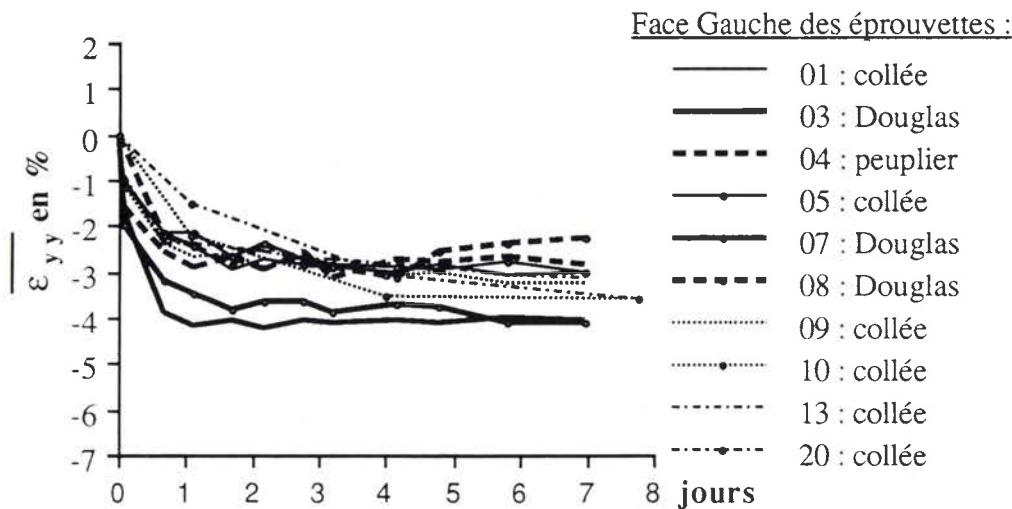


Figure 4.31 : Variations de la valeur moyenne de la composante ϵ_{yy} sur la face Gauche de toutes les éprouvettes au cours du premier séchage.

Les représentations globales des valeurs de la composante ϵ_{xy} du champ de déformation de la face Gauche de l'éprouvette 01, dans les tableaux 4.15 et 4.16, ne montrent pas d'évolution aussi claire que pour les deux autres composantes. Par contre, les courbes des fréquences relatives de la figure 4.32 au cours du premier séchage traduisent la stabilisation des valeurs de cette composante en environ une journée.

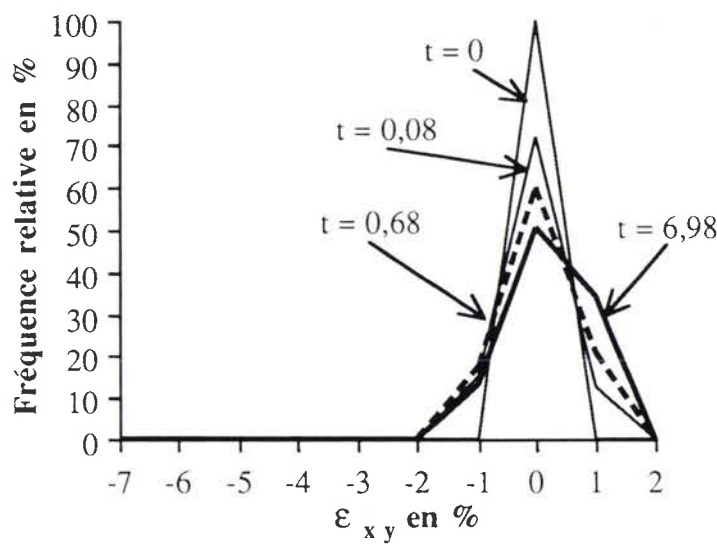


Figure 4.32 : Fréquences relatives des valeurs de la composante ϵ_{xy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 pendant le premier séchage.

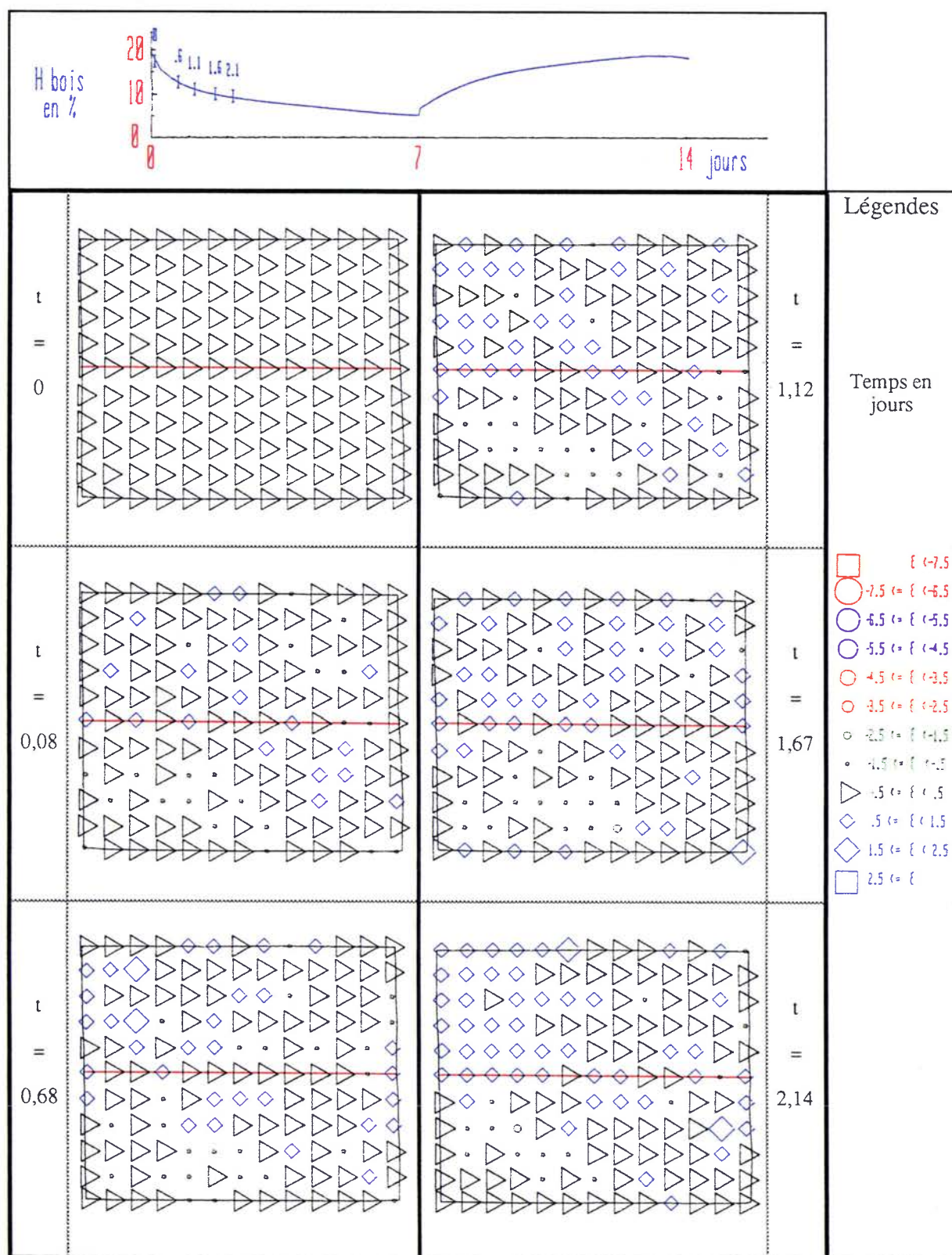


Tableau 4.15 : Champ de déformation ε_{xy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des six premières mesures du premier séchage.

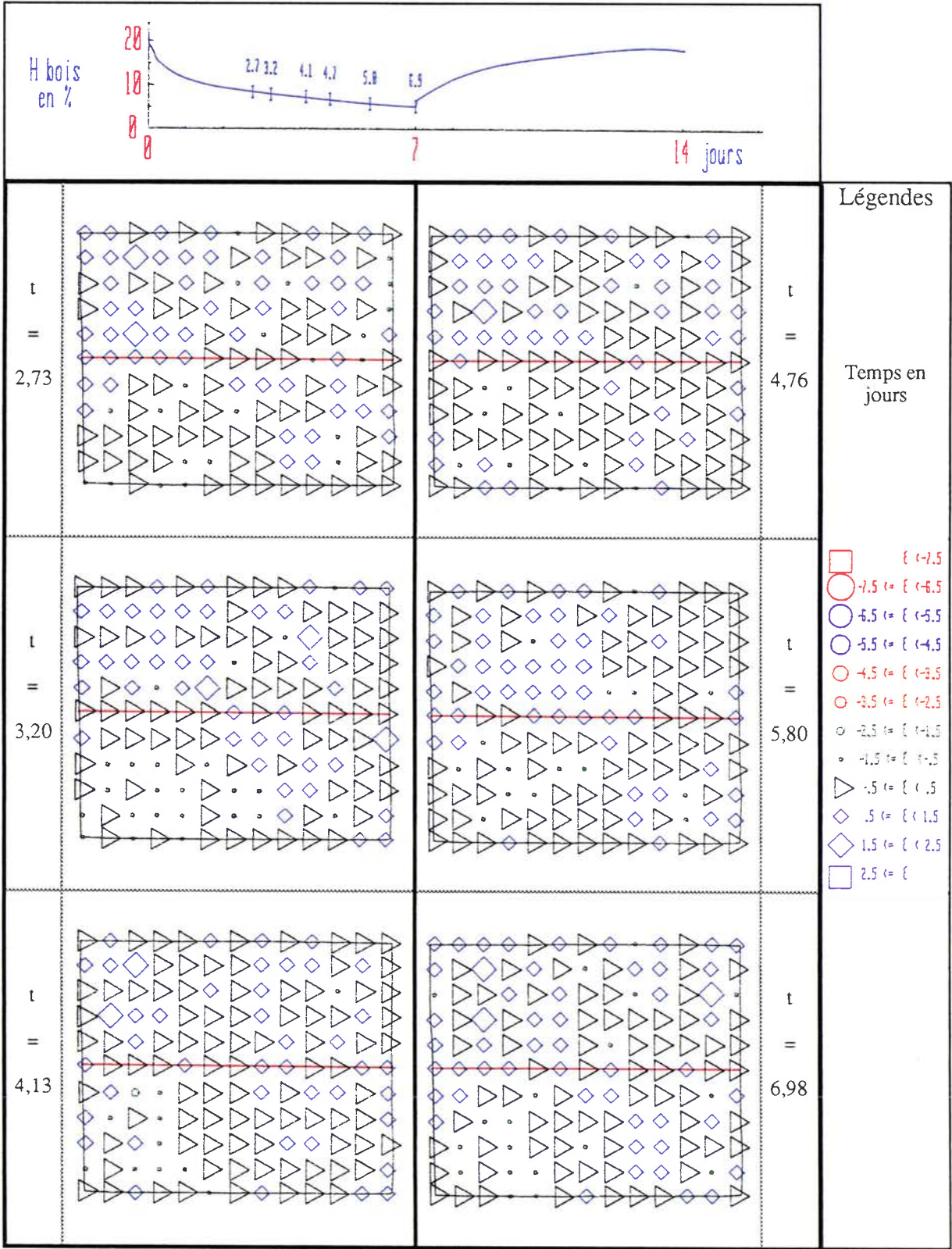


Tableau 4.16 : Champ de déformation ϵ_{xy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des six dernières mesures du premier séchage.

La figure 4.33 montre l'évolution particulière de la valeur moyenne de la composante sur les deux faces de trois éprouvettes. Si l'amplitude est du même ordre de grandeur, le signe est opposé entre les deux faces. Le cisaillement est exprimé dans deux repères différents par le sens de leur axe Ox. La stabilisation intervient comme celle de la composante ϵ_{xx} .

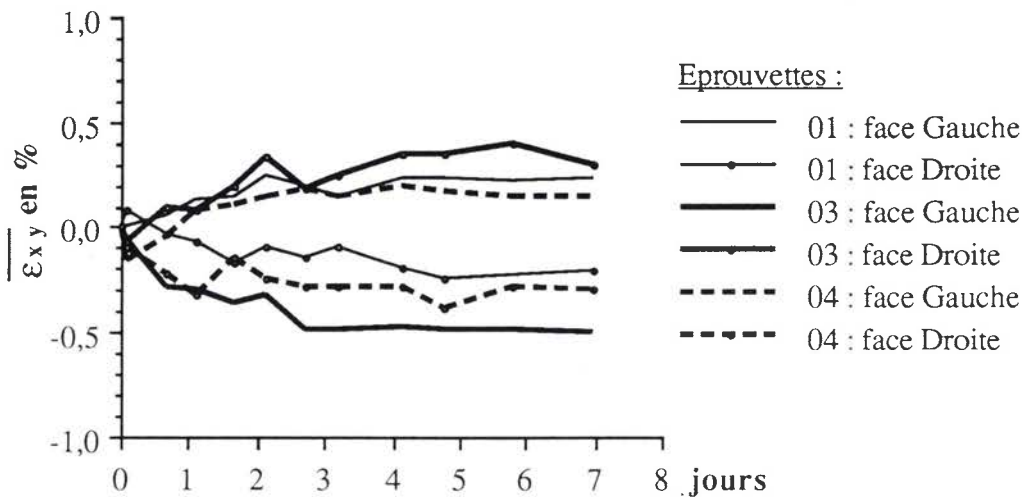


Figure 4.33 : Variations de la valeur moyenne de la composante ϵ_{xy} sur les faces Gauche et Droite des éprouvettes 01, 03 et 04 au cours du premier séchage.

La comparaison des résultats obtenus au cours de ce premier séchage entre les éprouvettes collées et les reconstitutions d'assemblages non collés montre que :

- les amplitudes maximales des déformations des éprouvettes sont de même ordre,
- les amplitudes des valeurs moyennes des déformations des éprouvettes collées sont équivalentes et différentes des éprouvettes non collées,
- les assemblages non collés sont plus uniformément déformés que les assemblages collés : le collage limite la déformation ϵ_{xx} du peuplier près du joint de colle et réduit la déformation ϵ_{yy} du Douglas également près du joint de colle,
- la stabilisation des valeurs des déformations est plus rapide dans les assemblages non collés,
- la valeur presque nulle de la composante ϵ_{yy} du champ de déformation sur le joint de colle d'un assemblage collé ne se retrouve pas sur le bord inférieur des pièces de Douglas non collées.
- la valeur de la composante de cisaillement ϵ_{xy} est très faible mais varie comme celle des deux autres composantes.

Nous n'avons pas relevé en fin de séchage sur les représentations globales, la présence de zones où apparaissent des déformations dont l'amplitude soit supérieure de plusieurs unités aux déformations l'entourant, qui auraient pu traduire l'existence de fissures.

Sachant que la valeur de l'humidité globale du bois n'atteint environ que 80 % de sa valeur stabilisée et que les phénomènes de diffusion interne sont toujours en cours, nous ne pouvons émettre une hypothèse quant à l'uniformisation de la déformation sur toute la section d'une éprouvette non collée. On ne peut donc déterminer l'influence du collage sur un assemblage collé à humidité stabilisée en milieu sec.

4. 8 . Evolution du champ de déformation au cours de la première humidification .

Le tableau 4.17 représente la composante ϵ_{xx} du champ de déformation de la face Gauche de l'éprouvette 01 au cours des six premières mesures de la première humidification (origine comprise) et le tableau 4.18 les trois suivantes. Après 17 heures d'humidification, il apparait les premières zones en déformation nulle dans le Douglas qui s'étendent en 2 jours. Ensuite il n'y a pas d'évolutions majeures des intensités en chaque point : on peut considérer être retourné à l'état initial. Ceci est confirmé par le changement de pente observable sur la courbe de la figure 4.34 où sont représentées les valeurs des composantes ϵ_{xx} en cinq points du joint de colle sur la face Gauche de l'éprouvette 05, comme définis sur la figure 4.20.

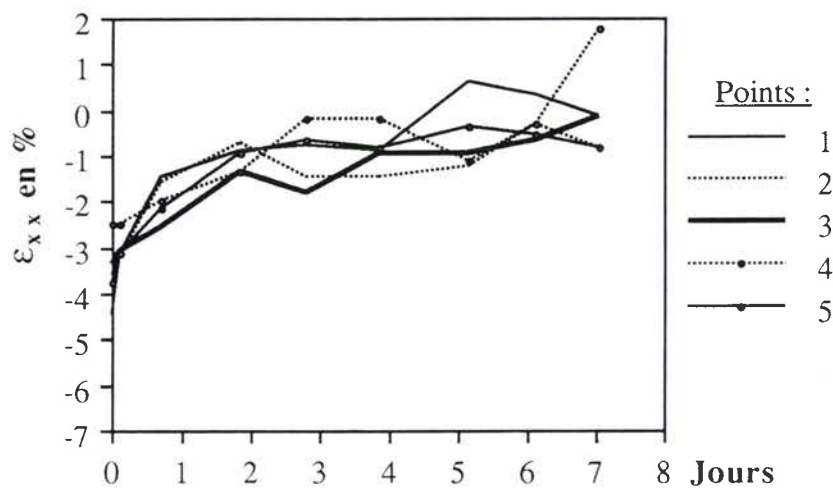


Figure 4.34 : Variations de la composante ϵ_{xx} au cours de la première humidification en cinq points régulièrement répartis sur le joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette collée 05.

On peut noter que les valeurs de la composante ϵ_{xx} aux points 3 et 4 est positive en fin d'humidification.

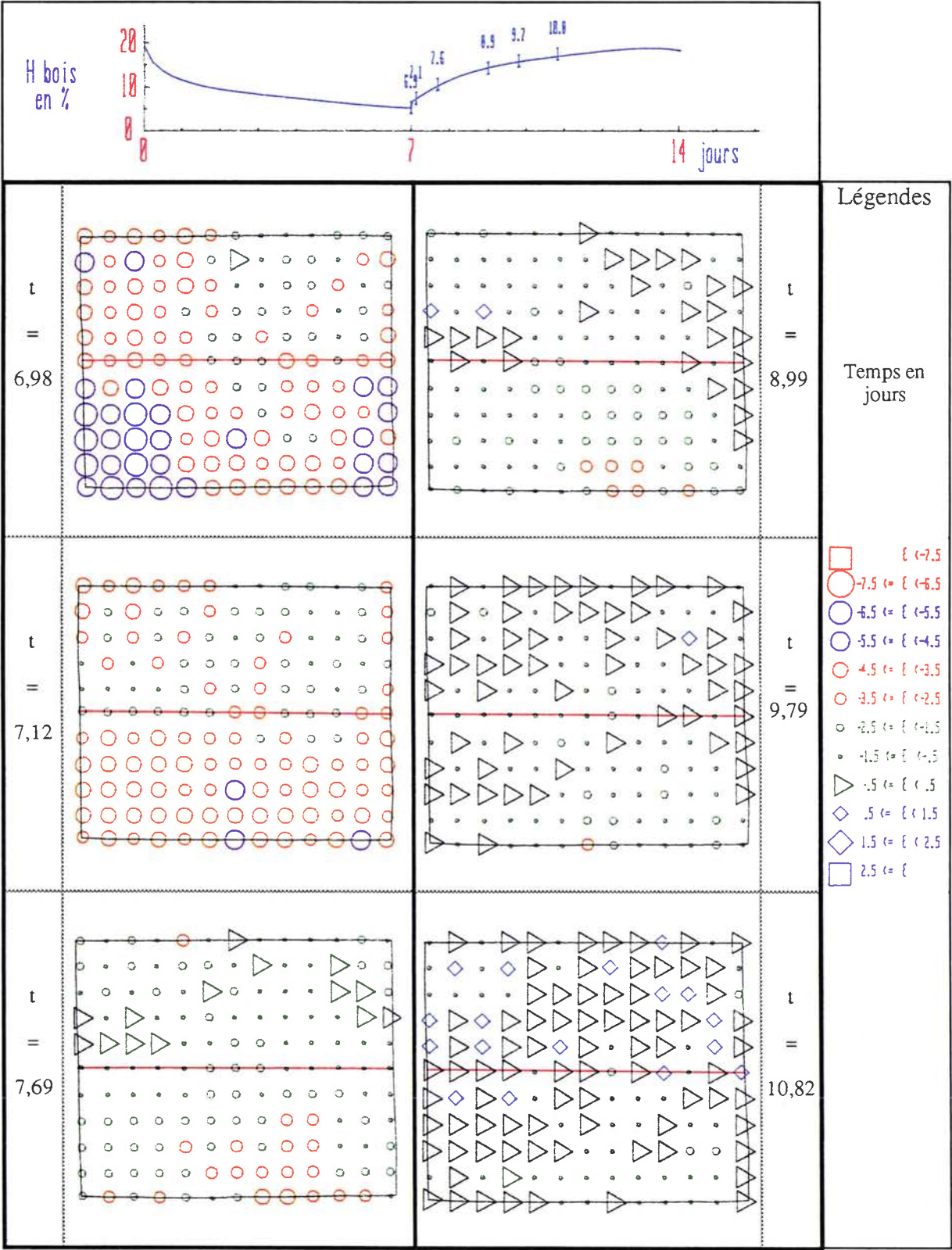


Tableau 4.17 : Champ de déformation ϵ_{xx} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des six premières mesures de la première humidification.

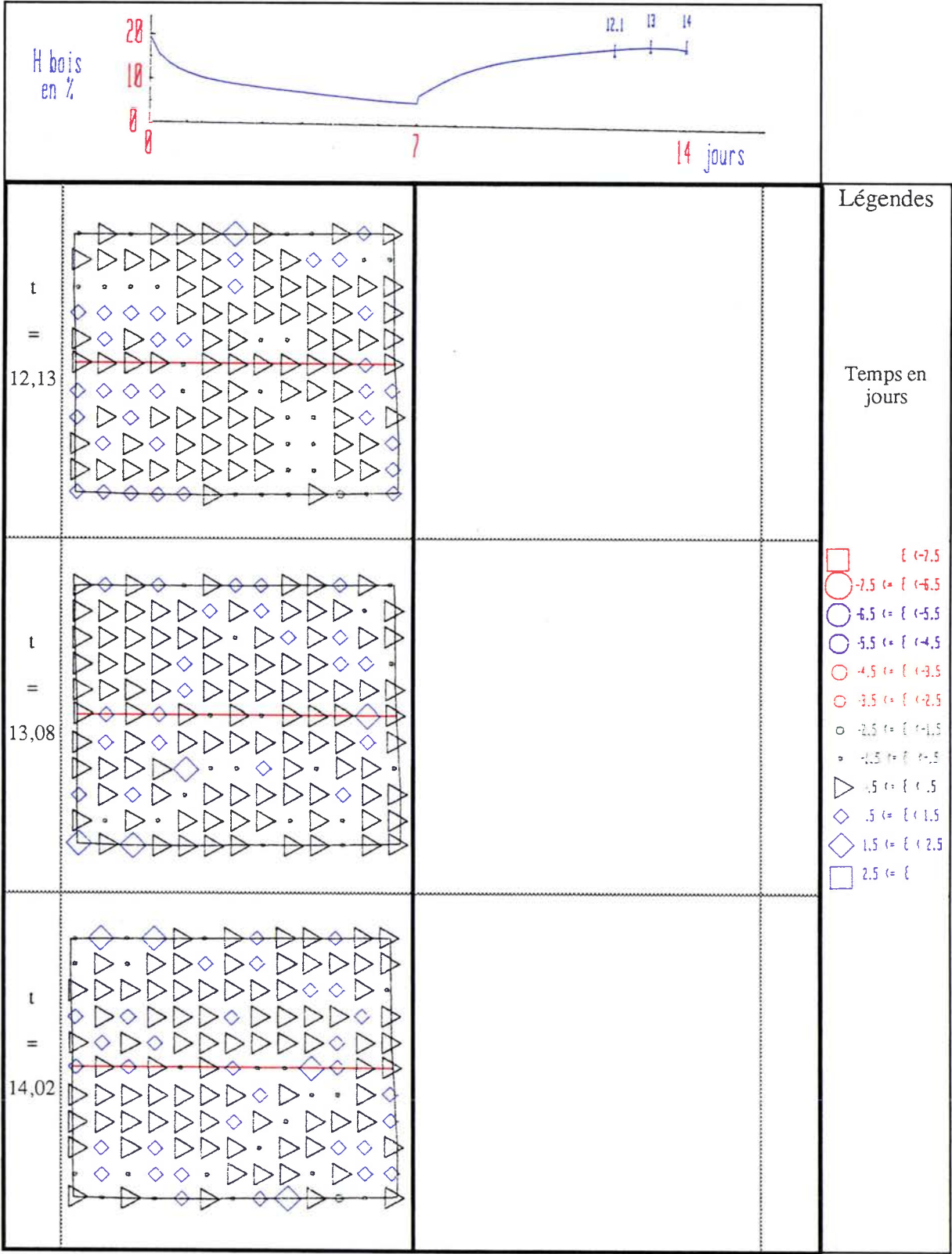


Tableau 4.18 : Champ de déformation ϵ_{xx} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des trois dernières mesures de la première humidification.

De même la représentation des fréquences relatives de la composante, sur la face Gauche de l'éprouvette 01, rend compte de cette stabilisation en deux jours (voir la figure 4.35).

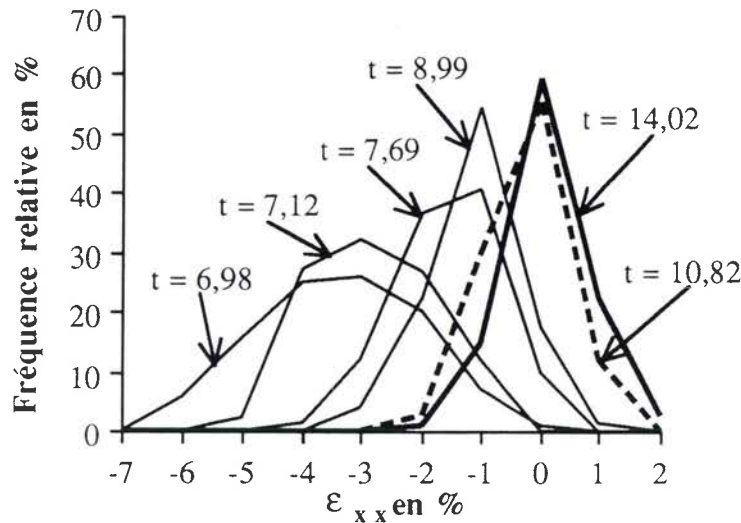


Figure 4.35 : Fréquences relatives des valeurs de ϵ_{xx} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours de la première humidification.

Les valeurs moyennes de la composante pour toutes les éprouvettes se stabilisent en deux jours sauf pour les deux éprouvettes de peuplier non collées (voir la figure 4.36). On peut noter également que la valeur moyenne de la composante est légèrement positive pour quelques éprouvettes.

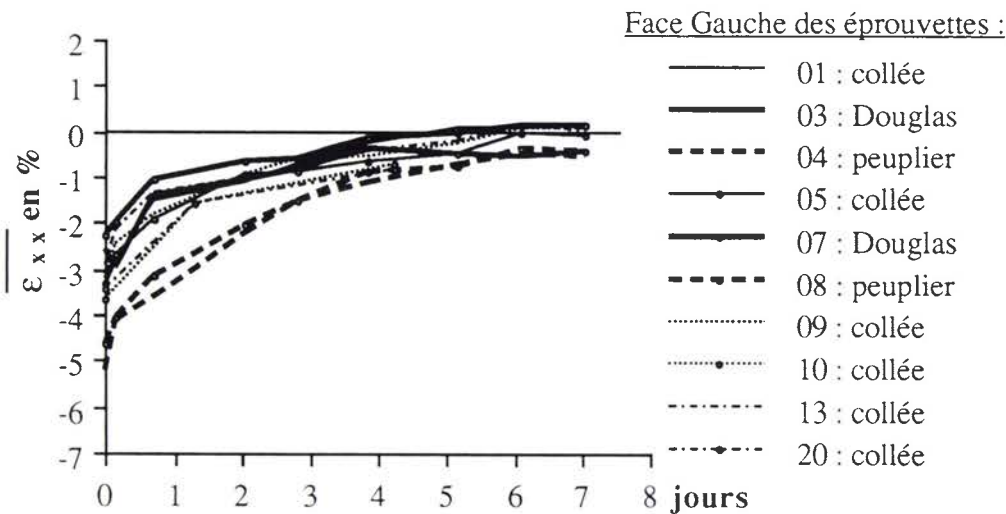


Figure 4.36 : Valeurs moyennes de la composante ϵ_{xx} sur la face Gauche des éprouvettes au cours de la première humidification.

Les déformations plus importantes aux bords de l'éprouvette qu'à l'intérieur se réduisent de façon uniforme comme le montrent les courbes de la figure 4.37 où sont représentés les profils de la composante ϵ_{xx} le long du joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette 05 aux instants donnés dans la figure 4.35 pour l'éprouvette 01.

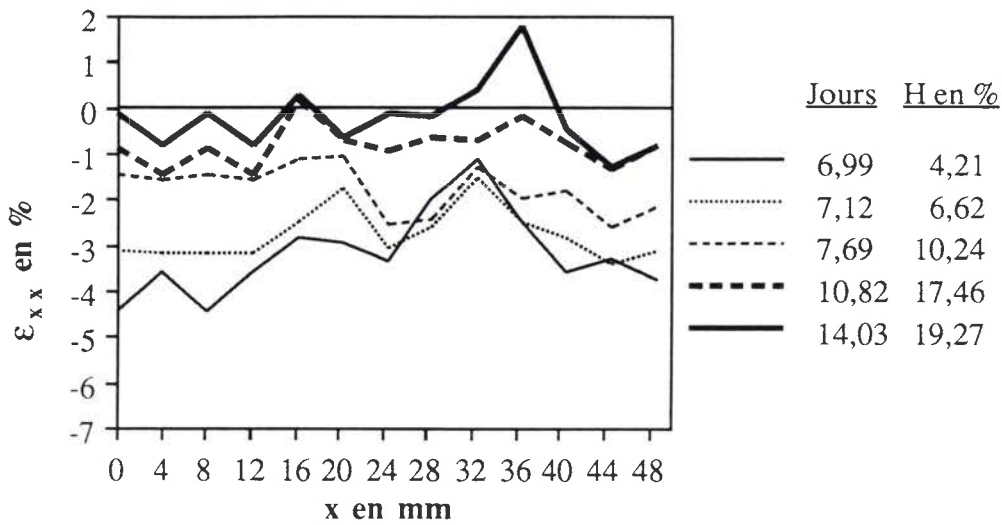


Figure 4.37 : Profil de la composante ϵ_{xx} au cours de la première humidification en 13 points régulièrement répartis sur le joint de colle sur la face Gauche de l'éprouvette collée 05.

L'état de déformation après humidification peut être considéré nul et nous retrouvons l'état de déformation initial. Les valeurs de la composante ϵ_{yy} sur la face gauche de l'éprouvette 01 au cours des six premières mesures de la première humidification (origine comprise) sont reportées dans le tableau 4.19 et les trois suivantes dans le tableau 4.20. La stabilisation des valeurs des déformations se produit en deux jours comme pour la composante ϵ_{xx} . Les fréquences relatives des valeurs de la composante ϵ_{yy} sur la face Gauche de l'éprouvette 01 montrent la même différence entre les courbes à $t = 8,99$ jours et à $t = 14,02$ jours (voir la figure 4.38).

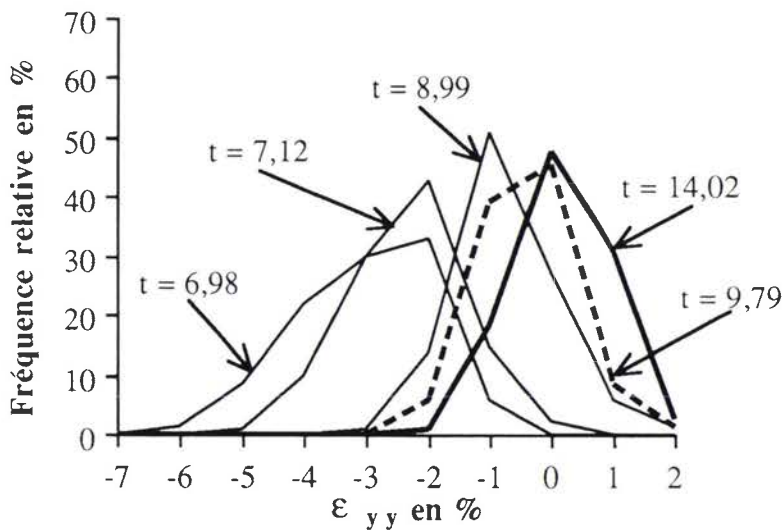


Figure 4.38 : Fréquences relatives des valeurs de la composante ϵ_{yy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours de la première humidification.

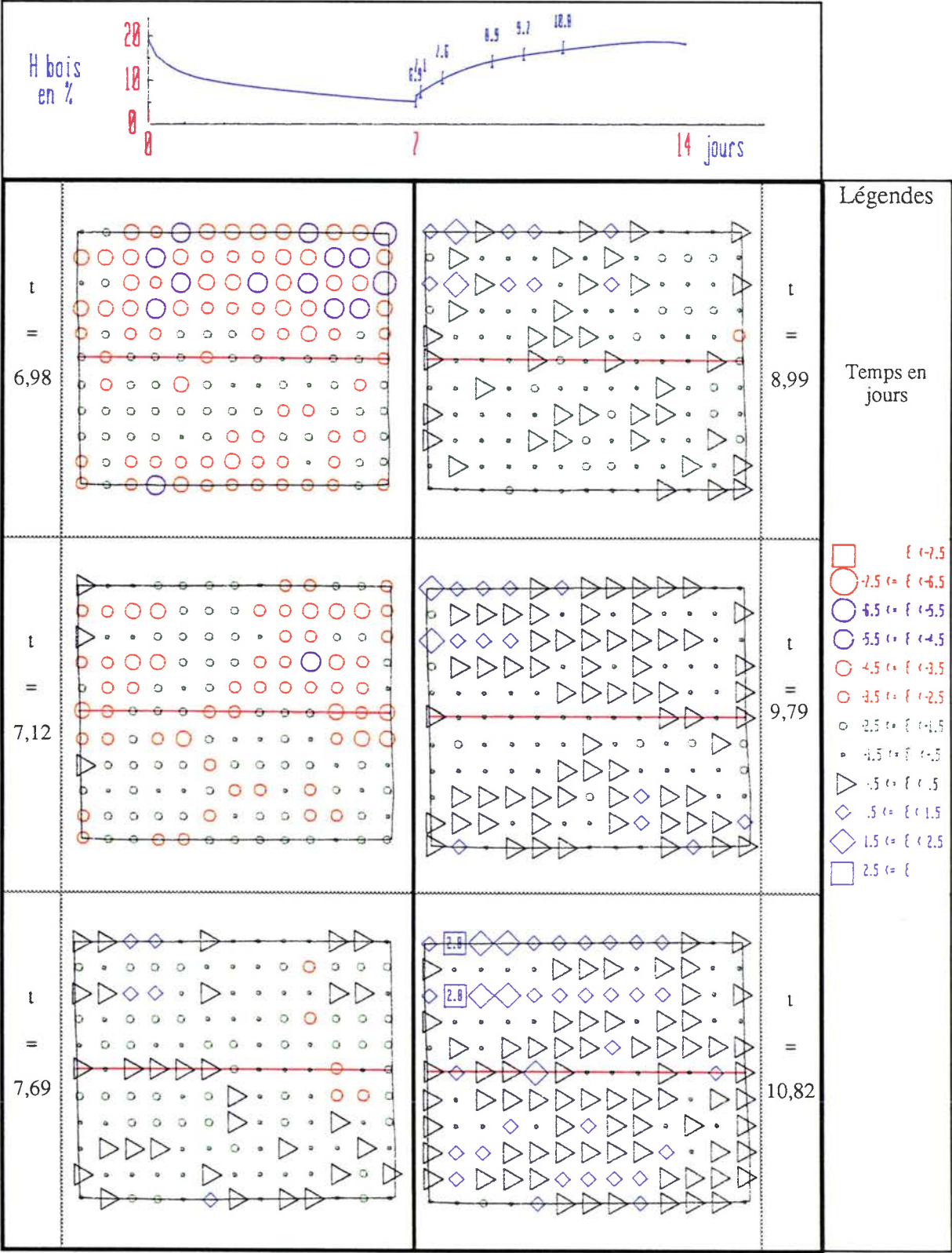


Tableau 4.19 : Champ de déformation ϵ_{yy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des six premières mesures de la première humidification.

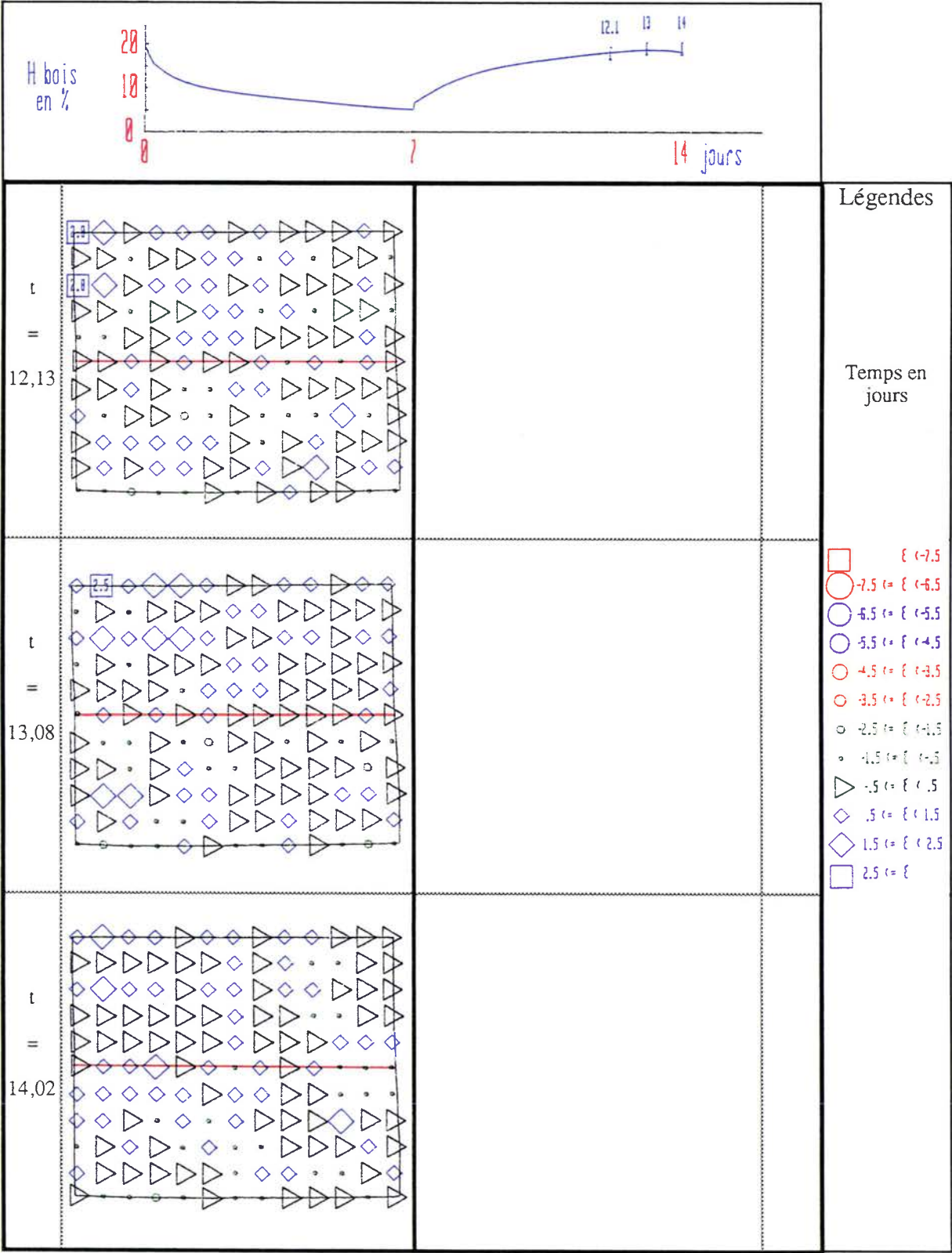


Tableau 4.20 : Champ de déformation ϵ_{yy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des trois dernières mesures de la première humidification.

Les fréquences relatives des valeurs de la composante ϵ_{xy} sur la face Gauche de l'éprouvette 01 montrent que la stabilisation des valeurs intervient plus rapidement, en moins de deux jours (voir la figure 4.39).

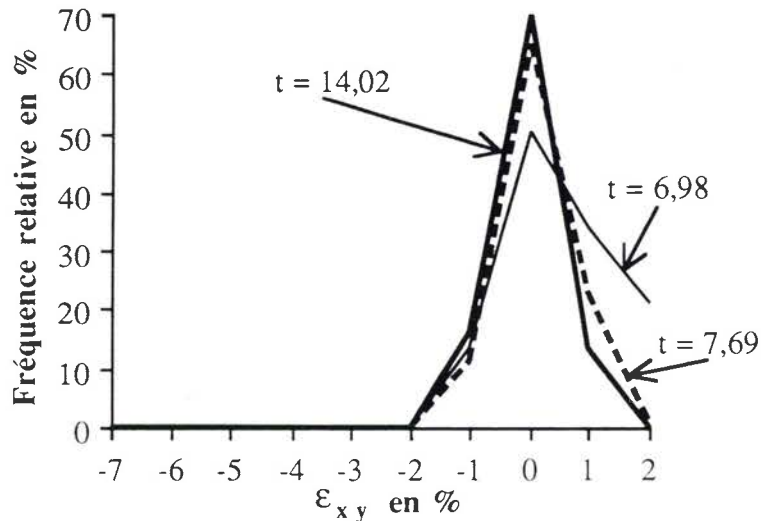


Figure 4.39 : Fréquences relatives des valeurs de la composante ϵ_{xy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours de la première humidification.

La comparaison des résultats obtenus au cours de cette première humidification entre les éprouvettes collées et les reconstitutions d'assemblages non collés et avec le premier séchage conduit aux remarques suivantes :

- l'état de déformation initial nul est considéré comme rétabli sur les éprouvettes collées et les assemblages non collés où se trouvent néanmoins plus de zones en légères tensions,
- la stabilisation des valeurs de la déformation est équivalente dans les deux types d'assemblage, avec une durée plus importante que dans le cas du séchage et plus courte pour la composante ϵ_{xy} que pour les deux autres composantes,
- le bord inférieur de l'éprouvette de Douglas non collée, initialement en compression en fin de séchage, présente très rapidement des phénomènes de tension dans la direction Oy dont les intensités atteignent 4 %. Cette tension s'atténue vers la fin de l'humidification, reflétant la présence du film de silicone empêchant la circulation de vapeur d'eau. Ce même phénomène très atténué apparaît sur le bord supérieur de l'éprouvette de peuplier.

Les éprouvettes ont retrouvé leur volume initial à humidité à saturation avec les fissures radiales et tangentielles naturelles du bois et celles amorcées par le marquage laser refermées.

4.9. Evolution du champ de déformation à l'état sec .

Après avoir observé l'exécution du premier séchage et de la première humidification, nous nous intéressons à l'évolution des valeurs des déformations d'abord à la fin des séchages successifs puis dans le paragraphe suivant à leur évolution en fin d'humidifications.

Le tableau 4.21 présente la composante ϵ_{xx} du champ de déformation de la face gauche de l'éprouvette 01 à la fin de séchages successifs. Nous représentons la différence en chaque point entre la valeur aux 2ème, 4ème, 8ème, 12ème séchages et la valeur au premier séchage. Les champs de déformation aux 1er et 12ème séchages sont également présentés. Sur les figures représentant les valeurs relatives, les cercles traduisent une augmentation de la déformation alors que les losanges reflètent une diminution et les triangles aucun changement.

On ne peut affirmer qu'il y ait une différence significative de la valeur de l'intensité de la déformation entre les 1er et 12ème séchages en chaque point et dans la répartition sur la surface qui en découle. Puisqu'on ne détecte pas par les résultats de calcul l'apparition de fissures entre ces deux séchages, fait confirmé par l'observation des éprouvettes en cours d'essai, les phénomènes d'endommagement du bois se produisent principalement au premier séchage et se maintiennent sans évoluer au cours des séchages suivants, le collage du bois ayant été épargné.

La courbe de la figure 4.40 représente la variation de la déformation ϵ_{xx} au point origine du joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette 01 au cours des séchages mentionnés plus haut.

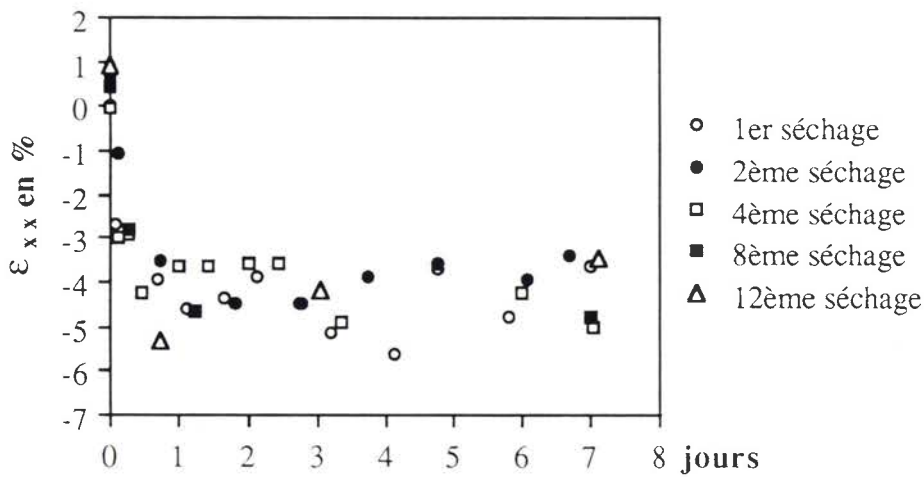
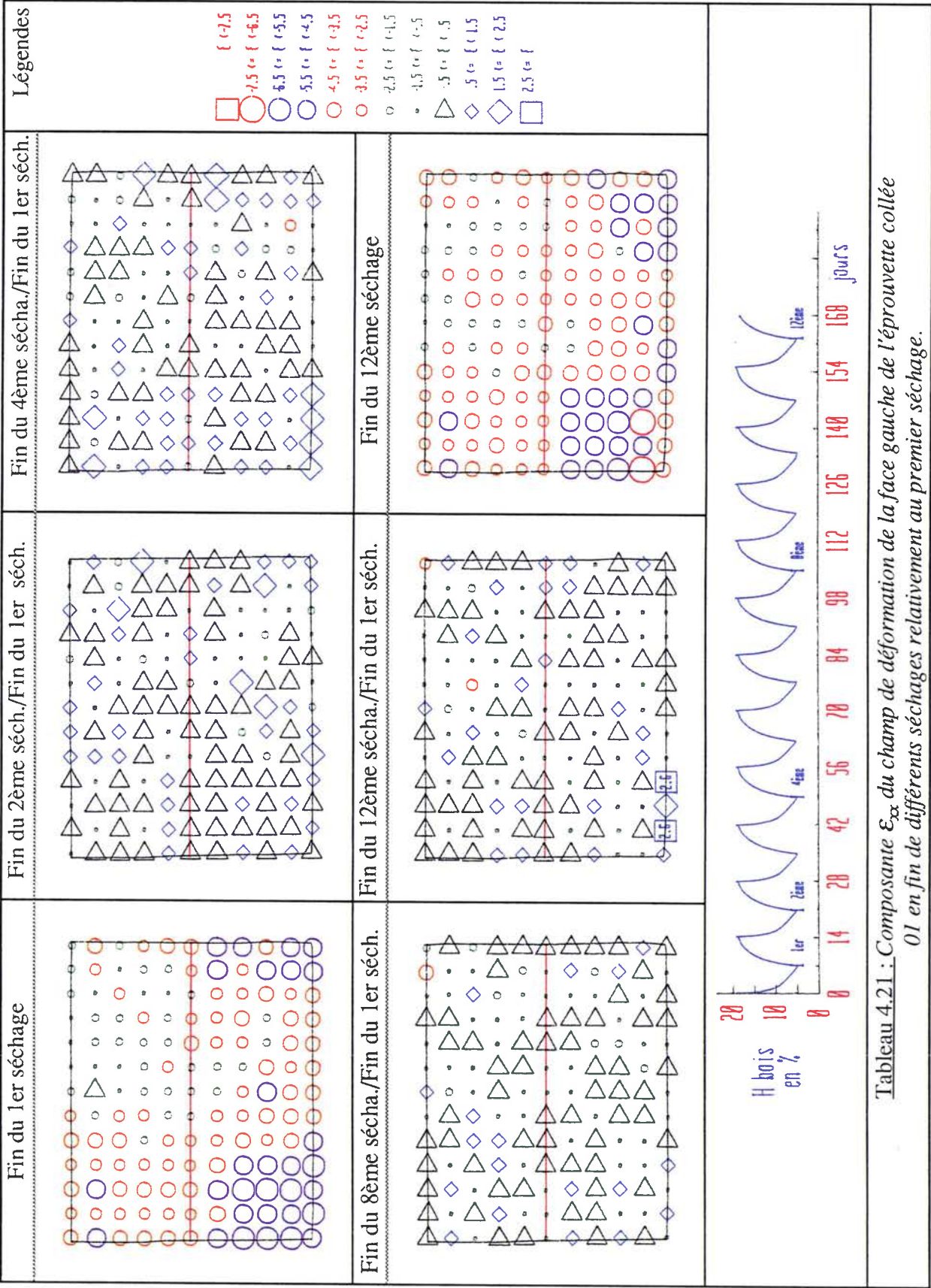


Figure 4.40 : Variations de la composante ϵ_{xx} au cours de cinq séchages au point origine du joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette 01.

Nous constatons que la valeur de la déformation est stabilisée en une journée au bord de l'éprouvette. Tenant compte de la dispersion des résultats, les valeurs stabilisées comprises entre -3 et -6 % sont équivalentes : aucune tendance à une augmentation ou une diminution de la valeur terminale au cours des séchages n'est décelée.



Les courbes des fréquences relatives des valeurs de la composante en fin de séchages de la figure 4.40 sont confondues pour la face Gauche de l'éprouvette 01 (voir la figure 4.41).

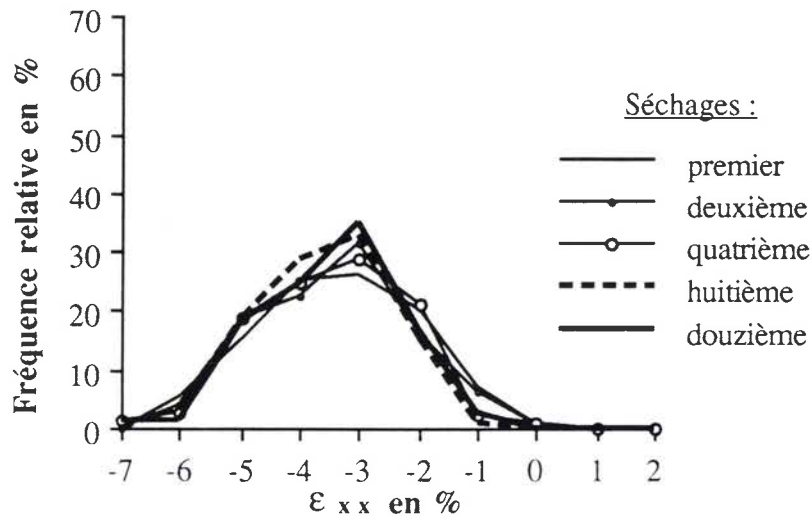


Figure 4.41 : Fréquences relative de la valeur de la composante ϵ_{xx} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours de douze séchages.

Les courbes du profil de la déformation sur le joint de colle de l'éprouvette 01 de la figure 4.42 en fin de ces séchages sont également confondues.

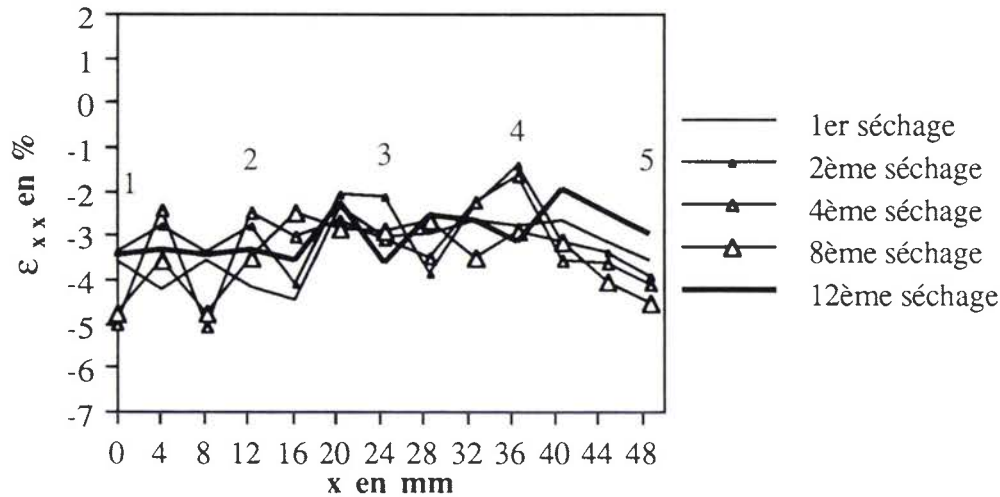


Figure 4.42 : Profil de la composante ϵ_{xx} au cours de cinq séchages en 13 points régulièrement répartis sur le joint de colle sur la face Gauche de l'éprouvette 01.

Si nous considérons la valeur moyenne de la composante sur la face Gauche des éprouvettes au fil des séchages, nous voyons sur la figure 4.43 qu'elle a légèrement diminué.

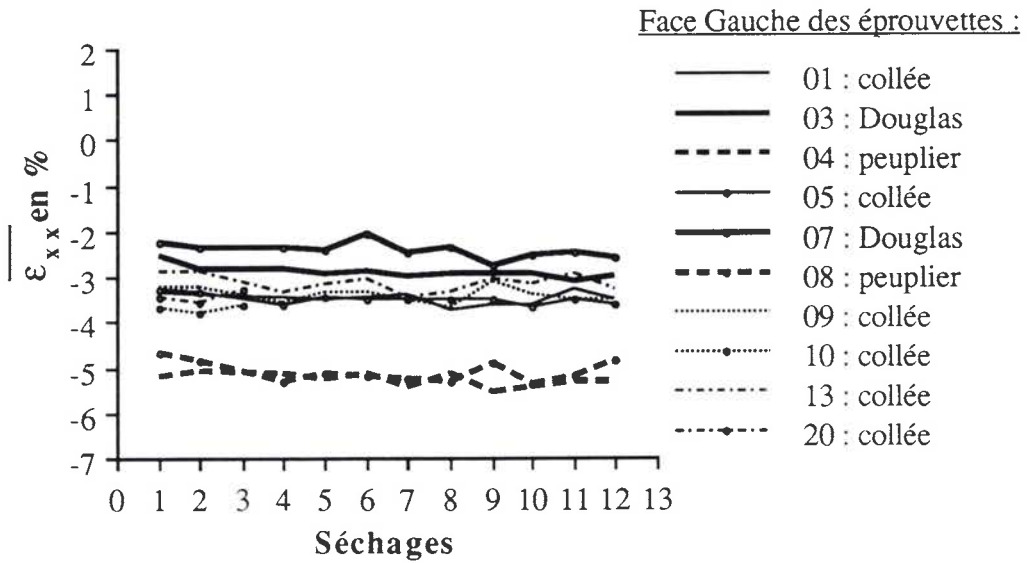


Figure 4.43 : Valeurs moyennes de la composante ε_{xx} sur les face Gauche des éprouvettes au cours des douze séchages.

Les écart-types associés ont tendance à augmenter faiblement (voir la figure 4.44). Ces variations sont peu significatives en douze cycles.

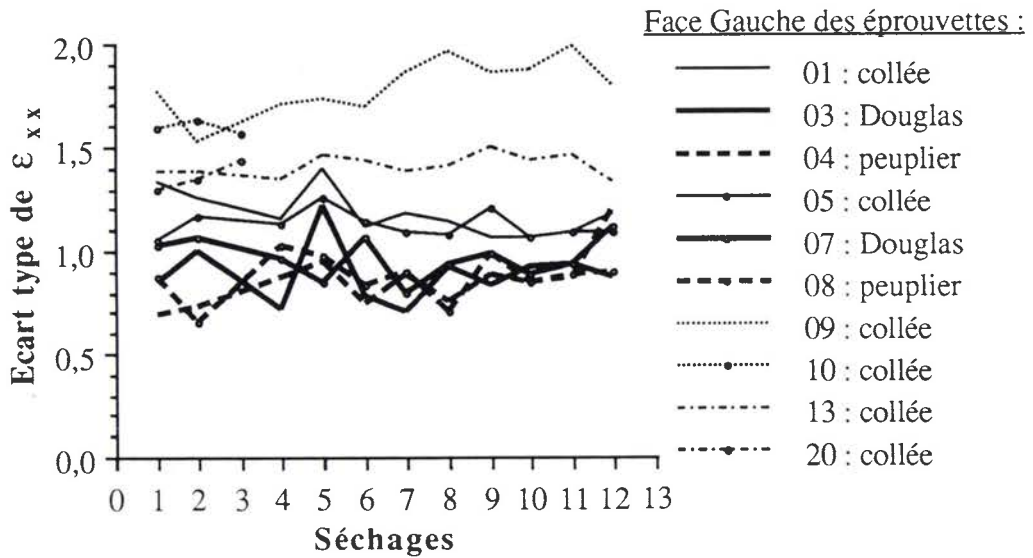


Figure 4.44 : Ecart-types de la composante ε_{xx} sur la face Gauche des éprouvettes au cours des douze séchages.

Le tableau 4.22 présente la composante ϵ_{yy} du champ de déformation de la face gauche de l'éprouvette 01 au cours des mêmes séchages. Nous représentons comme précédemment la différence en chaque point entre la valeur aux 2ème, 4ème, 8ème, 12ème séchages et la valeur au premier séchage et les champs de déformation aux 1er et 12ème séchages.

Les remarques concernant les résultats du tableau 4.21 s'appliquent aussi ici. L'examen de la représentation des champs de déformation des faces des éprouvettes non collées montrent qu'il n'y a pas non plus d'évolution importante des valeurs et de leur répartition.

La courbe de la figure 4.45 représente la variation de la déformation ϵ_{yy} au point origine du joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette 01 toujours au cours des mêmes séchages.

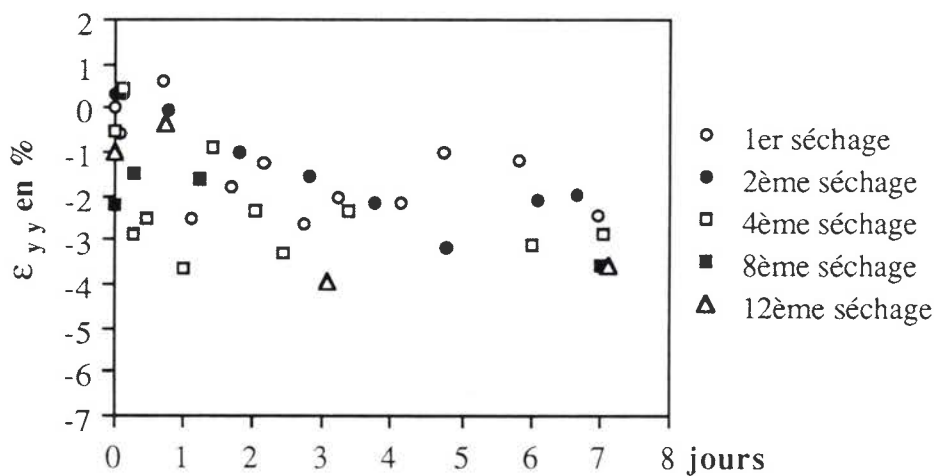
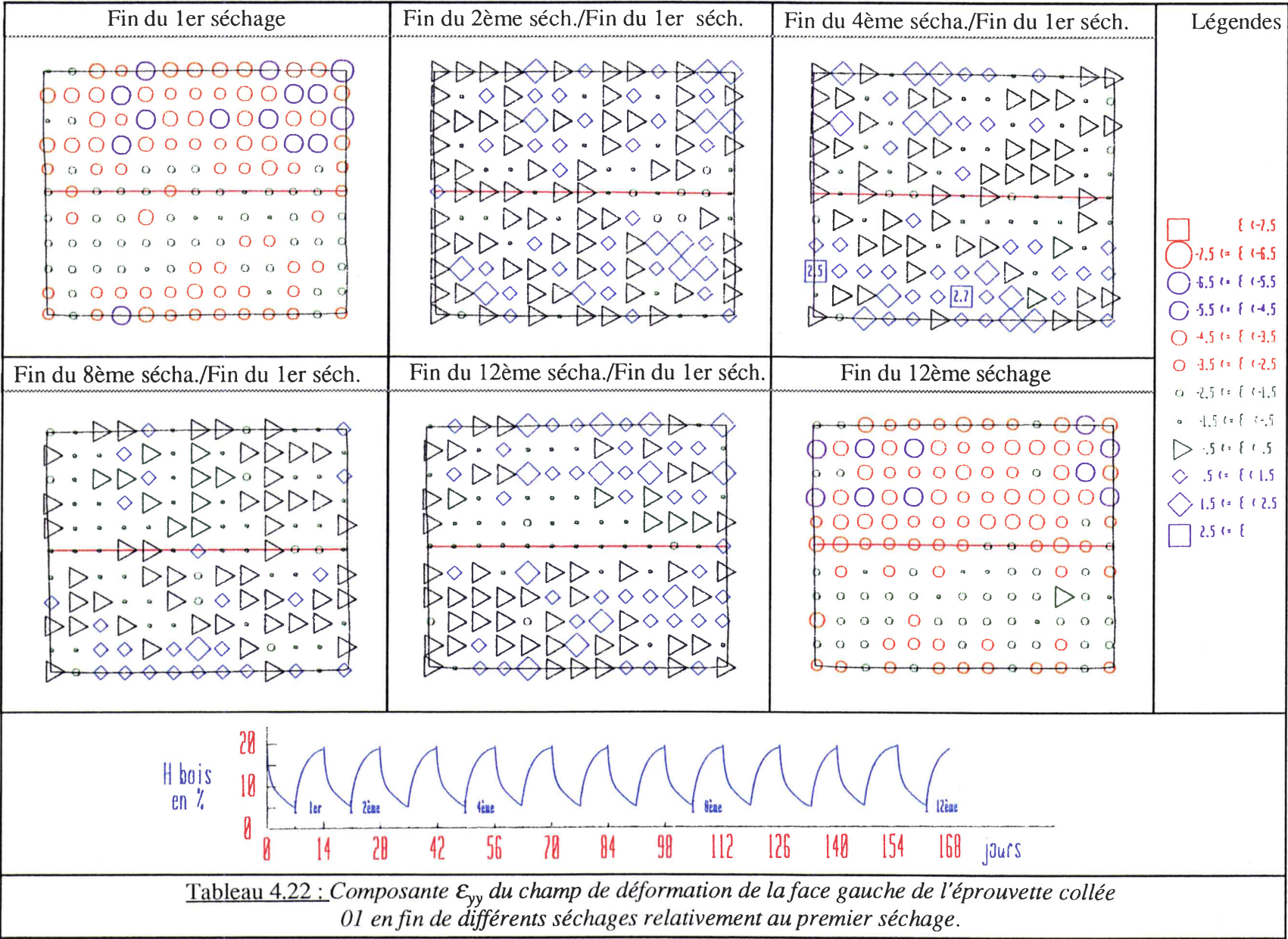


Figure 4.45 : Variations de la composante ϵ_{yy} au cours de cinq séchages au point origine du joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette 01.

La valeur de la déformation est stabilisée à partir du temps $t = 2$ jours comme pour ϵ_{xx} . La dispersion des résultats est plus importante que pour ϵ_{xx} mais l'amplitude 3,5 % de variation des valeurs entre -0,5 et -4 % est du même ordre que l'amplitude 3 % pour les valeurs de ϵ_{xx} entre -3 et -6 %. Aussi nous considérons les valeurs stabilisées au delà de deux jours comme équivalentes, sans évolution.



Les courbes des fréquences relatives de la valeur de la composante ϵ_{yy} sur la face Gauche de l'éprouvette 01 montre la reproduction du même état au cours des séchages (voir la figure 4.46).

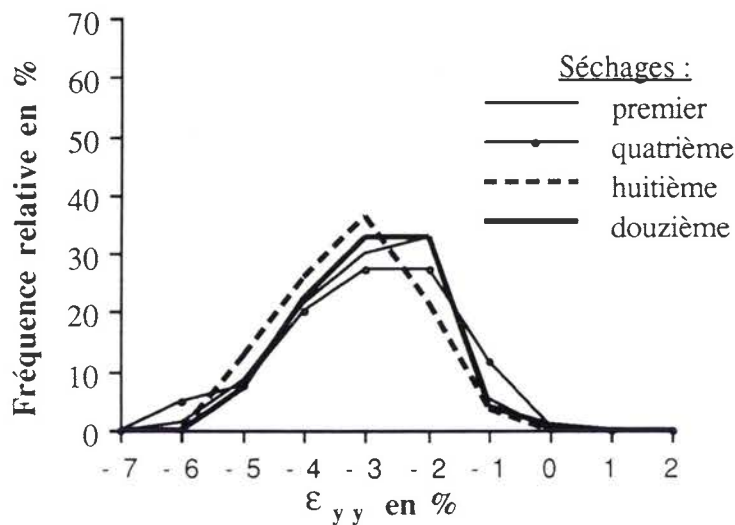


Figure 4.46 : Valeurs relatives de la composante ϵ_{yy} sur la face Gauche de l'éprouvette collée 01 au cours des séchages.

Les courbes du profil de la composante ϵ_{yy} du champ de déformation sur le joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette 01 de la figure 4.47 en fin de ces séchages présentent une bonne reproductibilité de l'état de déformation.

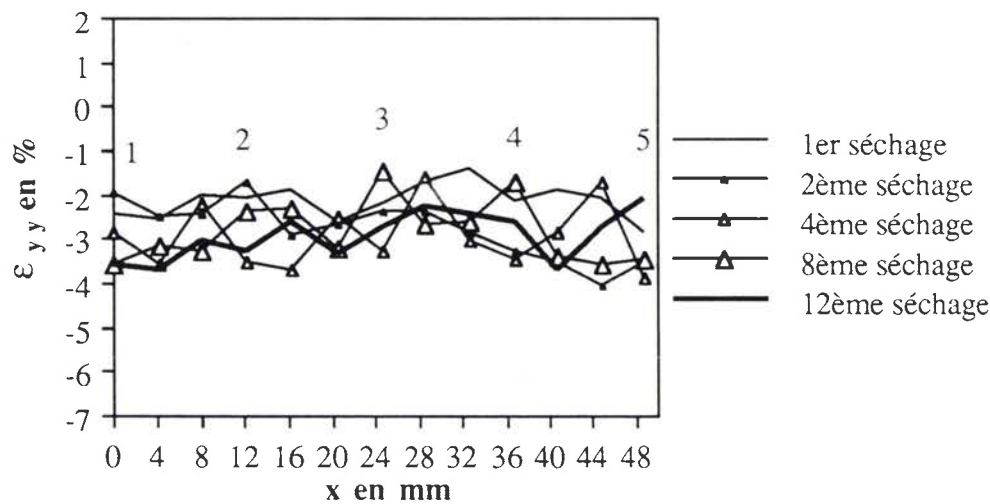


Figure 4.47 : Profil de la composante ϵ_{yy} au cours de cinq séchages en 13 points régulièrement répartis sur le joint de colle sur la face Gauche de l'éprouvette 01.

Pour toutes les éprouvettes, la valeur moyenne de la composante ϵ_{yy} a augmenté légèrement à l'inverse de celle de la composante ϵ_{xx} (voir la figure 4.48). Les valeurs de l'écart-type sont restées constantes.

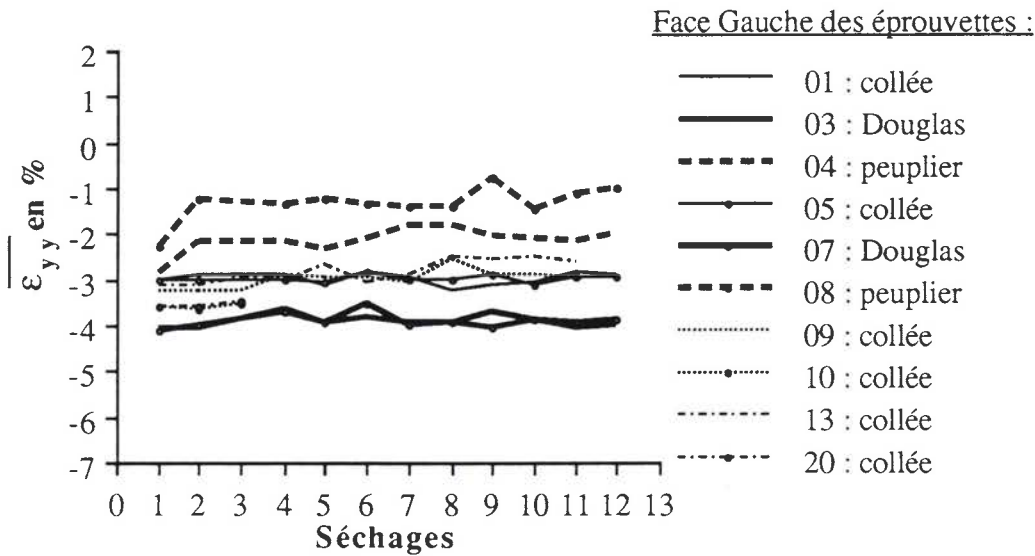


Figure 4.48 : Valeur moyenne de la composante ϵ_{yy} sur la face Gauche des éprouvettes au cours des séchages.

La fréquence relative des valeurs de la composante de cisaillement reste remarquablement stables (voir la figure 4.49).

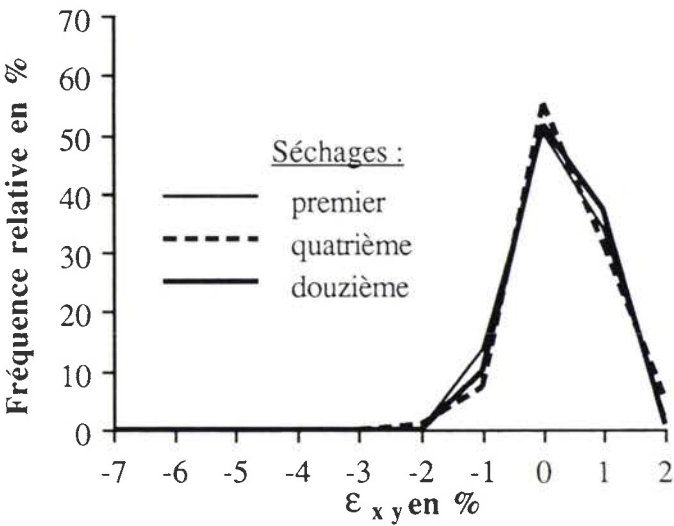


Figure 4.49 : Fréquences relatives de la composante de cisaillement sur la face Gauche de l'éprouvette 01 au cours des séchages.

Les valeurs restent de signe opposés sur les deux faces des éprouvettes (voir la figure 4.50).

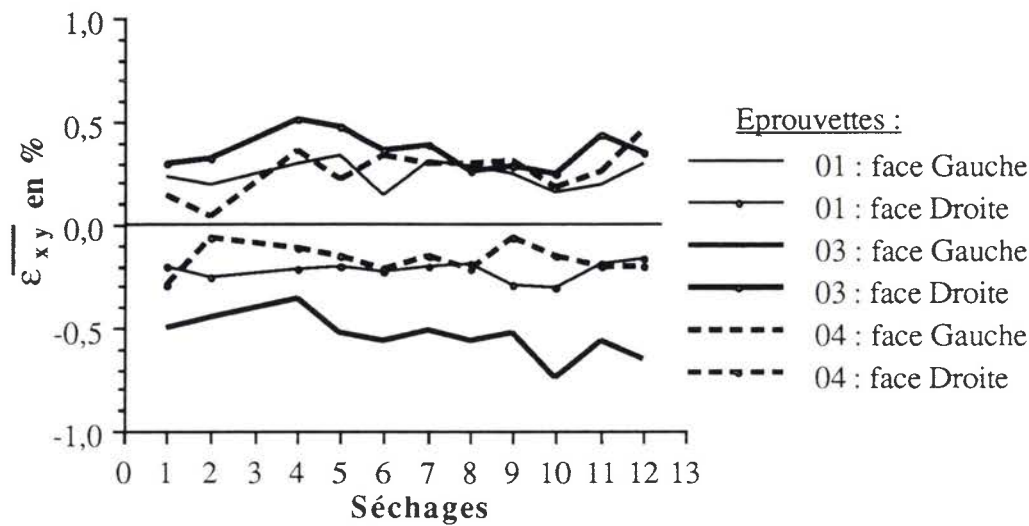


Figure 4.50 : Valeur moyenne de la composante de cisaillement sur les faces Gauche et Droite des éprouvettes 01, 03 et 04 au cours des séchages.

On peut trouver une corrélation entre les valeurs moyennes du cisaillement (voir la figure 4.51):

- les éprouvettes de Douglas sont les plus cisillées et la valeur moyenne du cisaillement croit,
- les valeurs des deux éprouvettes collées 01 et 05 sont assez proches,
- les valeurs sont pratiquement nulles pour les autres éprouvettes collées.

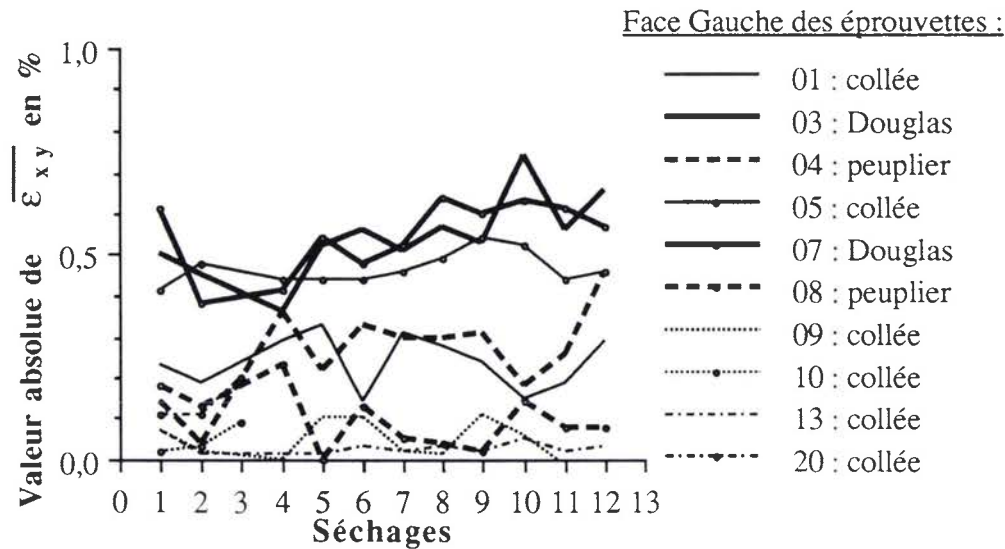


Figure 4.51 : Valeur absolue de la composante de cisaillement sur la face Gauche des éprouvettes au cours des séchages.

4.10. Evolution du champ de déformation à l'état humide.

Après l'étude des états de déformation en fin de séchages, nous examinons ceux des fins d'humidification qui présentent moins d'intérêt concernant l'apparition des fissures et leur détection.

Le tableau 4.23 présente la composante ϵ_{xx} du champ de déformation de la face gauche de l'éprouvette 01 au cours d'humidifications successives. Nous représentons la différence en chaque point entre la valeur aux 2ème, 4ème, 8ème, 11ème humidifications et la valeur à la première humidification ainsi que les champs de déformation aux 1ère et 11ème humidifications.

Les différences de valeurs en chaque point sont beaucoup moins sensibles que dans le cas des séchages successifs. Nous retrouvons au fil des humidifications l'état de déformation à la première humidification, équivalent à l'état initial en humidité stabilisée haute.

La courbe de la figure 4.52 représente la variation de la composante ϵ_{xx} du champ de déformation au point origine du joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette 01 au cours des humidifications mentionnées auparavant.

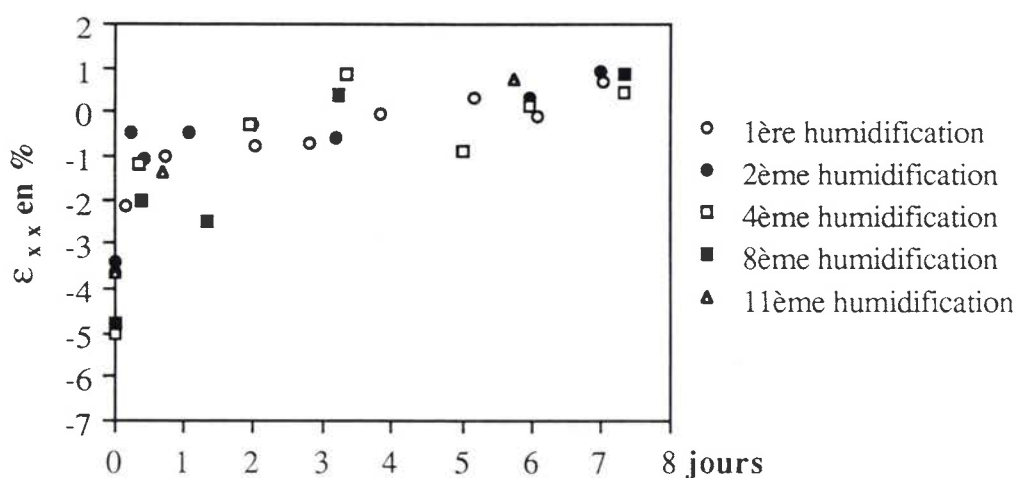
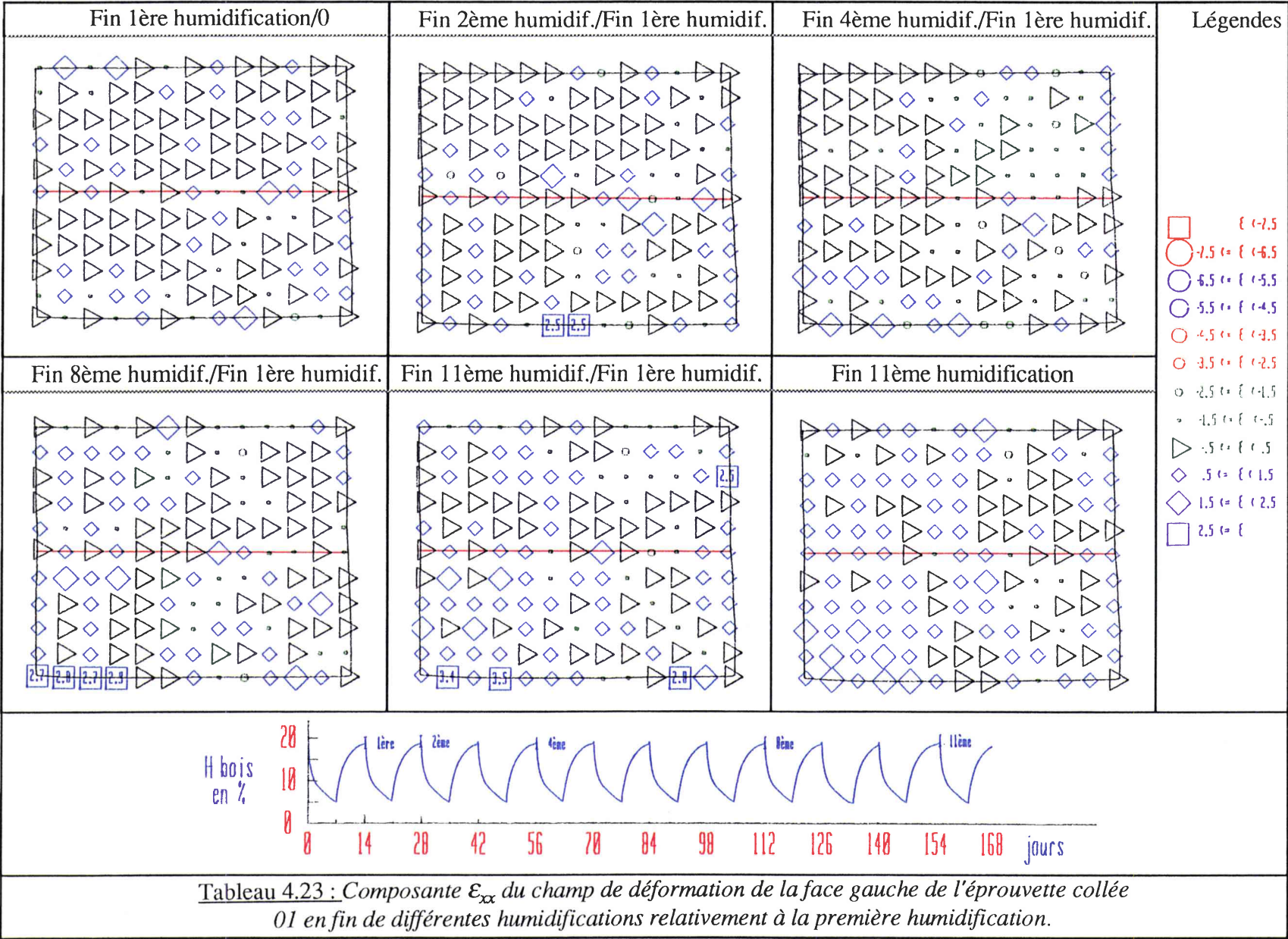


Figure 4.52 : Variations de la composante ϵ_{xx} au cours de cinq humidifications au point origine du joint de colle de la face Gauche de l'éprouvette 01.

Avec une plus grande dispersion des valeurs qu'aux séchages nous retrouvons que la stabilisation des variations de la déformation en ce point estimée à deux journées au cours de la première humidification s'est perpétuée. Les valeurs stabilisées comprises entre -1 et +1 % sont équivalentes et l'amplitude de dispersion de 2 % est plus faible que pour les séchages.

Les courbes de fréquence relative des valeurs de la composante sont superposées sur chaque face. Les valeurs moyennes sur toutes les faces sont du même ordre de grandeur, proche de 0. La valeur des écart-types oscille autour de 0,8, soit une valeur plus faible que la valeur moyenne des écart-types de fin de séchages.



De même les courbes du profil de la déformation sur le joint de colle de la figure 4.53 en fin de ces humidifications ne montrent pas d'évolution en intensité, comme dans le cas des séchages. Les valeurs avoisinent ici 0 %.

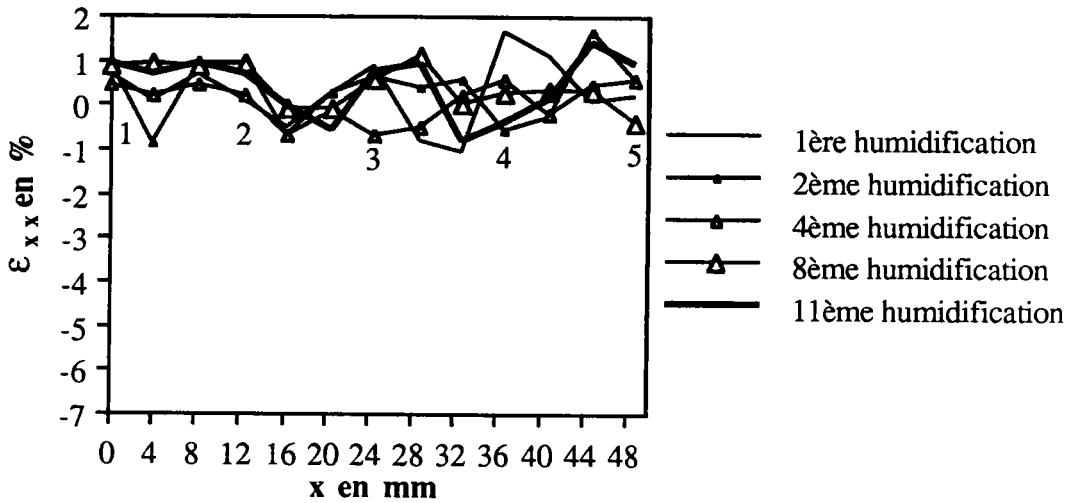


Figure 4.53 : Profil de la composante ϵ_{xx} au cours de cinq humidifications en 13 points régulièrement répartis sur le joint de colle sur la face Gauche de l'éprouvette 01.

Pour la composante ϵ_{xx} , les mêmes observations sont faites sur les diverses représentations. L'éprouvette de peuplier 08, sur laquelle la valeur moyenne de la composante était la plus faible en fin de séchages (voir la figure 4.48), est en tension en fin d'humidification et la dispersion des valeurs est deux fois plus importante. Cette éprouvette a présenté du tuilage irréversible dès le premier séchage.

Les valeurs en des points particuliers ou les valeurs moyennes de la composante ϵ_{xy} oscillent autour de 0, avec un écart-type inférieur à 0,5. La dispersion de ces valeurs est faible.

On peut considérer qu'à chaque fin d'humidification, les éprouvettes retrouvent leur état de déformation initial en atmosphère humide.

4.11. Conclusions.

Au cours des séchages et des humidifications successives, la désorption et l'adsorption d'eau par les éprouvettes se sont reproduites de façon identique, sans modification appréciable de la cinétique des transferts d'eau.

Les déplacements des points des surfaces RT des différentes éprouvettes sont symétriques par rapport à la médiane verticale de ces surfaces. L'amplitude de ces déplacements est plus grande sur les faces des pièces de Douglas que sur celles de peuplier, ce qui est conforme au choix des débits des pièces et aux essences utilisées.

A partir des valeurs expérimentales des composantes du tenseur des déformations en chaque point de mesure, de leur valeur moyenne et de l'écart-type à un instant donné sur une face

et de leurs diverses représentations à des instants particuliers, nous obtenons une description de l'évolution de la déformation des surfaces.

La valeur d'une composante dépend de l'orientation du quadruplet et de sa taille. Si l'orientation est fixée arbitrairement, l'influence de la taille porte sur l'homogénéité du champ de déformation calculé. La plus petite taille provoque l'apparition d'hétérogénéités qui n'ont pu être reliées à la structure macroscopique du bois, la plus grande uniformise les valeurs, faisant apparaître le matériau plus homogène qu'il n'est. Le choix s'est reporté sur la taille intermédiaire.

La variabilité du comportement sur une même pièce est négligeable et entre éprouvettes de même nature peu sensible, les densités étant proches. Ce qui permet de disposer de plus de données pour caractériser le comportement d'une pièce de Douglas et de peuplier, et leur assemblage collé.

Les représentations globales permettent un suivi qualitatif et quantitatif au cours d'un séchage ou d'une humidification, pourvu qu'on dispose d'un nombre d'enregistrements d'images des faces déformées suffisant. En utilisant également les autres représentations, nous avons déterminé que les valeurs des trois composantes du tenseur de déformation étudiées, en certains points, ou leur valeur moyenne sur une face, se stabilisaient entre 1 jour (pour les bords) et 2 jours (pour l'intérieur) au séchage, contre deux jours et plus à l'humidification, alors que l'humidité de la pièce varie encore.

Les dégradations du matériau engendrées ont été constatées au début du premier séchage, ce qui correspond aux résultats obtenus.

Les mêmes valeurs des composantes ont ensuite été retrouvées lorsque les mêmes conditions hygrométriques ont été rétablies. L'altération des éprouvettes ne s'est pas poursuivie à l'issue du premier séchage.

L'influence du collage est mise en évidence par les représentations globales, avec la diminution des amplitudes des valeurs près du joint de colle par rapport aux endroits comparables des pièces non collées.

CONCLUSION

Conclusion

La durabilité du matériau bois et des assemblages collés d'une même essence est largement étudiée par des essais de fluage et des essais mécaniques statiques sur des pièces ayant vieilli naturellement ou de façon accélérée. La résistance des matériaux et la mécanique de la rupture permettent de quantifier le comportement des pièces au cours du temps. Les collages avec un adhésif de type résorcine, additionné de phénol et de formol, sont extrêmement durables. Quelques soient les conditions de sollicitations hygrothermiques utilisées et les essences, ils conservent mieux que les autres adhésifs leurs propriétés mécaniques. L'étude du phénomène de fatigue d'origine hygroscopique n'a pas été abordée en particulier.

La faisabilité du collage de deux essences différentes avec la résine résorcine a été établie par des essais mécaniques statiques. La durabilité de ce collage a été établie à moyen terme par des essais de fluage avec vieillissement en atmosphère contrôlée.

Des modélisations tridimensionnelles par la méthode des éléments finis de la diffusion de l'eau et de la chaleur dans le bois, du comportement mécanique prenant en compte la structure du bois et les phénomènes diffusifs, permettent une description de la réaction d'un élément de structure à des sollicitations hygrothermomécaniques.

Les moyens de mesure des déplacements sur la surface des éprouvettes sollicitées, qui donnent accès après dépouillement par la résistance des matériaux ou la mécanique de la rupture aux déformations et aux contraintes, sont généralement ponctuels et par contact. Ils sont simples et sont appliqués sur un nombre conséquent d'éprouvettes ce qui permet un traitement statistique des résultats. Quelques méthodes optiques particulières permettent une mesure globale à distance des déplacements sur une surface, mais leur utilisation ne concerne que quelques éprouvettes à la fois, le dépouillement nécessitant des calculs informatiques importants pour accéder aux contraintes via les déformations.

Pour déterminer l'apparition du phénomène de fatigue hygroscopique sur un élément collé en essences mélangées, nous avons développé une méthode simplifiée de mesure globale des déformations dans le plan RT d'un collage quartier sur dosse. Plusieurs éprouvettes constituées de pièces de Douglas débitées sur quartier et de peuplier débitées sur dosse, collées et non collées, ont été soumises uniquement à des variations cycliques d'humidité. Les photographies des faces, marquées avec réseau à maille carrée tracé par faisceau laser, prises régulièrement ont permis une visualisation globale des déformations en continu.

Le phénomène de fatigue hygroscopique n'a pas été mis en évidence au cours des essais qui ont été menés. Les valeurs des déformations mesurées n'ont pas été reliées à l'apparition de fissures importantes traduisant la rupture des assemblages collés. Ces valeurs dépendent de la taille de la zone sur laquelle les calculs sont effectués. La précision de la méthode de dépouillement ne permet pas de mettre en évidence une relation avec l'organisation orthotrope du matériau. La valeur de la déformation dépend également de la direction dans laquelle on la mesure.

Cette méthode de mesure est cependant simple à mettre en oeuvre et améliorée peut avoir certaines applications intéressantes :

- en réalisant des réseaux identiques sur des éprouvettes identiques : des points totalement comparables sur de nombreuses éprouvettes semblables, permettront d'effectuer des calculs statistiques et de vérifier la validité des modélisations par éléments finis aux mêmes points. L'application à toutes les surfaces de l'éprouvette est envisageable,

Conclusion

- en utilisant l'enregistrement d'image par caméra vidéo : l'image est digitalisée directement et avec la lisibilité du réseau inscrit un logiciel de traitement d'image doit permettre une détermination rapide des coordonnées des points,
- en augmentant la résolution : si elle est meilleure, l'influence des cernes peut alors être mise en évidence,
- en considérant les déformations d'une pièce collée à celles de la pièce équivalente non collée pour mettre en évidence l'influence du collage

La période des cycles semble appropriée à cette étude mais il faut augmenter le nombre de cycles en soumettant les pièces à des sollicitations hygrothermiques d'amplitude plus importante, pour vérifier les variations faibles relevées.

Cette méthode doit permettre de trouver des relations entre les déformations et la densité locale, et également avec l'humidité.

REFERENCES

Références

- (1) Jozsef BODIG, Benjamin A. JAYNE
Mechanics of Wood and Wood Composites
Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York. ISBN 0-442-00822-8.
1982
- (2) Daniel GUITARD
Mécanique du matériau bois et composites.
Cepadues. Ed. Toulouse
1987
- (3) Jean-Marc BIRGINIE
Etude du comportement de l'interface des collages sur bois (pin maritime) en fonction de l'environnement.
Thèse de Doctorat Mécanique. Université de Bordeaux I.
1988
- (4) José NODA
Expériences de fatigue hygroscopique sur bois collé
Rapport de DEA en Sciences du Bois
Laboratoire de Fiabilité Mécanique. Faculté des Sciences. Université de Metz
1985
- (5) WOODHANDBOOK : Wood as an engineering material.
Agriculture Handbook 72. Washington D.C.
U.S. department of Agriculture.
1987
- (6) C.C. GERHARDS
Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood : an analysis of immediate effects.
Wood and Fiber Science, ISSN 0735-6161, USA, DA.
Journal of the Society of Wood and Science Technology.
Volume 14, n° 1.
Pages 4-36, 48 références bibliographiques.
1982
- (7) Christian SALES
Contribution à l'analyse des contraintes de séchage dans le bois.
Thèse de Docteur-Ingénieur. Sciences du Bois. Institut National Polytechnique de Lorraine.
1984
- (8) H.P. STOHR
Shrinkage differential as a measure for drying stress determination.
Wood Science and Technology, volume 22, n° 2
Pages 121-128, 8 références bibliographiques.
1988

(9) W. MOLINSKI, J. RACZKOWSKI

Mechanical stresses generated by water adsorption in wood and their determination by tension creep measurements.

Wood Science and Technology, volume 22, n° 3.

Pages 193-198, 16 références bibliographiques.

1988

(10) A. DROIN-JOSSERAND, J.L. TAVERDET, J.M. VERGNAUD

Modelling the process of moisture absorption in three dimensions by wood samples of various shapes : cubic, parallelepipedic.

Wood Science and Technology, volume 23, n° 3.

Pages 259-271, 19 références bibliographiques.

1989

(11) P. CASTERA

Comportement mécanique d'une pièce de bois soumise à des gradients évolutifs d'humidité.

Actes du Colloque Scientifique Européen : Comportement Mécanique du Bois.

Organisé par le Groupement Scientifique Rhéologie du Bois. 8 et 9 Juin 1988. Bordeaux.

Pages 190-200, 5 références bibliographiques.

1988

(12) Jean-Michel MOULIN

Etude d'un nouveau composite à base de bois renforcé par fibre de verre : le L.C.R. (Lamellé Collé Renforcé).

Thèse de Doctorat. Université de Metz.

1989

(13) P. JODIN, P. BOUTTER, G. PLUVINAGE

Comportement mécanique de poutres en bois lamellé-collé en essences mélangées.

Actes du Colloque Scientifique Européen : Comportement Mécanique du Bois.

Organisé par le Groupement Scientifique Rhéologie du Bois. 8 et 9 Juin 1988. Bordeaux.

Pages 434-442, 6 références bibliographiques.

1988

(14) Peer HALLER

Mesure de la ténacité du bois collé. Modélisation de la ténacité par l'intermédiaire de la méthode des éléments finis et la mécanique de la rupture.

Thèse de Doctorat. Mécanique et Energétique. Institut National Polytechnique de Lorraine.

1987

(15) Erik RAKNES

Durability of structural wood adhesives after 15 years aging.

Industrial & Engineering Chemistry Product Research & Development, volume 22, n° 4.

Pages 662-664, 12 références bibliographiques.

1983

(16) George G. MARRA

The role of adhesion and adhesives in the wood products industry.

Adhesives for Wood. Research, Applications and Needs.

Park Ridge, New Jersey USA : Noyes Publications.

Pages 2-9, 20 références bibliographiques.

1984

(17) Buhnum KYOKONG, Frederick.J. KEENAN, Stephen.J. BOYD
Fracture behavior of adhesive joints in poplar.
Wood and Fiber Science, ISSN 0735-6161, USA, DA.
Journal of the Society of Wood and Science Technology.
Volume 18, n° 4.
Pages 499-525, 36 références bibliographiques.
1986

(18) Robert H. GILLESPIE
Evaluating durability of adhesive bonded wood joints.
Adhesives for Wood. Research, Applications and Needs.
Park Ridge, New Jersey USA : Noyes Publications.
Pages 188-198, 23 références bibliographiques.
1984

(19) F.J. KEENAN, J.M. KRYLA, M.D. SANDOE
Strenth and durability of hot-press glued-laminated timber beams.
Canadian Journal of Civil Engineering, volume 8, n° 4.
Pages 509-518, 14 références bibliographiques.
1981

(20) B.H. RIVER, C.T. SCOTT, J.A. KOUTSKY
Adhesive joint fracture behavior during setting and aging.
Forest Products Journal, ISSN 0015-7473, volume 39, n°11/12, Nov/Déc 1989.
Pages 23-28, 17 références bibliographiques.
1989

(21) Michel BAILLY
A la vendéenne de protection des bois : valorisation du pin et du peuplier.
Nouveau J. Charpente Menuiserie Parquets, n° 4.
Pages 25-29.
1986

(22) American Society for Testing and Materials
Annual Book of ASTM Standards
Section 4. Construction.
Volume 04.09. Wood.
1983

(23) Dick CASTER
Correlation between exterior exposure and automatic boil test. Results.
Adhesives for Wood. Research, Applications and Needs.
Park Ridge, New Jersey USA : Noyes Publications.
Pages 199-208, 4 références bibliographiques.
1984

(24) Charles B. WICK
Exterior and accelerated aging of an acid-phenolic molding resin in R-F cured Douglas-fir joints.
Forest Products Journal, ISSN 0015-7473, volume 37, n°10, October 1987.
Pages 43-48, 6 références bibliographiques.
1987

(25) G.C. SIH, J.G. MICHPOULOS, S.C. CHOU

Hygrothermoelasticity

Martinus Nijhoff Publishers, P.O. BOX 163, 3300 AD Dordrecht, The Netherlands.

1986

(26) C. HUET

Quelques aspects du comportement thermo-hygro-visco-élastique du bois.

Actes du Colloque Scientifique Européen : Comportement Mécanique du Bois.

Organisé par le Groupement Scientifique Rhéologie du Bois. 8 et 9 Juin 1988. Bordeaux.

Pages 104-118, 25 références bibliographiques.

1988

(27) J. MUKUDAI, S. YATA

Verification of Mukudai's mechano-sorptive model.

Wood Science and Technology, volume 22, n° 1

Pages 43-58, 10 références bibliographiques.

1988

(28) Jean AVRIL

Encyclopédie d'analyse des contraintes

Micromesures.

98 boulevard Gabriel-Péri

92240 MALAKOFF - FRANCE

1984

(29) Gershon YANIV, Gus PEIMANDIS, Isaac M. DANIEL

Method for hygromechanical characterization of graphite/epoxy composite.

Journal of Composites Technology and Research, ISSN 0884-6804, volume 9, n°1

Pages 21-25, 8 références bibliographiques.

1987

(30) Yuh J. CHAO, Michael A. SUTTON

Measurement of strains in a paper tensile specimen using computer vision and digital image correlation. Part 2 : Tensile specimen test.

Tappi Journal, April 1988, volume 71, n° 4.

Pages 153-156, pas de références bibliographiques.

1988

(31) M.A. SUTTON, Y.J. CHAO

Measurements of strains in a paper tensile specimen using computer vision and digital image correlation. Part 1 : Data acquisition and image analysis system.

Tappi Journal, March 1988, Vol 71, n° 3.

Pages 173-175, 8 références bibliographiques.

1988

(32) J. DESRUES

Sur l'application de la stéréophotogrammétrie à la mesure des grandes déformations.

Revue Française de Mécanique, n° 1983-3

Pages 55-63, 8 références bibliographiques.

1983