

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES COUPLAGES MÉCANOSORPTIFS DANS LE BOIS SOUMIS À VARIATIONS HYGROMÉTRIQUES CONTRÔLÉES SOUS CHARGEMENTS DE LONGUE DURÉE

THÈSE N° 1526 (1996)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DES MATÉRIAUX

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

Valérie PITTET

Ingénieur, Ecole Polytechnique Féminine, Sceaux, France
de nationalité française

acceptée sur proposition du jury:

Prof. C. Huet, directeur de thèse
M. F. Feiereisen, corapporteur
Prof. P. Morlier, corapporteur
Dr P. Navi, corapporteur
Prof. J.-L. Sandoz, corapporteur

Lausanne, EPFL
1996

A Christophe...

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été effectué au Laboratoire de Matériaux de Construction du Département des Matériaux de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Je tiens à adresser tous mes remerciements à son directeur, Monsieur le Professeur Christian Huet, pour m'y avoir accueillie, suivie et avoir mis à ma disposition tous les outils de travail nécessaires à la réalisation de cette étude.

J'adresse également mes plus vifs remerciements au Dr. Parviz Navi, pour les nombreuses discussions que nous avons pu avoir, ainsi que pour son perpétuel soutien et intérêt tout au long de ces années de travail. Par sa propre et constante motivation sur le sujet du bois, il a su aider à la contribution et à l'achèvement de ce travail.

C'est avec grand plaisir que je remercie Messieurs Vulliemin et Vuong, d'une part pour la collaboration à la partie expérimentale et la mise au point de la cellule hygrothermique, d'autre part pour la coupe des éprouvettes. Je suis également reconnaissante aux Drs. Hazanov et Guidoum pour les nombreuses discussions que nous avons eues sur la partie théorique.

Enfin, c'est tous les collaborateurs du LMC que je remercie chaleureusement pour leur contribution, directe ou indirecte, à ce travail.

Je remercie les Professeurs J.-L. Sandoz, P. Morlier, H.H. Kausch et Monsieur F. Feiereisen d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Pour terminer, je remercie le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique (FNS) ainsi que le COST 508 pour leur soutien financier, qui a permis la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

Version abrégée	15
Abstract	16
Notations	17
INTRODUCTION	19

PARTIE I: CONTEXTE DE L'ÉTUDE

CHAPITRE I.1: DONNÉES SUR LE MATÉRIAU	23
I.1.1 INTRODUCTION	23
I.1.2 LE MATÉRIAU BOIS	23
I.1.2.1 MICROSTRUCTURE	23
I.1.2.2 ULTRASTRUCTURE	25
I.1.2.3 COMPOSITION CHIMIQUE	26
CHAPITRE I.2: LES EFFETS MÉCANOSORPTIFS	29
I.2.1 INTRODUCTION	29
I.2.2 MISE EN ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE	29
I.2.3 HYPOTHÈSES PROPOSÉES SUR L'EXPLICATION DU PHÉNOMÈNE	40
I.2.3.1 NIVEAU DE LA STRUCTURE DU BOIS	40
I.2.3.1.1 Hypothèse de Boyd	40
I.2.3.1.2 Hypothèse de Mukudai et Yata	43
I.2.3.1.3 Hypothèse de Hoffmeyer et Davidson	45
I.2.3.2 NIVEAU MACROMOLÉCULAIRE	46

I.2.3.2.1 Rupture et reformation des liaisons hydrogène	46
I.2.3.2.2 Hypothèse de Bazant	46
I.2.4 MODÈLES DE LOIS DE COMPORTEMENT PROPOSÉS	47
I.2.4.1 Modèle de Leicester	48
I.2.4.2 Modèle de Ranta-Maunus	48
I.2.4.3 Modèle de Hunt	49
I.2.4.4 Modèle de Toratti	50
I.2.4.5 Modèle de Bazant	51
I.2.4.6 Modèle de Van der Put	52
I.2.4.7 Modèle de Gril	53
I.2.4.8 Modèle de Mukudai et Yata	54
I.2.5 CONCLUSION	55

PARTIE II: ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE II.1: PROGRAMME D'EXPÉRIMENTATION 59

II.1.1 INTRODUCTION 59

II.1.2 PLAN D'EXPÉRIENCES 60

CHAPITRE II.2: PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL 69

II.2.1 INTRODUCTION 69

II.2.2 CARACTÉRISTIQUES DES ÉPROUVETTES 69

 II.2.2.1 CHOIX DES DIMENSIONS

 II.2.2.2 MODE OPÉRATOIRE DE LA PRÉPARATION
 DES ÉPROUVETTES

 II.2.2.3 DÉROULEMENT DES ESSAIS

II.2.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL 74

II.2.4 CONCLUSION 80

CHAPITRE II.3: ESSAIS PRÉLIMINAIRES	81
II.3.1 INTRODUCTION	81
II.3.2 MESURES DE CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES ET HYDRIQUES DES ÉPROUVETTES DE FAIBLE ÉPAISSEUR	81
II.3.2.1 CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES	82
II.3.2.2 CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES	85
II.3.3 CONCLUSION	90
CHAPITRE II.4: RÉPONSE DIFFÉRÉE SOUS CLIMAT CONSTANT	93
II.4.1 INTRODUCTION	93
II.4.2 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE	93
II.4.2.1 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION EFFECTUÉS À 22% D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR DEUX NIVEAUX DE SOLLICITATION	94
II.4.2.2 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION EFFECTUÉS À 75% D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR DEUX NIVEAUX DE SOLLICITATION	95
II.4.2.3 ESSAI DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION POUR UN MÊME NIVEAU DE SOLLICITATION, À DIVERS PALIERS D'HUMIDITÉ RELATIVE	96
II.4.3 ESSAIS DE RELAXATION-EFFACEMENT	98
II.4.3.1 ESSAIS DE RELAXATION-EFFACEMENT EFFECTUÉS À 30% D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR PLUSIEURS NIVEAUX DE SOLLICITATION	98
II.4.3.2 ESSAIS DE RELAXATION-EFFACEMENT EFFECTUÉS À 75% D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR PLUSIEURS NIVEAUX DE SOLLICITATION	100
II.4.4 CONCLUSION	102
CHAPITRE II.5: INTRODUCTION A L'ÉTUDE DE LA RÉPONSE DIFFÉRÉE SOUS CLIMAT VARIABLE	105

CHAPITRE II.6: OBSERVATION DE CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE LA RÉPONSE DIFFÉRÉE SOUS CLIMAT VARIABLE - ESSAIS DE FLUAGE ET RECOUVRANCE 107

II.6.1 ESSAI DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE SUR ÉPROUVETTE INITIALEMENT SÈCHE (STABILISÉE À UNE HUMIDITÉ ATMOSPHERIQUE DE 30%) 107

II.6.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI 107

II.6.1.2 DONNÉES COMPARATIVES 110

II.6.1.3 CONSTATATIONS 111

II.6.2 ESSAI DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION AVEC CYCLES DE VARIATIONS D'HUMIDITÉ RELATIVE SUR ÉPROUVETTE INITIALEMENT HUMIDE (STABILISÉE À UNE HUMIDITÉ ATMOSPHERIQUE DE 75%) 113

II.6.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI 113

II.6.2.2 DONNÉES COMPARATIVES 116

II.6.2.3 CONSTATATIONS 117

II.6.3 CONCLUSION 118

CHAPITRE II.7: INFLUENCE DU DÉLAI DE MISE EN ROUTE DES CYCLES D'HUMIDITÉ 121

II.7.1 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT SÈCHES AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE DÉBUTANT APRÈS 60 SECONDES, 10 MINUTES ET 3 HEURES (NIVEAU DE CHARGE DE 22%) 121

II.7.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI 121

II.7.1.2 DONNÉES COMPARATIVES 129

II.7.1.3 CONSTATATIONS 130

II.7.2 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT SÈCHES AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE DÉBUTANT APRÈS 5 MINUTES ET 45 HEURES (NIVEAU DE CHARGE DE 22%) 130

II.7.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI	130
II.7.2.2 DONNÉES COMPARATIVES	137
II.7.2.3 CONSTATATIONS	138
II.7.3 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT SÈCHES AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE DÉBUTANT APRÈS 7 MINUTES ET 45 HEURES (NIVEAU DE CHARGE DE 35%)	139
II.7.3.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI	139
II.7.3.2 DONNÉES COMPARATIVES	146
II.7.3.3 CONSTATATIONS	146
II.7.4 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT HUMIDES AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE DÉBUTANT APRÈS 20 MINUTES ET 64 HEURES (NIVEAU DE CHARGE DE 20%)	147
II.7.4.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI	147
II.7.4.2 DONNÉES COMPARATIVES	154
II.7.4.3 CONSTATATIONS	154
II.7.5 CONCLUSION	155

**CHAPITRE II.8: CLIMAT VARIABLE ET CHARGEMENTS
VARIABLES COMBINÉS: INFLUENCE
DES CYCLES D'HUMIDITÉ SUR LA
RÉPONSE SOUS CYCLES DE CHARGE 157**

II.8.1 CYCLES DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT SÈCHES AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR UN NIVEAU DE CHARGE DE 12%	157
II.8.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI	157
II.8.1.2 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX TROIS PARTIES DE CHARGE	161
II.8.1.3 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX DEUX PARTIES DE DÉCHARGE AVEC VARIATIONS HYDRIQUE	165

II.8.2 CYCLES DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT SÈCHES AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR UN NIVEAU DE CHARGE DE 22%	168
II.8.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI	168
II.8.2.2 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX TROIS PARTIES DE CHARGE	172
II.8.2.3 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX DEUX PARTIES DE DÉCHARGE AVEC VARIATIONS HYDRIQUE	176
II.8.3 COMPARAISON DES DEUX ESSAIS	179
II.8.3.1 PREMIÈRE PARTIE DE CHARGE	179
II.8.3.2 DEUXIÈME PARTIE DE CHARGE	183
II.8.3.3 PREMIÈRE PARTIE DE DÉCHARGE AVEC VARIATIONS HYDRIQUES	187
II.8.3.4 TROISIÈME PARTIE DE CHARGE	189
II.8.3.5 TROISIÈME PARTIE DE DÉCHARGE AVEC VARIATIONS HYDRIQUES	193
II.8.4 CONCLUSION	196

CHAPITRE II.9: INFLUENCE DES CYCLES D'HUMIDITÉ SUR LA RÉPONSE SOUS DÉCHARGES PARTIELLES 197

II.9.1 INFLUENCE DES CYCLES D'HUMIDITÉ SUR LA RÉPONSE SOUS DÉCHARGES PARTIELLES DE MÊME AMPLITUDE	197
II.9.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI	197
II.9.1.2 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX DEUX PARTIES DE CHARGE	202
II.9.1.3 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX CINQ PARTIES DE DÉCHARGE	204
II.9.2 INFLUENCE DES CYCLES D'HUMIDITÉ SUR LA RÉPONSE SOUS DÉCHARGES PARTIELLES D'AMPLITUDE CROISSANTE	209
II.9.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI	209
II.9.2.2 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX DEUX PARTIES DE CHARGE	214

II.9.2.3 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX CINQ PARTIES DE DÉCHARGE	216
II.9.3 CONCLUSION	221
CHAPITRE II.10: OBSERVATION DE CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE LA RÉPONSE DIFFÉRÉE SOUS CLIMAT VARIABLE - ESSAIS DE RELAXATION-EFFACEMENT	223
II.10.1 ESSAI DE RELAXATION-EFFACEMENT EN TRACTION AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE SUR ÉPROUVETTE INITIALEMENT SÈCHE (STABILISÉE À UNE HUMIDITÉ ATMOSPHÉRIQUE DE 30%)	223
II.10.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI	223
II.10.1.2 DONNÉES COMPARATIVES	226
II.10.1.3 CONSTATATIONS	227
II.10.2 ESSAI DE RELAXATION-EFFACEMENT EN TRACTION AVEC CYCLES DE VARIATIONS D'HUMIDITÉ RELATIVE SUR ÉPROUVETTE INITIALEMENT HUMIDE (STABILISÉE À UNE HUMIDITÉ ATMOSPHÉRIQUE DE 75%)	228
II.10.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI	228
II.10.2.2 DONNÉES COMPARATIVES	231
II.10.2.3 CONSTATATIONS	231
II.10.2 CONCLUSION	232
CHAPITRE II.11: RÉCAPITULATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS OBTENUS LORS DES ESSAIS	233
II.11.1 REMARQUES SUR LE DÉROULEMENT GÉNÉRAL DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS	233
II.11.2 CONSTATATIONS EN ACCORD AVEC LES TRAVAUX DE PRÉCÉDENTS AUTEURS	234
II.11.3 APPORTS NOUVEAUX DU TRAVAIL EFFECTUE	234

PARTIE III: MODÉLISATION ET SIMULATION DU COMPORTEMENT DU BOIS SOUS CLIMAT CONSTANT

SIMULATION DU COMPORTEMENT SOUS CLIMAT CONSTANT	241
III.1 INTRODUCTION	241
III.2 COMPORTEMENT A CLIMAT CONSTANT	241
III.2.1 FORMULATION FONCTIONNELLE	241
III.2.2 LA MÉTHODE DES VARIABLES INTERNES	243
III.2.3 AUTRES SPÉCIFICITÉS DE LA MÉTHODE	244
III.2.4 APPLICATION AU COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX	244
III.2.4.1 Éléments linéaires	245
III.2.4.2 Éléments non-linéaires	246
III.2.4.2.1 Patin à frottement sec	246
III.2.4.2.2 Viscosité non-newtonienne (élément d'Eyring)	246
III.2.4.3 Éléments à mémoire	247
III.3 APPLICATION AU MATÉRIAU BOIS	248
III.4 CONCLUSION	250
CONCLUSION	251
BIBLIOGRAPHIE	255
ANNEXE 1: PLAN DE LA CELLULE HYGROTHERMIQUE	265
ANNEXE 2: SCHÉMATISATION DE LA RÉGULATION DES CONDITIONS CLIMATIQUES DANS LA CELLULE	269
ANNEXE 3: BALANCE SETARAM	273
ANNEXE 4: ÉTALONNAGE DES CAPTEURS DE LA PRESSE DE TRACTION-COMPRESSION	277
Curriculum Vitae	

Version abrégée

Lorsque le bois est soumis à variations hygrométriques sous chargement mécanique de longue durée il présente un comportement différé dont la réponse totale n'est pas le simple cumul de celle engendrée indépendamment par l'application d'une sollicitation mécanique ou hydrique. Des effets supplémentaires de couplage entre les deux sollicitations sont, en effet, mis en évidence. Ils sont regroupés sous le nom d'effets mécanosorptifs.

Le but de ce travail de thèse a été de réaliser une campagne expérimentale minutieuse pour tenter d'apporter des éléments nouveaux à l'explication des effets mécanosorptifs observés, particulièrement en ce qui concerne le niveau de la structure où se dérouleraient les principaux mécanismes mis en jeu.

La particularité de l'étude est liée à l'utilisation d'éprouvettes de faible épaisseur. Un dispositif expérimental spécifique a été mis au point. Il comporte, d'une part, une presse de traction-compression pilotée par un logiciel permettant d'imposer des programmes de sollicitation mécanique complexes en contraintes ou en déformations. D'autre part, une cellule hygrothermique, fixée sur les tiges des mors de la presse, a été conçue pour permettre un contrôle des conditions climatiques imposées à l'éprouvette. La régulation de la température dans la cellule est assurée par un bain thermostatique.

Des essais de fluage-recouvrance en traction ont été réalisés avec cycles de variations hydriques. Une première série d'essais, effectuée sur éprouvette initialement sèche et initialement humide a permis d'observer les caractéristiques générales du comportement hygromécanique du bois. Plusieurs groupes d'essais de fluage-recouvrance ont été ensuite réalisés pour un même niveau de contrainte. Seul variait le délai de mise en route du cyclage hydrique, et donc le temps pendant lequel la contrainte était maintenue à une valeur constante. Ils ont permis de montrer que ce temps n'avait pas d'influence significative sur la déformation mécanosorptive. Des cycles de variations hydriques sous cycles de charge-décharge puis sous charge suivie de décharges partielles ont été réalisés. Les résultats obtenus nous ont permis de supposer que la déformation induite par le couplage mécanosorptif peut être décomposée en deux parties, liées à deux différents mécanismes.

Des essais de relaxation-effacement sous climat variable ont également pu être effectués sur éprouvettes initialement sèche et initialement humide, grâce au dispositif expérimental développé.

Un logiciel de simulation du comportement élasto-visco-plastique linéaire et non-linéaire de matériaux, dans le cas du climat constant, a été développé en utilisant la méthode des variables internes. Son application au comportement du bois est illustrée à partir de l'exemple d'un essai de relaxation-effacement.

Abstract

Subjected to moisture variations under a long-time mechanical loading, wood shows a delayed behaviour, where the total response is not the simple accumulation of those corresponding to the mechanical loading and the zero-load swelling-shrinkage deformation. Indeed, one can observe supplementary couplings phenomena between the two types of loading. These phenomena are regrouped under the name of mechanosorptive effects.

The aim of the proposal thesis was to realize an very meticulous experimental study that would bring new elements for trying to explain the observed mechanosorptive effects on the wood, and particularly about the structural level where the principal mechanisms would take place.

The peculiarity of the study is related to the choice of the specimens with small thicknesses. A special experimental apparatus was developed to conduct mechanical tests on small specimens under constant and variable climatic conditions. The first part of this apparatus is a mechanical press, equipped with a command program permitting to set complex sorts of loading and unloading programs in force or displacement control. The second part is a hygrothermal cell, fixed on the clamps of the press, which was realized to control the climatic conditions around the specimen. The regulation of the temperature is controlled by a thermostatic bath.

Creep-recovery tests in tension with cycles of humidity variations were realized. A first serie of tests was done on initially dry and initially moist specimens. It permit us to observe the general characteristics of the hygro-mechanical wood behaviour. On the next step, several groups of creep-recovery tests were done for the same stress level. The only varying parameter was the load-duration. The results obtained shown that the load-duration has no significative influence on the mechanosorptive deformation.

Influence of both humidity cycles and loading-unloading cycles and of humidity cycles and step-wise unloading on mechanosorptive deformation has been studied. The results obtained let us suppose that the mechanosorptive deformation could be decomposed into two parts, related probably to two different mechanisms.

Relaxation-blotting out tests under variable climate has been performed on initially dry and initially moist specimens, thanks to the experimental apparatus which was developed.

A software was developed for the simulation of linear and non-linear elasto-visco-plastic behaviour of materials. It is based on the internal variables method. Its application to the behaviour of wood, under constant climate, is illustrated on an example based on a relaxation-blotting out test.

NOTATIONS

- ε_{tot} : déformation totale, mesurée par l'extensomètre;
- ε_{inst} : déformation élastique instantanée, mesurée à la charge ou à la décharge;
- ε_{visc} : déformation différée sous climat constant;
- ε_{hyg} : variations dimensionnelles hydriques, mesurées à contrainte nulle;
- ε_{ms} : déformation due à l'effet mécanosorptif. Elle correspond à la déformation supplémentaire observée après déduction, de la déformation totale ε_{tot} , de la déformation élastique ε_{inst} , différée sous climat constant ε_{visc} et des variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} ;
- ε_r : déformation résultante. Elle correspond à la somme de la déformation due à l'effet mécanosorptif ε_{ms} et de la déformation différée sous climat constant ε_{visc} ;
- σ_{tot} : contrainte totale, mesurée par l'extensomètre;
- σ_{inst} : contrainte élastique instantanée, mesurée lors du maintien de la déformation ou lors de la remise en forme de l'éprouvette;
- σ_{visc} : contrainte différée sous climat constant;
- σ_{hyg} : variations de contraintes hydriques, mesurées à déformation nulle;
- σ_{ms} : contrainte due à l'effet mécanosorptif. Elle correspond à la contrainte supplémentaire observée après déduction, de la contrainte totale σ_{tot} , de la contrainte élastique σ_{inst} , différée sous climat constant σ_{visc} et des variations de contraintes hydriques σ_{hyg} ;
- σ_r : contrainte résultante. Elle correspond à la somme de la contrainte due à l'effet mécanosorptif σ_{ms} et de la contrainte différée sous climat constant σ_{visc} ;
- E_{30} : module d'élasticité mesuré sur des éprouvettes conditionnées dans une atmosphère à 30% d'humidité relative;
- E_{75} : module d'élasticité mesuré sur des éprouvettes conditionnées dans une atmosphère à 75% d'humidité relative;
- σ_{R30} : contrainte de rupture mesurée sur des éprouvettes conditionnées dans une atmosphère à 30% d'humidité relative;
- σ_{R75} : contrainte de rupture mesurée sur des éprouvettes conditionnées dans une atmosphère à 30% d'humidité relative;
- σ_{R22} : contrainte de rupture mesurée sur des éprouvettes conditionnées dans une atmosphère à 22% d'humidité relative (cas d'un seul essai);

y_l : coefficient d'expansion hydrique dans la direction longitudinale, par rapport à la variation d'humidité relative;

w : teneur en eau (%);

T : température (°C)

HR: humidité relative atmosphérique (%)

INTRODUCTION

Le bois en tant que matériau de construction a été beaucoup utilisé jusqu'à la fin du 18ème siècle, en particulier dans le secteur de la construction navale (H. Schulz, 1993). L'arrivée de l'ère industrielle, privilégiant et nécessitant une production en série, a ensuite rapidement freiné son utilisation. En effet, la difficulté d'obtenir des pièces, ayant des propriétés très semblables, et le travail artisanal, important sur ce matériau, ont vite été dépassés au profit de matériaux plus homogènes ou pouvant être fournis en quantités importantes.

Pourtant, le matériau bois, malgré le fait qu'il soit de nature très hétérogène, possède des propriétés et des avantages qui lui sont propres: il se dégrade de manière naturelle et il est renouvelable. Ce qui n'est pas de faible importance dans notre monde actuel où les questions de retour à la nature et d'écologie tiennent une place de plus en plus importante. On assiste ainsi à un retour en force de l'utilisation du bois dans la construction, et à de nouveaux projets d'étude de sa structure et de son comportement, dans le but d'une meilleure utilisation. Ceci ne peut se faire qu'en développant une connaissance plus approfondie du bois en tant que matériau.

L'un de ces aspects consiste en l'étude du comportement différé du bois sous climat variable, en particulier en ce qui concerne l'influence de l'humidité relative. En effet, le bois, non seulement très hétérogène, est également un matériau fortement hygroscopique. Ses propriétés mécaniques, telles module d'élasticité, fluage, seront donc dépendantes de sa teneur en eau.

A climat constant, le bois a un comportement viscoélastique, dont l'étude est relativement simple, pour autant que le niveau de sollicitation ne soit pas trop élevé, cf. par exemple Huet (1988), Tong liu (1994). Par contre, lorsque le bois est soumis à l'application d'une contrainte et à des variations simultanées de la teneur en eau, la déformation totale mesurée n'est pas le simple cumul de la déformation due aux deux sollicitations appliquées séparément. Elle est en fait d'amplitude plus élevée, pouvant amener à une rupture prématurée de la structure et donc à une durée de vie réduite. Cet effet est connu pour le bois sous la dénomination d'"effet mécanosorptif", Grossman (1976).

De nombreux chercheurs se sont penchés, depuis plus de 35 ans, sur l'observation et la mise en évidence des caractéristiques de cet effet. Plusieurs explications et modélisations ont été proposées, sans qu'aucune d'elles ne soit, cependant, entièrement satisfaisante.

Le travail présenté ici s'inscrit à la base d'un projet d'étude de l'effet mécanosorptif, en continuité de ceux déjà réalisés. L'intérêt se porte ici sur l'étude du comportement micromécanique du bois, c'est-à-dire observé sur des éprouvettes de très faibles dimensions.

Ce choix est lié principalement aux précédents travaux réalisés sur la micromécanique du bois en tension, dont un court récapitulatif est donné au début du chapitre II.1. Dans ces travaux, il a été confirmé que l'analyse du comportement de micro-éprouvettes permettent d'expliquer le comportement macroscopique d'éprouvettes de plus grandes dimensions.

Il est complété par le développement d'une méthode de modélisation basée sur l'introduction de variables internes, cf Huet (1988 à 1995), pouvant être identifiées à différents niveaux de la microstructure. La simulation du comportement à climat constant est illustrée sur un exemple.

Une première partie est consacrée à placer l'étude réalisée dans son contexte. Après une description rapide de caractéristiques structurelles du matériau bois (chapitre I.1), une étude bibliographique sur l'effet mécanosorptif est donnée au chapitre I.2. Elle est conclue par une ouverture sur les objectifs de l'étude. Deux parties ont ensuite été traitées au cours de l'ensemble de l'étude. La plus importante est relative à la réalisation d'une campagne d'expérimentation (partie II).

L'étude du comportement hygromécanique du bois a été réalisé sur des éprouvettes de très faibles dimensions, en particulier dans le sens de l'épaisseur. Il a donc été nécessaire, dans un premier temps, de mettre au point un dispositif d'essais spécifique, de manière à pouvoir assurer une grande précision au niveau des mesures et un bon contrôle des conditions d'environnement imposées à l'éprouvette. Ces deux points font l'objet du chapitre II.2.

Une fois le dispositif mis en oeuvre, la campagne d'essais a pu être réalisée, suivant les étapes décrites dans le plan du chapitre II.1. Des essais de caractérisation des éprouvettes minces ont été réalisés - évaluation du module et de la contrainte à la rupture, coefficients d'expansion hydriques et mesures de contraintes hygriques (chapitre II.3). Dans un deuxième temps, des observations générales du comportement différé à climat constant sont données, à partir des résultats obtenus sur plusieurs séries d'essais de fluage-recouvrance et de relaxation-effacement (chapitre II.4).

Des essais de fluage-recouvrance et relaxation-effacement ont ensuite pu être réalisés à climat variable (chapitres II.5 à II.10). Ils ont permis de mettre en évidence des caractéristiques du comportement hygro-mécanique du bois encore non observées (chapitre II.11).

La troisième et dernière partie (partie III) de l'étude concerne le développement d'un logiciel de simulation du comportement des matériaux, basé sur le formalisme des variables internes. Son application au bois est ensuite traitée sur un exemple, dans le cas du comportement à climat constant.

PARTIE I:

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

CHAPITRE I.1

DONNÉES SUR LE MATÉRIAU

I.1.1 INTRODUCTION

Avant d'aborder l'observation et l'étude du comportement mécanique différé du bois sous climat constant puis variable, il est nécessaire d'effectuer une rapide présentation du matériau étudié. Le bois est, en effet, un matériau naturel d'une très grande complexité, ceci étant principalement lié à sa structure et à l'agencement des différents polymères qui le constituent. Le comportement mécanique du bois, de même que ses caractéristiques hygroscopiques, dépendront fortement de cette microstructure.

Quelques caractéristiques structurales importantes du bois résineux - au niveau de sa microstructure et de son ultrastructure - ainsi qu'un rappel de ses principaux constituants chimiques sont exposés dans ce chapitre.

I.1.2 LE MATÉRIAU BOIS

Plusieurs ouvrages peuvent être consultés dans le but d'obtenir une description précise de la constitution du bois, par exemple Kollman et Côté (1968), Wangaard (1979), Core et Côté (1979), Tsoumis (1991). Les aspects de la chimie du bois sont exposés dans Lewin et Goldstein (1991).

I.1.2.1 MICROSTRUCTURE

Le bois résineux est généralement constitué de deux types de cellules. Les trachéides, orientées longitudinalement, représentent environ 90% du volume total du bois. Leur morphologie diffère entre le bois de printemps et d'été. En effet, dans le cas du bois final, la cellule possède une paroi plus épaisse et un lumen plus petit que pour le bois initial; sa longueur est également supérieure de 10%. Le deuxième type de cellule correspond aux parenchymes, ou plus précisément rayons ligneux, qui sont orientés dans le sens transversal.

A l'échelle microscopique, cette répartition de cellules confère au bois un caractère anisotrope, lié à ses hétérogénéités, avec cependant la possibilité de faire une distinction entre 3 orientations principales (R, T, L) comme représenté sur la figure I.1.1. Ce qui permet de considérer le bois comme un matériau localement orthotrope.

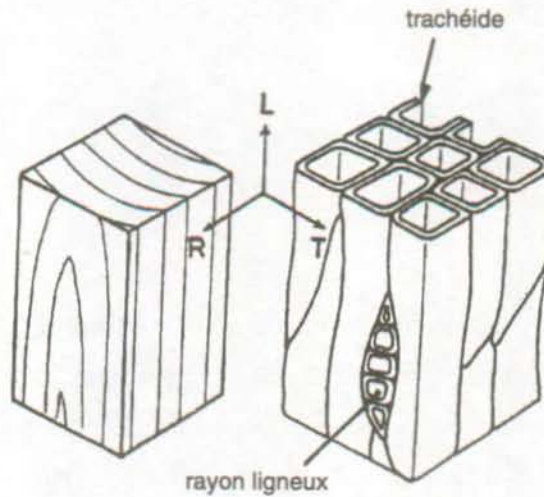


Figure I.1.1 Schématisation de l'organisation cellulaire d'un résineux, d'après Norimoto et Gril (1989). Représentation des axes principaux d'orthotropie (R, T, L).



Figure I.1.2. Bois final utilisé lors des essais.

Une vue microscopique, dans le plan transversal, d'une coupe de bois final de pin maritime sur lequel a été réalisé l'ensemble de la campagne d'expérimentation est donné figure I.1.2 On peut constater la présence de canaux résinifères, ce qui est courant dans toutes les essences de pin.

I.1.2.2 ULTRASTRUCTURE

Si l'on se place à une échelle proche du micron, on peut observer que la paroi cellulaire est formée de deux sous-parois, primaire et secondaire, ainsi que d'une couche intercellulaire, figure I.1.3.

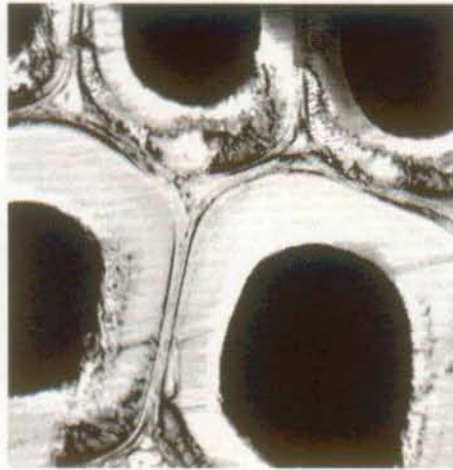


Figure I.1.3. Observation des différenciations de couches au niveau de la paroi cellulaire.

Une représentation schématique de la paroi est donnée, figure I.1.4. permettant ainsi de faire une distinction plus précise entre les diverses couches.

On peut y voir:

- la lamelle mitoyenne (Lm), riche en lignine;
- la paroi primaire (P), d'épaisseur de l'ordre de $0.1 \mu\text{m}$;
- la paroi secondaire, formée de 3 sous-couches (S1, S2, S3). La couche (S2) est largement prépondérante, pouvant représenter jusqu'à 85% de l'épaisseur totale de la paroi. Les deux autres sont pratiquement identiques. Ces couches se distinguent par l'orientation des microfibrilles de cellulose, sous forme de spirales croisées, qui la constituent.

Dans la couche (S1) et (S3), l'angle d'inclinaison des microfibrilles est de 50° à 90° par rapport à l'axe de la cellule, alors que dans la couche (S2), il est au maximum de 30° .

L'angle moyen des microfibrilles de cellulose peut jouer un rôle déterminant au niveau du comportement mécanique, illustré par exemple par Navi (1995) sur du bois de très faible épaisseur, sollicité dans la direction longitudinale. De même, il est à l'origine de l'anisotropie observée sur la mesure du coefficient d'expansion hydrique.

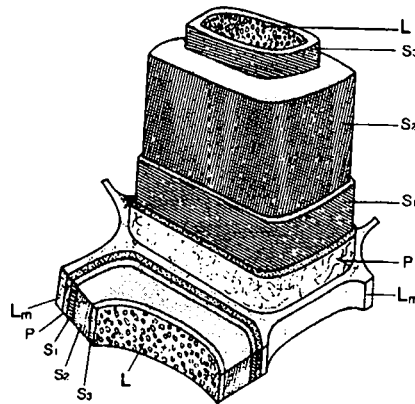


Figure 1.1.4. Représentation schématique de l'organisation d'une paroi cellulaire de trachéide, d'après Tsoumis (1991).

I.1.2.3 COMPOSITION CHIMIQUE

La paroi cellulaire est constituée principalement de 3 polymères organiques. La cellulose, dans une proportion de l'ordre de 45%, comporte des régions cristallines (60 à 97%) et amorphes. La présence de nombreux groupes hydroxyls OH^- , assure la liaison entre les chaînes et constitue des sites pour accueillir les molécules d'eau, ceci uniquement dans la partie amorphe.

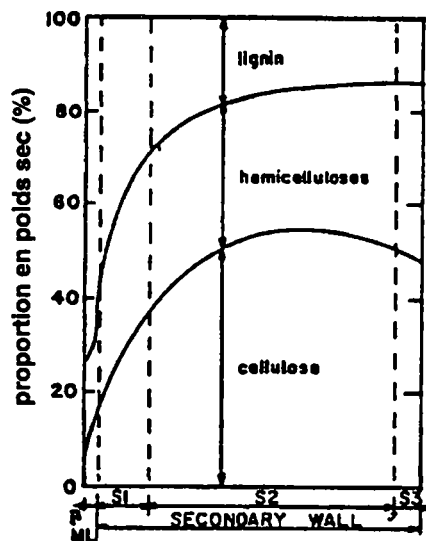


Figure 1.1.5. Distribution des constituants chimiques de la paroi cellulaire d'une trachéide, d'après Bodig (1982).

Les hémicelluloses, de 20 à 25% de la composition, ont un faible degré de polymérisation, constituant ainsi une zone amorphe, ayant des propriétés hydrophiles importantes.

La lignine, dans une proportion de l'ordre de 20 à 30%, est un polymère amorphe contenant des groupements phényles, qui la rendent plus hydrophobe. Elle a principalement une fonction de "colle" entre les cellules.

La répartition des constituants chimiques au niveau de la paroi cellulaire d'une trachéide est donnée sur la figure I.1.5.

Chaque couche de la paroi comporte des associations de fibrilles de cellulose, qui constituent une microfibrille. Elles sont renforcées par une matrice rigide formée d'hémicelluloses et de lignine.

CHAPITRE I.2

LES EFFETS MÉCANOSORPTIFS

I.2.1 INTRODUCTION

L'étude du comportement du bois sous climat variable a permis de mettre en évidence des effets relatifs à une variation de teneur en eau sous chargement préalablement établi. Ceux-ci ont été repris sous la dénomination d'"effets mécanosorptifs", pour spécifier qu'il sont relatifs à un couplage, dont la réponse ne peut être directement déterminée par la connaissance des réponses du matériau dues, indépendamment, à l'application de la sollicitation mécanique, et aux changements de la teneur en eau.

L'étude de ces effets a débuté depuis plus de 35 années. Une première partie de ce chapitre est consacrée à la mise en évidence expérimentale de ce phénomène, lors des précédents travaux. Dans les deux parties suivantes sont décrites les principales hypothèses retenues quant à l'explication des effets mécanosorptifs, ainsi que les lois de comportement ou modélisations proposées pour permettre une simulation du phénomène.

Ce chapitre se termine par une discussion sur les travaux réalisés précédemment, et une orientation sur les objectifs de ce travail de thèse.

I.2.2 MISE EN ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE

C'est en 1960, que Armstrong et Kingston firent, pour la première fois, état de la comparaison entre le fluage du bois maintenu à teneur en eau constante, et celui du bois séchant sous contrainte. Ces essais, consistant en la mesure du fluage en flexion, furent observés pour des essences de feuillus et de résineux, et comparés pour des tendances à l'affaissement variables (phénomène de "*Collapse*"). Les résultats obtenus ont permis d'observer que le bois séchant sous contrainte engendrait une déformation deux fois plus importante, pour la durée de l'essai considéré (2 semaines).

C'est sur cette base que de nombreux travaux expérimentaux ont ensuite été réalisés, pour permettre de caractériser l'effet observé de manière plus précise. La description qui suit a comme but de dresser un bilan des principaux essais réalisés au cours de ces 35 dernières

années, en faisant apparaître leurs différences et importances. Cette description se terminera par une brève revue des caractéristiques de l'effet mécanosorptif.

En 1961, Armstrong et Christensen poursuivirent l'expérimentation de manière plus attentive, sur des éprouvettes dont l'épaisseur était de: 2 cm et 1 mm. Cette dernière étant choisie dans le but de chercher à éviter au maximum les gradients d'humidité apparaissant au niveau de l'éprouvette lors d'un changement de teneur en eau. Les essais, toujours réalisés en flexion, à une contrainte inférieure à 25 % de la contrainte de rupture donnent apparemment des résultats qualitatifs similaires. Celui relatif à l'éprouvette de section faible est donné figure I.2.1.

Il retrace bien les principales caractéristiques relatives à l'effet mécanosorptif, que ce soit en charge ou en décharge, mettant en particulier en évidence son caractère paradoxal en ce qui concerne l'observation d'une diminution de la déformation lors d'une humidification - sauf lors de la première - et d'une augmentation de la déformation lors d'un séchage ainsi que l'amplitude importante de la déformation obtenue après cyclage hydrique.

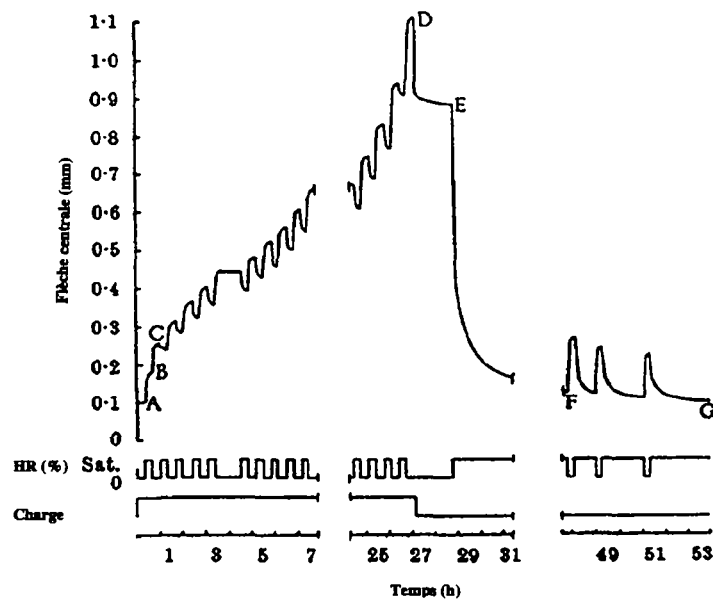


Figure I.2.1. Effet de changements de la teneur en eau sur le fluage du bois sollicité en flexion.

De par ces essais, les auteurs en ont déduit que, l'effet mécanosorptif étant observé de la même manière sur des éprouvettes de faible ou de plus importante épaisseur, les contraintes résultant des gradients d'humidité ne semblaient pas être à l'origine du mécanisme observé.

En 1962, une campagne d'essais plus approfondis a été menée par Armstrong et Kingston sur 5 essences de bois de caractéristiques variables. Les essais ont été réalisés en flexion, traction et compression, à des contraintes variant entre 18 et 40% de la contrainte de rupture, sur des éprouvettes de section de l'ordre du cm^2 .

Les conclusions que l'on a pu ressortir de ces essais ont été que:

- l'effet le plus prononcé apparaissait lors d'une sollicitation en compression;
- la désorption entraînait une augmentation de la déformation, sauf lors d'un essai en traction, où elle diminuait par petits paliers;
- l'absorption entraînait une diminution de la déformation, sauf lors d'un essai en traction, où elle augmentait par petits paliers;
- la première absorption entraînait une augmentation de la déformation en flexion et en traction;
- le comportement en flexion ne pouvait pas être expliqué de façon satisfaisante par des essais, en conditions similaires, en traction et compression;
- la déformation totale était affectée par l'amplitude de variation de la teneur en eau, et non par sa vitesse.

Ces essais ont constitué une première approche expérimentale comparative du comportement mécanosorptif du bois. Certaines observations concernant l'effet d'une absorption ou d'une désorption n'ont cependant pas toujours été retrouvées par la suite, spécialement en ce qui concerne les essais en traction. De ces résultats, on peut donc noter l'importance d'être attentif aux conditions d'essai, mais également au matériau et aux dimensions des éprouvettes utilisées.

Un résultat expérimental intéressant fut ensuite celui obtenu par Hearmon et Paton en 1965. Ces auteurs ont travaillé sur des éprouvettes d'épaisseur relativement faible (2 mm), et étudié les effets mécanosorptifs pour différents niveaux de charge appliquée en flexion. Les résultats obtenus sont donnés figure I.2.2.

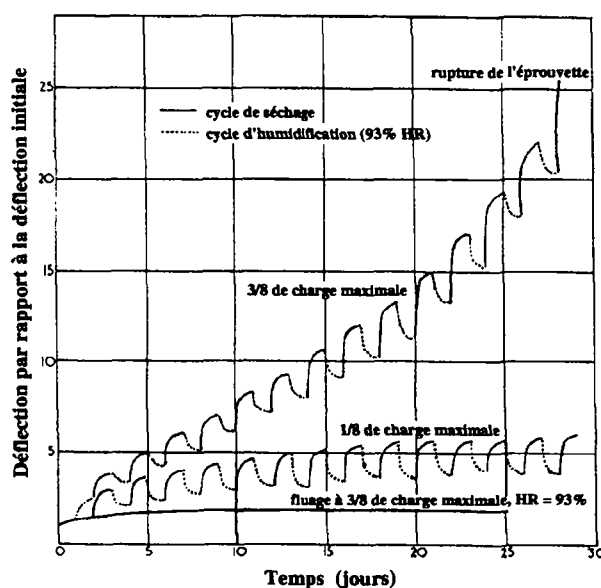


Figure I.2.2. Essai de fluage en flexion sur des éprouvettes soumises à des conditions d'humidité constantes ou variables.

Les résultats des essais représentés sur ce graphe tendent à montrer que pour une contrainte relativement élevée (correspondant à 37.5% de la contrainte de rupture), les effets mécanosorptifs tendent à entraîner la rupture prématurée de l'éprouvette. Par contre, pour une contrainte plus faible (correspondant à 12.5% de la contrainte de rupture), les effets mécanosorptifs tendent à se stabiliser. D'autres essais, ont, d'après les auteurs, entraîné la rupture d'une éprouvette chargée à 25% de la contrainte de rupture après 37 cycles de changements d'humidité (entre l'état sec et 100% HR).

Ces résultats donnent également une idée de l'ampleur que peut prendre l'augmentation de déformation d'une éprouvette de bois, de section relativement faible, soumise à des variations de climat. Elle est en effet de 25 fois la déformation initiale pour une contrainte appliquée de 37.5%, d'après la figure I.2.2.

Des investigations ont ensuite été réalisées sur des éprouvettes longitudinales de très faible section (0.4 mm x 5 mm) sollicitées en traction (Eriksson et Noren, 1965). Les résultats obtenus, figure I.2.3, ont montré dans ce cas qu'une absorption entraînait une diminution de la déformation et une désorption une augmentation de la déformation, ce qui va à nouveau à l'encontre du phénomène attendu.

Il est intéressant de constater l'importance du premier changement d'humidité sur la déformation de fluage. D'autre part, ces auteurs figurent parmi les rares donnant une information littérale du gonflement par rapport au temps, en notant la différence et la difficulté due à la variabilité de cette mesure sur des éprouvettes de faible épaisseur. Cela signifierait que le résultat de mesure des variations dimensionnelles obtenu sur une éprouvette ne devrait être comparé aux résultats de fluage à climat variable - pour calculer le "fluage corrigé" correspondant à la déformation totale diminuée des variations dimensionnelles hydriques - d'une autre éprouvette, car les résultats obtenus pourraient en être faussement influencés.

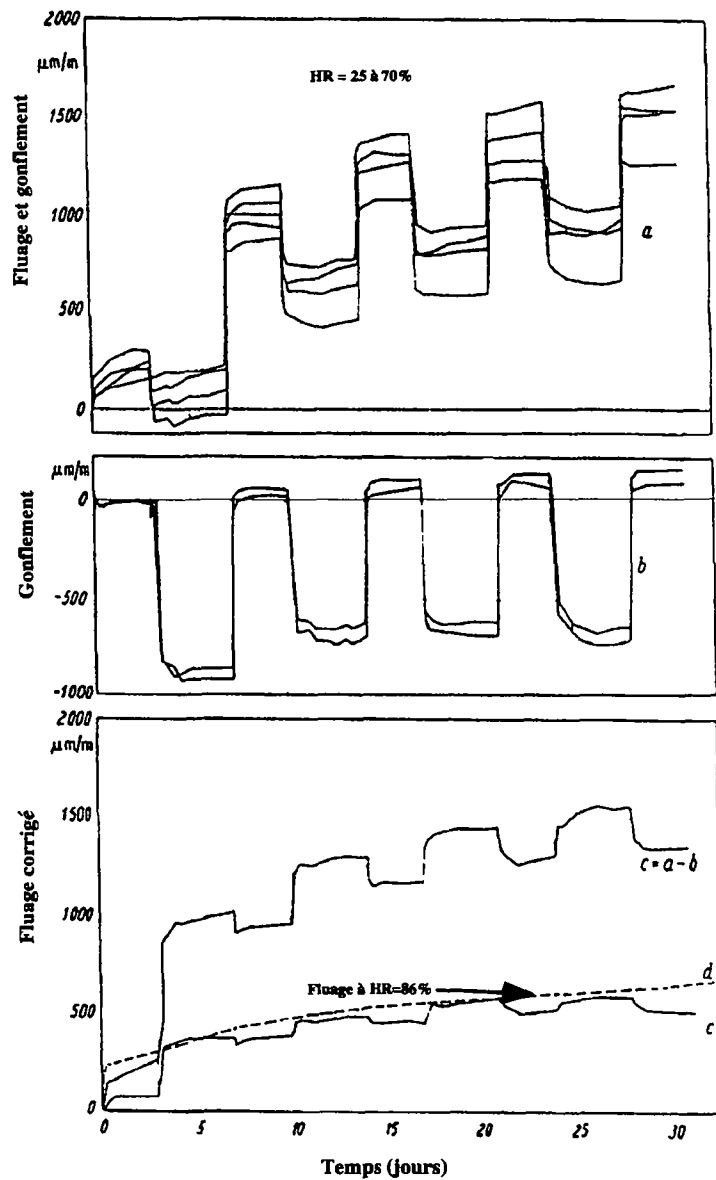


Figure 1.2.3. Fluage du bois soumis à des variations d'humidité entre 25 et 70%. (a): fluage non corrigé; (b): gonflement; (c): fluage corrigé par rapport au gonflement (pour des éprouvettes à déformation instantanée variable); (d): fluage à HR constante (86%).

L'observation d'une différence de comportement mécanosorptif suivant deux essences a ensuite été donnée par les essais de Ranta-Maunus (1975). Ceux-ci ont été réalisés en flexion sur une essence de résineux (sapin) et de feuillus (bouleau). Les épaisseurs des éprouvettes variaient entre 7 et 12 mm. Les résultats observés sont données figures I.2.4a et I.2.4b.

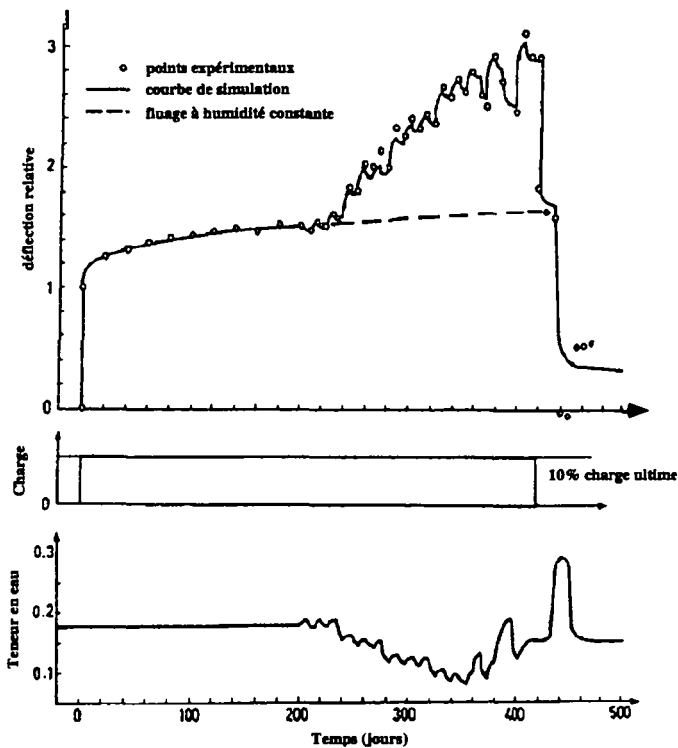


Figure 1.2.4a. Fluage et recouvrance du sapin

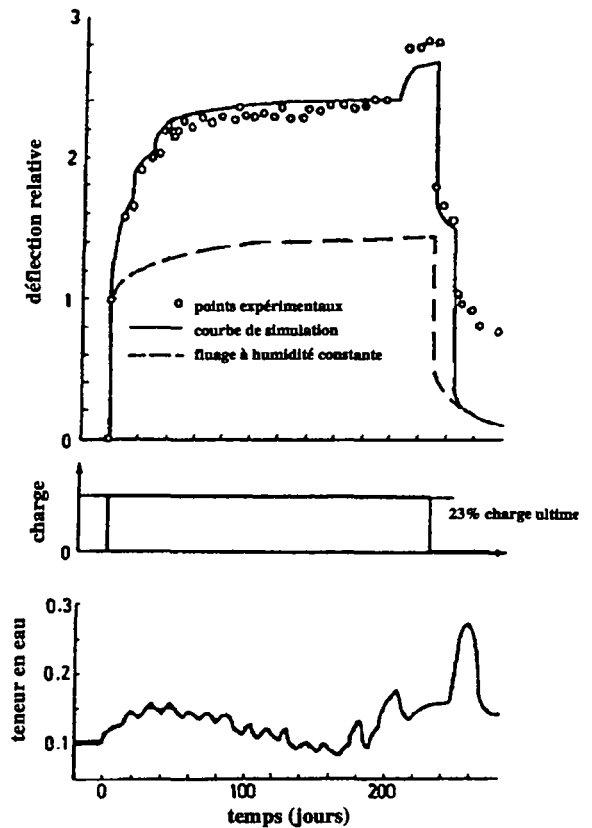


Figure 1.2.4b. Fluage et recouvrance du bouleau .

Le comportement du sapin et du bouleau se différencie, pour l'auteur, par le fait que, pour le bouleau, la déformation à un instant donné est fonction de l'histoire de la teneur en eau. Pour le sapin, par contre, c'est la valeur maximale de teneur en eau atteinte qui seule a une influence sur la déformation, mais il n'y a pas d'effet cumulatif.

Il est à noter cependant que les niveaux de charge considérés pour les deux essais ne sont pas les mêmes, ce qui ne permet pas une comparaison correcte des résultats. De même en ce qui concerne les programmes de sollicitation hydrique.

Une étude expérimentale importante à ensuite été réalisée par Hunt (1979, 1984, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991) dans laquelle il a introduit la notion de limite de la déformation due aux effets mécanosorptifs obtenue après charges et décharges successives pendant des variations de teneur en eau.

Il introduit une représentation de la déformation dans un graphe fonction de la teneur en eau, ce qui suppose l'indépendance du temps. Ce graphe est construit comme représenté sur la figure 1.2.5.

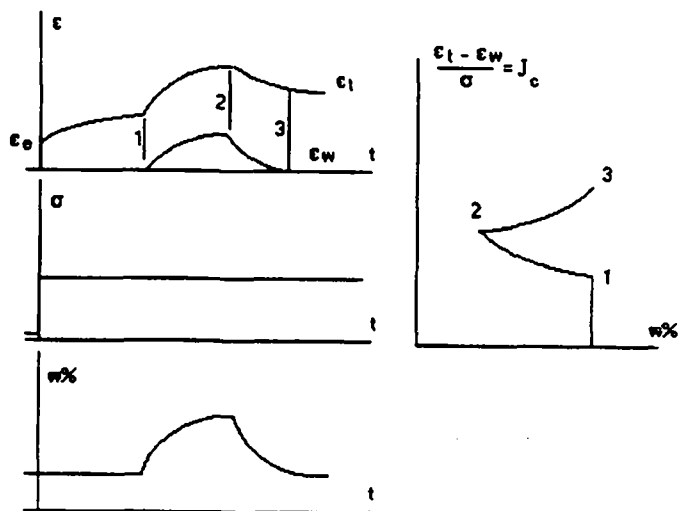


Figure 1.2.5. Méthode de construction des trajectoires mécanosorptives.

Un exemple de trajectoire déterminée lors d'un essai en flexion avec variations d'humidité est donné figure I.2.6. L'humidification correspond aux (+) et le séchage aux (o). Hunt fait l'hypothèse de l'existence d'un état limite de la déformation mécanosorptive, qui se traduirait par une trajectoire de la forme représentée sur la figure I.2.7. Sur ce graphe, le premier changement de teneur en eau (humidification) est celui qui entraîne la plus importante augmentation du fluage relatif. L'amplitude de variation de cette déformation, mesurée après les cycles de variation de la teneur en eau consécutifs diminuent, pour tendre, selon l'auteur, vers une limite.

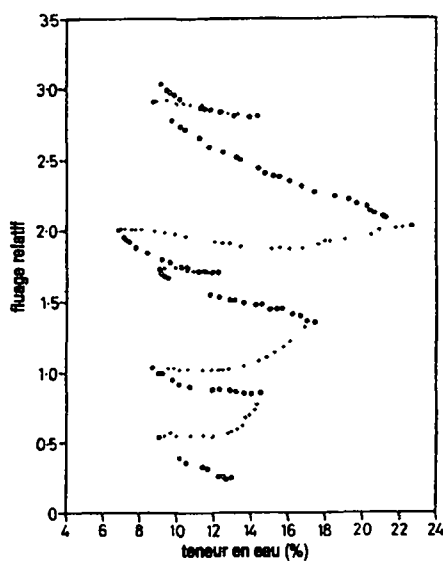


Figure 1.2.6. Trajectoires relatives à un essai de flexion avec variations d'humidité effectué sur du pin sylvestre.

Ses recherches ont également porté sur l'évolution des coefficients de retrait et gonflement longitudinaux au cours du processus menant à l'état limite.

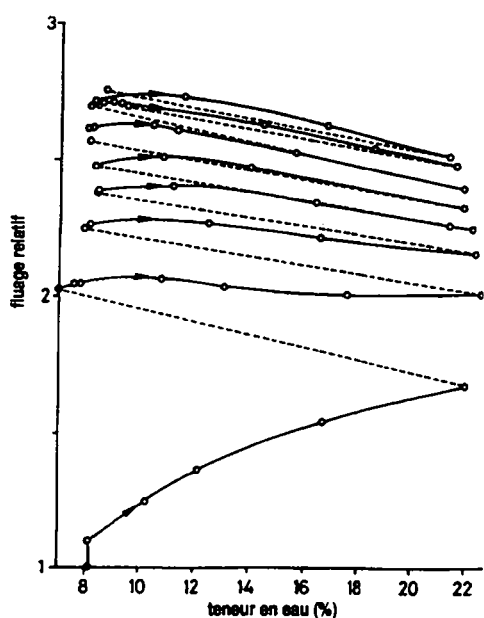


Figure 1.2.7. Représentation de la déformation limite

La description de ses expérimentations est en outre intéressante de par sa précision, aussi bien quant aux conditions environnementales que quant aux difficultés engendrées par les variations même du matériau bois.

L'hypothèse d'état limite de la déformation mécanosorptive a cependant été remise en question par les travaux de longue haleine entrepris par Mohager et Toratti (1991, 1992).

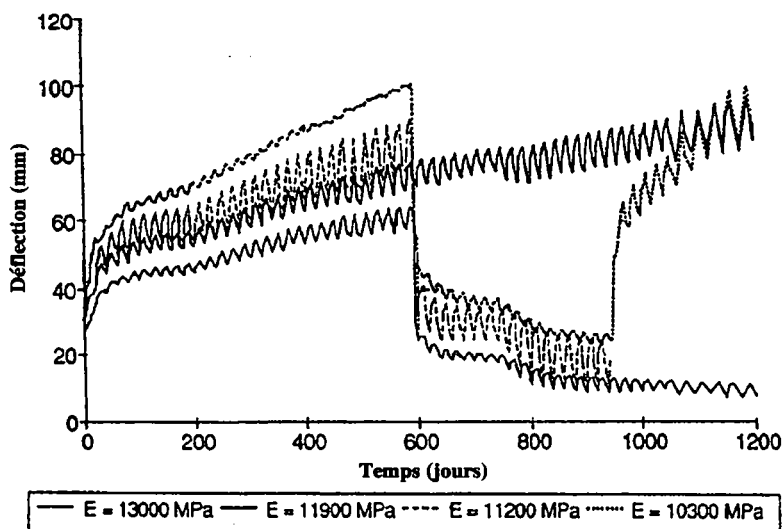


Figure 1.2.8. Fluage et recouvrance en flexion de 4 poutres de section 44 x 94 mm² sous une charge de 10 MPa, avec cycles de variation d'humidité relative d'une durée de 20 jours entre 15 et 90%.

Leur travail a consisté en des essais continus de très longue durée (environ 4 ans) réalisés en flexion sur des poutres de bois de pin Sylvestre. L'un des résultats obtenus est donné figure I.2.8. Ces essais donnent un aperçu du comportement mécanique différé à long terme en ce qui concerne le fluage et la recouvrance. En effet, il apparaît que le fluage, même à un niveau de charge faible (qui correspondrait à environ 10% de la charge ultime), ne tend pas à se stabiliser lorsqu'il s'accompagne de variations de la teneur en eau. La recouvrance, quant à elle, augmente après des variations d'humidité relative, mais il reste une déformation résiduelle importante, qui, elle, par contre semblerait se stabiliser.

On peut considérer également les essais réalisés par Tong Liu (1994). Ceux-ci ont été obtenus sur des éprouvettes de pin sylvestre de section 10 x 10 mm, sous une charge de flexion d'amplitude variable.

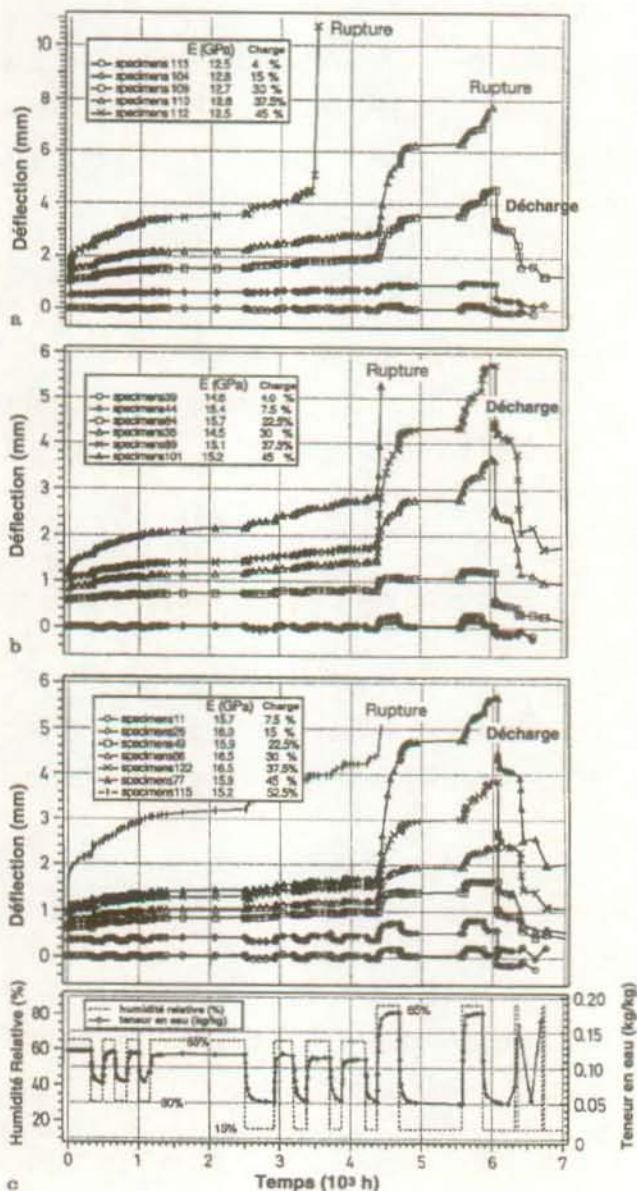


Figure I.2.9. Déformation de fluage en flexion à climat constant sous différents niveaux de charge pour des éprouvettes de module variable (a - faible; b - moyen; c - élevé).

Les résultats effectués portent aussi bien sur des essais à climat constant, qu'à climat variable. Ce travail, consistant à compléter, d'une part, l'absence d'informations expérimentales systématiques sur le fluage du bois à climat constant, permet, par exemple, de mettre en évidence l'augmentation du fluage, de sa cinétique, en fonction de la charge appliquée et du module d'élasticité. De plus, il met en évidence, toujours pour le climat constant, l'existence d'une recouvrance partielle, même pour une charge appliquée faible.

En ce qui concerne le climat variable, les résultats obtenus pour plusieurs niveaux de charge ainsi que pour trois gammes de valeurs en module sont donnés figure I.2.9.

Ces essais montrent que la déformation due aux effets mécanosorptifs augmente avec le niveau de charge et que l'augmentation de la déformation globale est plus importante dans le cas d'éprouvettes de module le plus faible. On peut également observer l'augmentation importante de la déformation lorsque le niveau d'humidité atteint une valeur jamais atteinte précédemment (85%) sous chargement mécanique et qu'une baisse ensuite de l'humidité relative entraîne, soit une baisse de la déformation pour des niveaux de charge faible, soit une nouvelle augmentation pour des niveaux de charge plus élevés (supérieurs à 30%). Il semblerait enfin que l'effet des changements d'humidité soit plus marqué pour les éprouvettes de module plus élevé et/ou pour un niveau de sollicitation faible.

Après l'exposé de ces quelques résultats (parmi les plus intéressants) retenus en ce qui concerne la mise en évidence expérimentale des effets mécanosorptifs, cette partie sera conclue par une brève liste des caractéristiques mécanosorptives rencontrées (Grossman (1976), Hoffmeyer et Davidson (1990), Martensson (1992), Hunt (1994)):

- (a) La déformation due aux effets mécanosorptifs ne dépend pas directement de la vitesse de variation de la teneur en eau, mais plutôt de son amplitude.
- (b) La déformation augmente globalement lors de variations d'humidité, que la charge soit appliquée en traction, compression ou flexion. L'augmentation la plus importante est obtenue sur les essais en compression.
- (c) Le premier changement d'humidité, que ce soit un séchage ou une humidification, entraîne toujours une augmentation de la déformation.
- (d) Une désorption entraîne une augmentation de la déformation, en traction (Eriksson et Noren, 1965), en compression (Armstrong et Kingston, 1962) ou en flexion.

- (e) En traction, il a été observé que l'absorption entraînait une diminution de la déformation (Eriksson et Noren, 1965) ou une augmentation par petits paliers (Armstrong et Kingston, 1962).
- (f) En compression, les mêmes auteurs ont trouvé que l'absorption entraînait une diminution de la déformation, résultat également observé sur les essais de Cheng et Schniewind (1985).
- (g) En flexion, l'absorption a toujours été observée comme entraînant une diminution de la déformation.
- (h) Les effets mécanosorptifs sont observables sur toutes les essences de bois. Des différences de comportement entre essences ont cependant été notées par Ranta-Maunus (1975) et Hunt (1987), mais n'ont pas retenu pour le moment d'attention plus poussée.
- (i) Lorsque l'humidité relative varie entre deux paliers fixes, et si la charge appliquée est relativement faible (inférieure à 20% de la charge de rupture), la déformation mécanosorptive semble se stabiliser (Hearmon et Paton, 1964, pour des essais en flexion; Hunt, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, pour des essais en traction). Par contre, lorsque la charge appliquée dépasse un certain seuil (difficilement défini, mais par exemple, supérieur à 25% de la charge appliquée en flexion), il est observé une rupture prématurée de l'éprouvette (Hearmon et Paton, 1964, pour des essais en flexion).
- (j) Lorsque l'humidité varie de façon aléatoire, on peut observer une augmentation brutale de la déformation si l'on atteint un niveau de teneur en eau jamais atteint auparavant (Tong Liu, 1993; Ranta-Maunus, 1975, pour le sapin et Hunt 1986).
- (k) La recouvrance instantanée mesurée après les changements d'humidité a sensiblement la même amplitude que la déformation instantanée initiale mesurée lors de l'application de la charge (Gibson, 1965).
- (l) La recouvrance différée est accélérée lors de nouveaux changements d'humidité, et de manière plus importante lors d'une absorption que d'une désorption (Armstrong et Christensen, 1961; Ranta-Maunus, 1975; Toratti, 1992; Tong Liu, 1993).
- (m) L'effet mécanosorptif a également été observé dans le plan transverse (Joyet, 1992). Il a été étudié sur les panneaux de particules (Armstrong et Grossman, 1972) et les panneaux de fibres (Martensson et Thelandersson, 1990, Dinwoodie, 1990).

I.2.3 HYPOTHÈSES PROPOSÉES SUR L'EXPLICATION DU PHÉNOMÈNE

Comme on a pu le voir sur l'ensemble des résultats expérimentaux, le comportement différé du bois sous climat variable, outre le fait qu'il présente un caractère fortement non-linéaire, fait également ressortir des caractéristiques qui vont à l'encontre des phénomènes normalement attendus.

La détermination d'une explication correcte de ces phénomènes, c'est-à-dire permettant d'expliquer l'ensemble des résultats obtenus d'une manière convaincante, n'est pas chose facile. Aucune de celles avancées jusqu'à présent n'a d'ailleurs été considérée comme vraiment satisfaisante. La complexité des phénomènes est sans doute liée à la complexité et à la nature du matériau bois lui-même.

Plusieurs explications concernant l'effet mécanosorptif ont été proposées au cours des études réalisées. Les principales sont énumérées ci-après.

I.2.3.1 NIVEAU DE LA STRUCTURE DU BOIS

I.2.3.1.1 Hypothèse de Boyd

Une explication anatomique du comportement différé du bois a été proposée par Boyd (1982), en termes d'interactions physiques, induites par l'application d'une contrainte, entre les composants cristallins et amorphes de la paroi cellulaire.

Elle est basée sur une représentation de la paroi cellulaire (S2) sous forme de treillis lenticulaire, figure I.2.10.

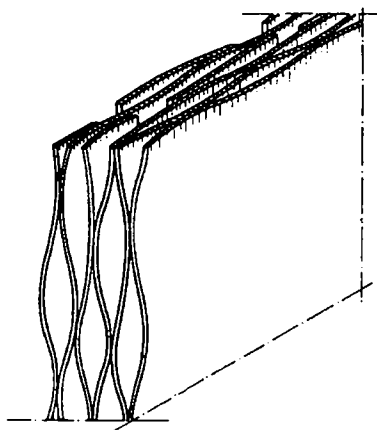


Figure I.2.10. Modèle d'arrangement des microfibrilles, entourant une matrice de matière amorphe. La partie gauche de la face tangentielle correspond au modèle de Scallan (1974); la partie droite correspond au modèle de Boyd et Foster (1975).

Dans ce modèle, les microfibrilles de cellulose cristalline sont liées entre elles, à des intervalles de distance variable, de manière à former un treillis. Ce treillis comporte des cavités de forme lenticulaire dans lesquelles se trouve une matrice amorphe hygroscopique ayant un comportement visqueux. En général, la largeur de la cavité est faible par rapport à la distance entre les liaisons inter-microfibrilles.

L'application d'une contrainte axiale, reprise principalement par les microfibrilles de cellulose, va modifier l'excentricité (e) - caractérisant la configuration du treillis non sollicité entre deux liaisons - selon la figure I.2.11. La différence de comportement du bois observé lors d'un chargement en compression ou en traction serait liée à la différence de forme prise, dans les deux cas, par le treillis.

Les caractéristiques de la déformation mécanosorptive sont expliquées en tenant compte:

- de l'effet du chargement, repris par le treillis de microfibrilles (figure I.2.11),
- de l'effet des variations dimensionnelles de la matrice hydrophile, induites par les variations de teneur en eau (figure I.2.12, lors d'un séchage, par exemple).

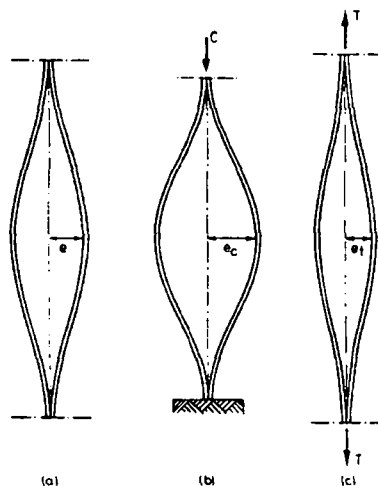


Figure I.2.11. Effet de l'application d'une contrainte axiale sur la configuration des microfibrilles entre deux liaisons.

(a) Schéma de l'arrangement dans une forme non sollicitée, avec une excentricité (e) par rapport à la direction moyenne des microfibrilles.

(b) Application d'une force de compression "C", augmentant l'excentricité. ($e_c > e$)

(c) Application d'une force de traction "T", diminuant l'excentricité ($e_t < e$).

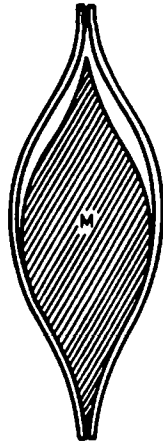


Figure I.2.12 Effet d'un séchage sur la matrice hydrophile "M"

Supposons qu'une force soit appliquée au système* lorsque celui-ci se trouve à l'état humide, puis que l'on diminue la teneur en eau. Selon Boyd, la matrice hydrophile va d'abord se contracter. Ce phénomène aura pour conséquence, dans un premier temps, une augmentation relativement importante de la déformation axiale des microfibrilles - dans le sens de la charge. Elle est liée à la plus grande facilité de variation de leurs déformations latérales. Les microfibrilles se déformeront dans le sens du rétablissement de contact avec la matrice. Dans un second temps, la matrice, sollicitée par les pressions locales dues au contact, se déformera de manière à épouser la forme du treillis.

Lors d'une augmentation consécutive de la teneur en eau, la matrice va gonfler. Les microfibrilles se déformeront pour tenter de reprendre leur configuration initiale. Ce phénomène ne serait cependant pas totalement réversible, une partie de l'énergie étant dissipée par frottement.

Boyd donne une explication spécifique au cas où le premier changement de teneur en eau - consécutif à l'application d'une charge axiale - se fait dans le sens de l'augmentation.

Une représentation des configurations prises par le treillis lors de l'application d'une force et un changement de teneur en eau est donné sur la figure I.2.13.

En traction, Boyd suppose que les incréments de déformation, induits par les cycles de variation de teneur en eau, doivent diminuer progressivement à cause d'une augmentation de la densification de la matrice. En compression, par contre, l'explication est moins évidente, et semblerait être liée à une limitation sur la forme lenticulaire que peut prendre la treillis.

L'ensemble des explications proposées reste cependant au niveau qualitatif. Une analyse quantitative des déformations permettrait de donner une idée de la validité du modèle.

* système = treillis + matrice

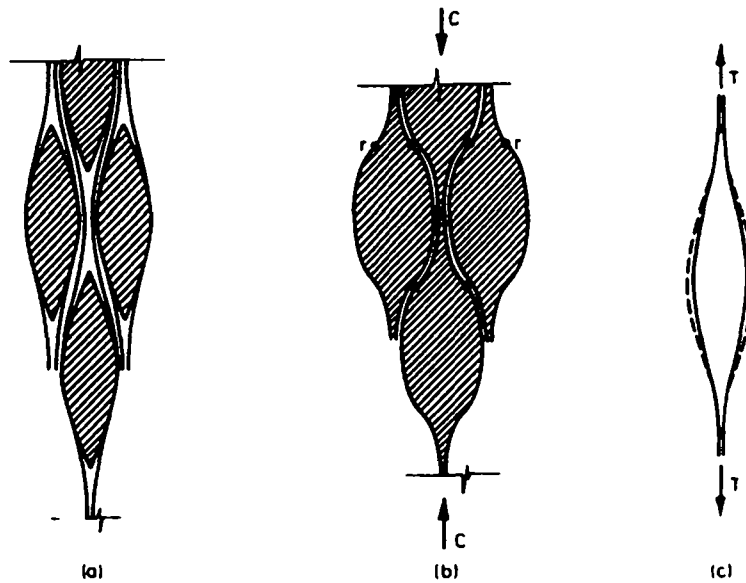


Figure I.2.13. Effet d'un changement de teneur en eau et de l'application d'une force axiale sur la configuration du treillis de microfibrilles.

(a) Effet d'un séchage sans application de charge.

(b) Effet d'un séchage suivi de l'application d'une force de compression puis d'une humidification.

(c) Effet d'un séchage suivi de l'application d'une force de traction puis d'une humidification. La ligne discontinue correspond à la configuration initiale.

I.2.3.1.2 Hypothèse de Mukudai et Yata

Mukudai et Yata (1986, 1987, 1988) ont tenté d'expliquer les effets mécanosorptifs comme étant liés aux caractéristiques microstructurales de la paroi cellulaire (Fig. I.2.14), et plus précisément à la rupture momentanée de l'interface entre les deux couches S1 et S2 de la paroi secondaire.

Cette rupture serait liée à la différence entre l'expansion hydrique des diverses couches de la paroi cellulaire - résultant d'une différence au niveau de l'orientation des microfibrilles qui les composent.

Lors d'une phase de séchage ou d'humidification, un mouvement des chaînes de molécules serait généré. Il pourrait aller jusqu'à engendrer leur désolidarisation (rupture des liaisons hydrogènes). Cette désolidarisation interviendrait au niveau de l'interface S1 / S2, celle-ci possédant un nombre faible de liaisons de contact. La liaison entre les deux sous-ensembles (S1+P+I) et (S2+S3) de la paroi cellulaire se rétablirait ensuite par reformation des liaisons

hydrogènes - dans le cas du séchage - ou par frottement - dans le cas de l'humidification (figure I.2.15)

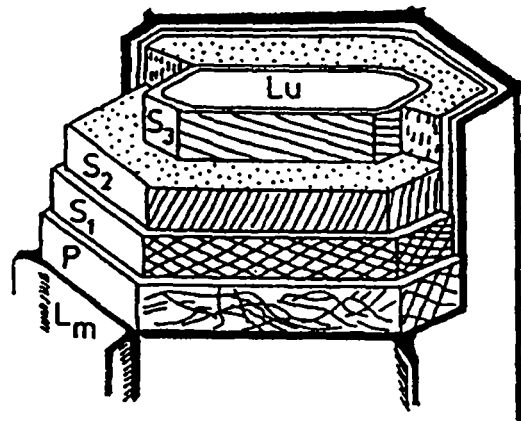


Figure I.2.14. Structure de la paroi d'une cellule de bois d'après Mariaux (1983). On y distingue la lamelle mitoyenne (Lm), la paroi primaire (P), la paroi secondaire formée des trois couches (S1), (S2) et (S3) et le lumen (Lu).

Dans le cas d'une variation de la teneur en eau sous charge, la désolidarisation momentanée de l'interface S1 / S2 entraînerait une redistribution de la contrainte entre les deux sous-ensembles de la paroi cellulaire (la contrainte totale restant toujours constante).

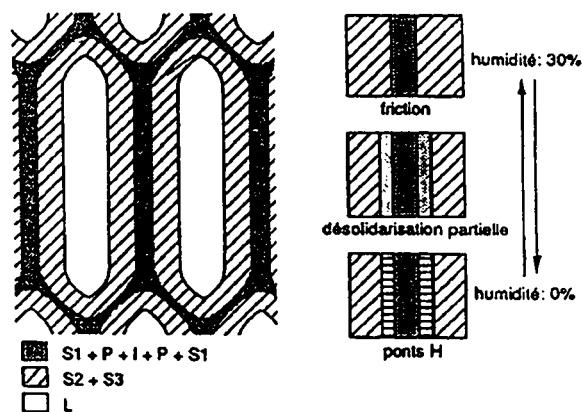


Figure I.2.15. représentation schématique de l'effet d'un changement d'humidité sur la paroi cellulaire

Des prises de vue au microscope électronique à balayage ont permis l'observation de zones fracturées qui tendraient à valider cette hypothèse, ou en tout cas à montrer qu'une rupture entre les deux couches peut être observée, sans que cela corresponde forcément à l'explication des effets mécanosorptifs.

I.2.3.1.3 Hypothèse de Hoffmeyer et Davidson

Une hypothèse a été proposée par Hoffmeyer et Davidson (1989), Hoffmeyer (1990, 1993). Ces auteurs soutiennent que la principale cause des effets mécanosorptifs observés sur le bois est reliée à la présence de défauts microscopiques correspondant à des plans de glissement. Ceci étant observé sur des essais de compression ou de flexion, pour des niveaux de contraintes modérés à élevés (à partir de 10, 12% de la contrainte de rupture en flexion), voir figure I.2.16. La formation de ces plans de glissement dépendrait de la rupture des liaisons hydrogènes, directement liée au changement de teneur en eau. Un changement d'orientation des microfibrilles de la paroi S2 se produirait dans ces plans, entraînant une variation des propriétés mécaniques et physiques - diminution du module d'élasticité, augmentation des variations dimensionnelles hydriques. L'observation microscopique de la présence de ces plans est donnée figure I.2.17.

Le nombre de plans de glissement formés serait fonction du niveau de contrainte appliquée. Ces plans seraient formés plus rapidement - c'est-à-dire pour un niveau de contrainte plus faible - dans le cas où la teneur en eau varierait .

Ils seraient également responsables de la non-linéarité du fluage à partir d'un certain niveau de charge (au delà de 50% de la charge de rupture en compression, d'après l'auteur).



Figure I.2.16. Illustration schématique des plans de glissement résultant d'un test de compression effectué dans le sens des fibres sur du bois de sapin.

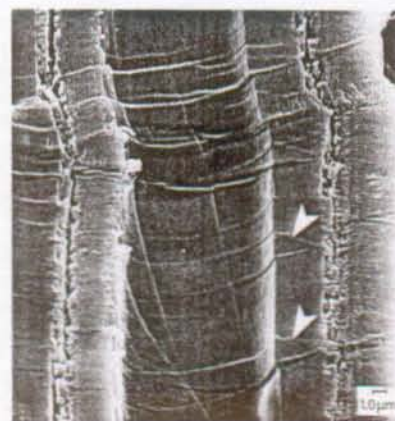


Figure I.2.17. Observation microscopique de plans de glissement résultant d'un test de compression effectué sur du bois de sapin. Les flèches indiquent la localisation de plans dans la paroi S2.

I.2.3.2 NIVEAU MACROMOLÉCULAIRE

I.2.3.2.1 Rupture et reformation des liaisons hydrogène

Un grand nombre d'auteurs (Eriksson et Noren, 1965; Gibson, 1965; Grossman, 1978; Hunt, 1984; Gril, 1987; Van der Put, 1989; Back et Salmen, 1983; Hanhijärvi, 1995) considèrent que l'explication des effets mécanosorptifs se situe au niveau des mécanismes de liaison existant entre les zones amorphes des chaînes de cellulose.

Il est proposé que deux types de liaisons existent entre chaînes de cellulose: des liaisons primaires fortes, et des liaisons secondaires faibles, appelées liaisons hydrogènes.

Une rupture et une reformation de ces liaisons hydrogènes serait induite lors de l'application d'une contrainte ou lors d'une variation de la teneur en eau.

Lors de l'application d'une contrainte, la configuration des chaînes de cellulose serait modifiée. En effet, certaines liaisons hydrogènes seraient rompues - permettant ainsi un mouvement de la chaîne dans le sens de l'application de la charge - puis reformées sur de nouveaux sites. Ce processus de rupture et reformation se propagerait, donnant lieu à une déformation différée (fluage). Le même processus prendrait place temporairement lors d'une variation de la teneur en eau, puis se stabiliserait lorsque l'équilibre est atteint.

Les liaisons hydrogène pourraient se rompre et se reformer plusieurs fois au cours d'une même variation de teneur en eau.

I.2.3.2.2 Hypothèse de Bazant

Une hypothèse proposée par Bazant (1985) revient à considérer que l'accélération du fluage due aux changements de teneur en eau peut être expliquée par les mécanismes de diffusion de l'eau à travers les pores contenus dans la paroi cellulaire.

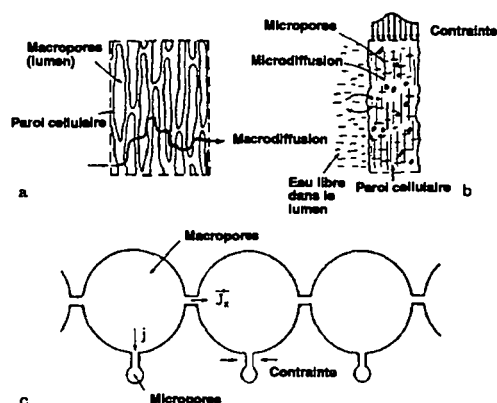


Figure I.2.18. Représentation de la localisation des micropores et macropores (a,b); système poreux idéalisé (c).

Pour cela, l'auteur introduit une distinction entre une microdiffusion - entre les pores de la paroi cellulaire - et une macrodiffusion - entre les lumens.

Lors d'une variation de la teneur en eau, il se crée un déséquilibre thermodynamique entre macropores et micropores adjacents. Seul un échange de molécules d'eau entre les micropores adjacents est produit. Il correspond à la microdiffusion. Un tel déséquilibre n'intervient pas lorsque la teneur en eau du bois reste constante.

L'accélération importante du fluage, dûe à une augmentation ou à une diminution de la teneur en eau, serait induite par le mouvement des molécules d'eau dans les plus petits micropores, seules capables de participer à la transmission de la charge.

Il manque cependant des essais appropriés permettant de vérifier cette hypothèse, et de mesurer des paramètres caractéristiques pour la valider.

Cette hypothèse, dans laquelle l'auteur considère le bois comme un matériau poreux possédant une large répartition de la taille des pores, a surtout été proposée à la suite de ses études effectuées sur le béton (1982). Sur ce matériau, il a, en effet, également été observé qu'une éprouvette séchant sous charge présentait une déformation d'amplitude plus importante que la somme du fluage sous climat constant et du retrait mesurés séparément. Ce phénomène est connu sous la dénomination d'effet Pickett.

I.2.4 MODÈLES DE LOIS DE COMPORTEMENT PROPOSÉS

Différents modèles ont été développés pour tenter de décrire les effets mécanosorptifs observés sur le bois. Certains de ces modèles sont purement mathématiques: ils sont basés sur la détermination d'une loi de comportement à partir d'observations macroscopiques de la déformation. D'autres modèles sont basés sur une approche de type microscopique, c'est-à-dire sur des observations liées à la microstructure du bois.

Les principaux modèles proposés, pour les deux types d'approche, sont énumérés ci-dessous.

L'analyse de la déformation totale est basée, en principe, sur une séparation en quatre termes:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_E + \varepsilon_{visc} + \varepsilon_{hyg} + \varepsilon_{ms} \quad (I.1.1)$$

- avec: ε_{tot} : déformation totale, mesurée au cours de l'essai;
 ε_E : déformation élastique instantanée initiale, mesurée à la charge;
 ε_{visc} : déformation de fluage à climat constant;
 ε_{hyg} : variations dimensionnelles hydriques, mesurées pour une contrainte nulle;
 ε_{ms} : déformation mécanosorptive (ou due à l'effet mécanosorptif).

La cinétique de déformation s'écrit:

$$\dot{\epsilon}_{tot} = \dot{\epsilon}_E + \dot{\epsilon}_{visc} + \dot{\epsilon}_{hyg} + \dot{\epsilon}_{ms} \quad (I.2.2)$$

I.2.4.1 MODÈLE DE LEICESTER

Un premier modèle basé sur une représentation par modèles analogiques a été proposé par Leicester en 1971. Il considère un modèle de Kelvin généralisé en série avec un "élément mécanosorptif", caractérisé par sa déformation Δ_w , définie selon l'équation:

$$-\frac{d\Delta_w}{dw} = F \cdot f(w) \quad (I.2.3)$$

avec w la teneur en eau, F la force appliquée.

La déformation Δ_w correspond à $\epsilon_{hyg} + \epsilon_{ms}$, c'est-à-dire la déformation totale ϵ_{tot} diminuée de la déformation élastique instantanée ϵ_E et du fluage à climat constant ϵ_{visc} .

Elle est fonction de la teneur en eau selon une loi $f(m)$, déterminée expérimentalement, et non explicitée par l'auteur.

I.2.4.2 MODÈLE DE RANTA-MAUNUS

Ranta-Maunus (1975, 1990) a proposé une description du comportement du bois sous climat variable par le développement d'une théorie de l'hydroviscoélasticité.

Il est parti d'un développement en série de Fréchet, par intégrales multiples, analogues à celles utilisées en viscoélasticité non linéaire (cf. Huet (1972), (1985)), de la loi de comportement par rapport à la contrainte, la teneur en eau et la température.

La forme générale initiale de ce modèle est tri-dimensionnelle. L'auteur se ramène ensuite à des considérations dans le cas uni-dimensionnel. Il se place en régime isotherme et suppose - sur la base d'observations expérimentales - la linéarité par rapport à la contrainte et à la variation teneur en eau. La loi de comportement prend la forme suivante:

$$\dot{\epsilon}_{tot} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + (\alpha + m\sigma)\dot{w} \quad (I.2.4)$$

ou, en faisant abstraction de la déformation élastique instantanée et de la déformation viscoélastique à climat constant:

$$\dot{\epsilon}_{hyg} + \dot{\epsilon}_{ms} = (\alpha + m\sigma)\dot{w} \quad (I.2.5)$$

avec σ la contrainte, E le module d'Young, α le coefficient d'expansion hydrique et m le coefficient hydroviscoélastique, qui peut prendre les valeurs suivantes:

m^+ : dans le cas d'une humidification ($\dot{w} > 0$);

m^- : dans le cas d'un séchage ($\dot{w} < 0$).

Initialement, Ranta-Maunus considérait une troisième valeur m^{++} dans le cas d'une augmentation de la teneur en eau à un niveau jamais précédemment atteint (cas de la première absorption).

Un point important de cette modélisation est qu'elle suppose que la déformation due à l'effet mécanosorptif est reliée linéairement à la teneur en eau, par les constantes hydroviscoélastiques. Des simulations ont été réalisées de manière à comparer et évaluer les constantes pour différents types d'essais réalisés par l'auteur, ou à partir de diverses autres sources expérimentales. Un modèle du même type a été utilisé également par Martensson (1988), à la différence que le paramètre m dépend de la déformation mécanosorptive.

1.2.4.3 MODÈLE DE HUNT

Une conséquence importante de l'utilisation de ces modèles est qu'ils ne sont pas applicables si l'on considère l'hypothèse qu'il existe une limite de la déformation mécanosorptive.

Un premier modèle a été proposé pour ce type d'approche par Hunt et Shelton (1988). La déformation mécanosorptive est donnée sous la forme:

$$\varepsilon_{ms} = \varepsilon^\infty \left[1 - \exp \left(-a \sum_{i=1}^n \Delta w \right) \right] \quad (1.2.6)$$

où ε^∞ est la déformation limite et n le nombre de cycles de variation de teneur en eau.

Les auteurs proposent également une dépendance des variations dimensionnelles par rapport à la déformation, suite aux résultats obtenus dans leurs travaux, sous la forme:

$$\dot{\varepsilon}_{hyg} = (\alpha - b\varepsilon)\dot{w} \quad (1.2.7)$$

avec b une constante positive.

Hunt (1989, 1991) a ensuite montré, en se basant sur la représentation de trajectoires mécanosorptives, comme schématisées sur la figure 1.2.19, qu'il est possible de fitter la

déformation mécanosorptive de manière suffisamment précise en utilisant une équation de la forme:

$$\varepsilon_{ms} = \sigma_0 \left[J_1 \left(1 - e^{-n/N_1} \right) + J_2 \left(1 - e^{-n/N_2} \right) \right] \quad (I.2.8)$$

avec J_1 et J_2 : des complaisances caractéristiques;
 n : nombre de cycles de variation de la teneur en eau;
 N_1 et N_2 : nombre de cycles caractéristiques.

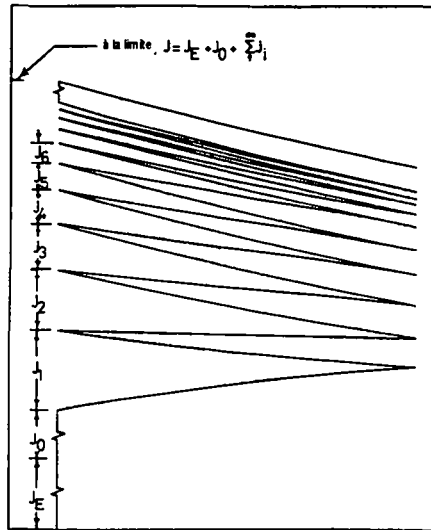


Figure 1.2.19. Schématisation d'une trajectoire mécanosorptive

Cette équation est valable pour des cycles d'humidité uniformes (entre les mêmes valeurs de teneur en eau). L'auteur a suggéré, pour pouvoir l'étendre à des cycles non-uniformes, de remplacer les termes $-n/N_i$ par $-\sum |S_w|/N_i$, où S_w correspond à un changement quelconque de teneur en eau.

1.2.4.4 MODÈLE DE TORATTI

Toratti (1990, 1992) a proposé une modélisation faisant intervenir - selon la direction de sollicitation - une combinaison de modèles basés sur les deux approches précédentes.

Dans le premier modèle, la déformation mécanosorptive dépend linéairement de la teneur en eau, selon l'équation:

$$\varepsilon_{ms}(t) = J_0 \int_0^t \sigma(t') \left\{ d \left| \frac{\partial W}{\partial t'} \right| + e \left| \frac{\partial w}{\partial t'} \right| \right\} dt' \quad (I.2.9)$$

avec J_0 : complaisance élastique de référence;

Cette fois, deux constantes indépendantes d et e sont considérées, avec la particularité que celle multipliée par le terme correspondant à une teneur en eau jamais atteinte auparavant (∂W) est plus importante que celle reliée au terme correspondant aux autres changements de teneur en eau.

Le deuxième modèle est basé sur l'hypothèse de limite de la déformation mécanosorptive. Cette déformation est définie par:

$$\varepsilon_{ms}(t) = J^\infty \left\{ 1 - \exp \left[-c \left(\int_{t'}^t |dw(t'')| \right) \right] \right\} \sigma \quad (\text{I.2.10})$$

avec J^∞ : compliance à l'état limite.

Dans le cas où la sollicitation est appliquée en tension, seul le deuxième modèle est utilisé. Dans le cas où la sollicitation est appliquée en compression, l'auteur utilise une combinaison des deux modèles.

1.2.4.5 MODÈLE DE BAZANT

Une modélisation basée sur le processus de diffusion de l'eau dans le bois a été proposée par Bazant (1985), où il introduit la distinction entre une microdiffusion et une macrodiffusion. Pour un comportement à climat constant (en humidité et en température), il écrit la loi de comportement en se basant sur un modèle de Maxwell généralisé de i branches, et en tenant compte de termes relatifs à une expansion hydrique et thermique. La forme de l'équation proposée est la suivante:

$$\dot{\varepsilon}_{tot} = \frac{\dot{\sigma}_i}{E_i} + \frac{\sigma_i}{\eta_i} + \alpha \dot{h} + \beta \dot{T}, \quad \sigma = \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (\text{I.2.11})$$

Avec h l'humidité relative dans les lumens, α : le coefficient d'expansion hydrique, β le coefficient de dilatation thermique.

Bazant propose ensuite deux types d'approches. Dans la première, il considère l'accélération du fluage comme induite par le processus de diffusion local entre macropores et micropores - microdiffusion. Il donne une expression de la viscosité qui dépend de \dot{h} et \dot{T} :

$$\frac{1}{\eta_i} = \frac{1}{\eta_i^0} f_i(\dot{H}) \quad , \quad \frac{1}{\eta_i^0} = \frac{\varphi_i(w)}{E_i \tau_i} \exp\left(\frac{Q_c}{RT_0} - \frac{Q_c}{RT}\right) \quad (I.2.12)$$

avec Q_c : énergie d'activation du fluage,

$\dot{H} = \dot{h} + c\dot{T}$ où c est une constante,

$\varphi_i(w) \cong k(w_{sat} - w)$ où k est une constante,

$f_i(\dot{H}) \approx f_i^0 (1 + a_1 |\dot{H}|)$ où f_i^0 et a_1 sont deux constantes positives.

Dans la deuxième approche, l'auteur considère que l'effet de l'humidité et de la teneur en eau sur le fluage peut être considéré comme étant dû à des contraintes induites par le retrait/gonflement et la dilatation thermique. Il propose dans ce cas le système d'équations suivant:

$$\dot{\epsilon}_{tot} = \frac{\dot{\sigma}_i}{E_i} + \frac{\sigma_i}{\eta_i^0} + \dot{\epsilon}_S + \dot{\epsilon}_T \quad (I.2.13)$$

avec

$$\dot{\epsilon}_S = \alpha(1 + r_i \sigma_i \text{sign}(\dot{H})) \dot{h} \quad \text{et} \quad \dot{\epsilon}_T = \beta(1 + \rho_i \sigma_i \text{sign}(\dot{H})) \dot{T} \quad (I.2.14)$$

où r_i et ρ_i sont des constantes positives.

La viscosité η_i^0 dépend dans ce cas de h et T , mais pas de \dot{h} et \dot{T} .

Cette théorie, dans laquelle l'auteur part des équations caractérisant la macro et la microdiffusion, est principalement reliée aux travaux qu'il a effectué sur le béton pour tenter de rendre compte de l'effet Pickett. L'identification et l'évaluation des paramètres qui entrent en jeu reste cependant bien difficile, ainsi que la vérification pratique permettant d'évaluer l'importance réelle de ces considérations dans l'effet mécanosorptif.

I.2.4.6 MODÈLE DE VAN DER PUT

Toujours basée sur le niveau moléculaire, la théorie thermodynamique développée par Van Der Put (1989) est reliée au processus de rupture et reformation des liaisons intermoléculaires des constituants du bois apparaissant lors d'une variation de teneur en eau. Il considère le matériau comme étant élastique, sauf aux sites de déformation, c'est-à-dire là où les molécules peuvent bouger (par exemple à l'arrivée d'une molécule d'eau), où il y aura apparition de contraintes

locales. L'auteur écrit alors une équation de comportement basée sur l'approche cinétique, qui prend la forme suivante:

$$\dot{\epsilon}_{tot} = \dot{\epsilon}_E + \dot{\epsilon}_{visc} = \frac{\dot{\sigma}_i}{K_i} + (A_i + B_i \epsilon_i) \sinh(\sigma_i \varphi_i (1 - C_i \epsilon_i)) \quad (I.2.14)$$

pour un système de Maxwell généralisé, i étant l'une des branches, A, B et C des constantes.

Les φ_i sont des fonctions d'activation (énergie ou volume d'activation). D'après sa théorie, l'auteur trouve que l'effet mécanosorptif serait d'importance moindre pour des éprouvettes de grandes dimensions, où les changements de teneur en eau se font plus lentement.

I.2.4.7 MODÈLE DE GRIL

Une autre modélisation, basée sur une prise en compte des caractéristiques de la microstructure est donnée par Gril (1988).

Il suppose que le bois peut être considéré comme un matériau à deux phases, disposées en parallèle vis-à-vis de la contrainte: l'une représente le réseau microfibrillaire (partie élastique), l'autre la matrice amorphe (partie visqueuse), figure I.2.20.

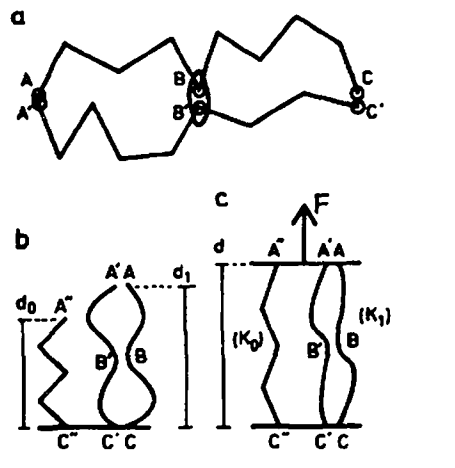


Figure I.2.20. Modélisation de la microstructure du bois. a: représentation de la matrice par deux chaînes polymériques avec des liaisons fortes AA' et CC' et une liaison faible BB'

L'effet mécanosorptif est alors considéré comme induisant une baisse momentanée des barrières de potentiel, due à une diminution temporaire de l'énergie de liaison. Ceci permet une accélérations des transitions, d'où un effet sur la déformation.

L'obtention de paramètres permettant l'évaluation du modèle est cependant difficile, et une interprétation physique des processus entrant effectivement en jeu dans l'effet mécanosorptif également.

I.2.4.8 MODÈLE DE MUKUDAI ET YATA

Mukudai et Yata (1986, 1987, 1988) ont proposé un modèle, basé sur la microstructure du bois, tenant plus précisément compte de l'effet de rupture momentanée de l'interface S1 / S2 au niveau de la paroi cellulaire présentée précédemment. Celle-ci fait intervenir une représentation par modèles rhéologiques, donnée figure I.2.21.

Chaque sous-ensemble (modèle I, relatif au bloc S2 + S3; modèle II, relatif au bloc S1 + P + I) comporte un modèle de Maxwell en série avec un modèle de Voigt, permettant de représenter le comportement viscoélastique linéaire. En plus de cela, deux éléments de "retrait-gonflement" (A1 et A2) sont considérés en série. Les deux sous-ensembles sont reliés par l'intermédiaire d'une barre à rotules, comportant un bloc dont la longueur varie suivant le sens de l'humidification. Au début de la phase de changement d'humidité, les rotules sont mobiles, puis deviennent fixes avec l'atteinte de la stabilité en humidité.

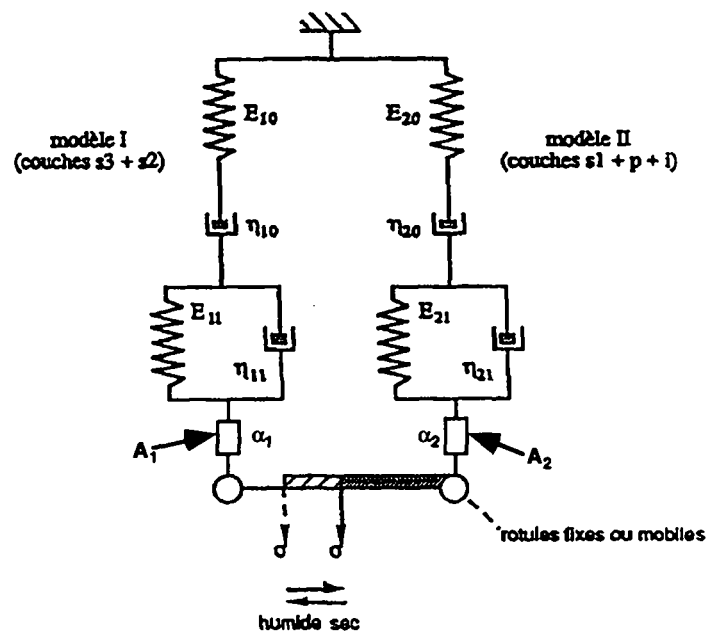


Figure I.2.21 Modèle de Mukudai relatif au comportement du bois sous climat variable.

Le fonctionnement de cette barre intervient dans ce modèle plutôt comme considération de cas suivant les variations d'humidité. Cela ne permet pas d'avoir un modèle rhéologique au sens

pur du terme, où l'on pourrait écrire une loi de comportement unique. Par ailleurs, les valeurs des paramètres prises par les auteurs pour les calculs (biais de contrainte, temps d'arrivée à la resolidarisation) ne sont pas correctement justifiées.

Enfin, les essais effectués pour vérifier la validité du modèle ont été réalisés pour des niveaux de contrainte élevés (jusqu'à 45% de la contrainte de rupture), ce qui rentre dans le domaine non-linéaire, et n'est donc pas cohérent avec le modèle choisi.

I.2.5 CONCLUSION

Comme on a pu le constater tout au long de ce chapitre, les effets engendrés par le couplage entre l'application d'une sollicitation mécanique et hydrique sur le matériau bois donnent lieu à des réponses dont l'interprétation s'avère être d'une grande complexité.

Plusieurs hypothèses ont été proposées quant aux mécanismes qui interviennent dans les phénomènes observés:

- Soit ils se situent principalement au niveau moléculaire et sont liés aux processus de rupture et de reformation de liaisons hydrogènes des régions amorphes des chaînes de cellulose.
- Soit ils se situent principalement au niveau de la microstructure du bois. Ils sont liés à la configuration ou à l'orientation des microfibrilles dans les couches de la paroi cellulaire (S2).

Quelle que soit l'hypothèse considérée, il reste toujours plusieurs questions en suspens, qui ne permettent pas de l'accepter de manière totalement convaincante.

Dans l'hypothèse de Boyd, une vérification quantitative des déformations engendrées sur la base de ce mécanisme pour les divers cas considérés - augmentation et diminution de la teneur en eau, cas de la première augmentation de teneur en eau, sollicitation en tension et compression - serait un apport important pour justifier de la validité du modèle et/ou en donner les limites.

Comment considérer l'hypothèse par Hoffmeyer et Davidson dans le cas d'une sollicitation en tension, où les effets mécanosorptifs sont également observés ?

L'objectif principal de ce travail de thèse est de tenter d'apporter des éléments nouveaux, permettant d'expliquer les effets mécanosorptifs observés, particulièrement en ce qui concerne le niveau de la structure où se dérouleraient les principaux mécanismes mis en jeu.

PARTIE II:

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE II.1

PROGRAMME D'EXPÉRIMENTATION

II.1.1 INTRODUCTION

Malgré le nombre et la diversité des essais réalisés pour tenter de caractériser le comportement différé du bois à climat variable, ceux-ci n'ont pu permettre d'en dégager une interprétation satisfaisante. Ceci est sans nul doute relié à la très grande complexité du matériau lui-même. Ses caractéristiques structurelles, physiques ou chimiques - liées à ses principaux composants, influencées lors de sa formation - sont, en effet, susceptibles de contribuer de façon plus ou moins importante sur le comportement hygro-thermo-mécanique du bois. Il peut donc devenir difficile d'isoler réellement l'origine d'un mécanisme observé.

Pour tenter d'apporter des informations supplémentaires à l'étude des effets mécanosorptifs, un travail expérimental a été réalisé pour analyser le comportement micromécanique du bois sous climat variable.

Ce choix a été guidé par des travaux dont l'origine remonte à la fin des années 80. Ceux-ci, dans un premier temps axés uniquement sur la modélisation, ont débuté par l'évaluation du module d'élasticité d'une fibre de bois, Navi (1988), puis d'un groupe de fibres de bois de printemps et d'été, Navi et Huet (1989). Parallèlement, une étude expérimentale a été menée sur des copeaux de bois d'Épicéa de Sitka (*Sitka Picea*) de très faible épaisseur - correspondant à la superposition de quatre fibres environ. Des mesures du module d'Young, à partir d'essais de traction, ont été réalisées sur le bois d'été et de printemps, Foret (1988). L'allure des courbes force-déplacement obtenues lors de ces essais, différente de celles obtenues sur des éprouvettes de dimensions plus importantes, ont ensuite fait l'objet d'un travail expérimental propre, Hadj-Mohamed (1989). Les résultats et interprétations qui en ont découlé sont donnés dans Navi et al. (1989 et 1990). Les hypothèses proposées ont ensuite pu être vérifiées - grâce à la poursuite du développement du dispositif expérimental, et à l'utilisation de moyens holographiques. L'ensemble des résultats de cette étude, donné dans Navi et al. (1995), a permis de relever l'intérêt d'une analyse du comportement d'éprouvettes de bois de petites dimensions - quelques

fibres seulement en épaisseur - pour expliquer le comportement du bois du point de vue macroscopique.

Le travail de thèse présenté ici s'inscrit donc comme une continuité de l'étude du comportement micromécanique du bois, et plus particulièrement de son comportement différé sous climat variable.

Ses particularités sont liées à l'utilisation d'éprouvettes de très faible épaisseur, ainsi qu'au dispositif d'essai mis en place, permettant la réalisation de programmes de chargements complexes.

L'utilisation de petites éprouvettes a nécessité une préparation expérimentale spécifique.

Pour cela, le premier travail a été de développer un ensemble expérimental adapté et complet. Celui-ci se devait de posséder avant tout un dispositif de mesure précis, ainsi que de permettre un bon contrôle des conditions environnementales imposées à l'éprouvette. D'autre part, une préparation des éprouvettes a également été nécessaire pour une utilisation appropriée sous la sollicitation de tension imposée lors de l'ensemble de nos essais. Ces deux points font l'objet du chapitre II.2.

Une fois ce système mis en place, il a été possible de procéder à la campagne d'expérimentation. Les grandes étapes du plan d'expérience suivi sont décrites dans le paragraphe qui suit.

II.1.2 PLAN D'EXPÉRIENCES

Les essais se sont déroulés en trois grandes étapes:

- les essais préliminaires (chapitre II.3), décrits sur le schéma II.1.1;
- les essais de fluage-recouvrance et relaxation-effacement à climat constant (chapitre II.4), décrits sur le schéma II.1.2;
- les essais de fluage-recouvrance et relaxation-effacement à climat variable (chapitre II.5 à II.10), décrits sur les schémas II.1.3 et II.1.4.

* voir détail à partir du chapitre II.6.

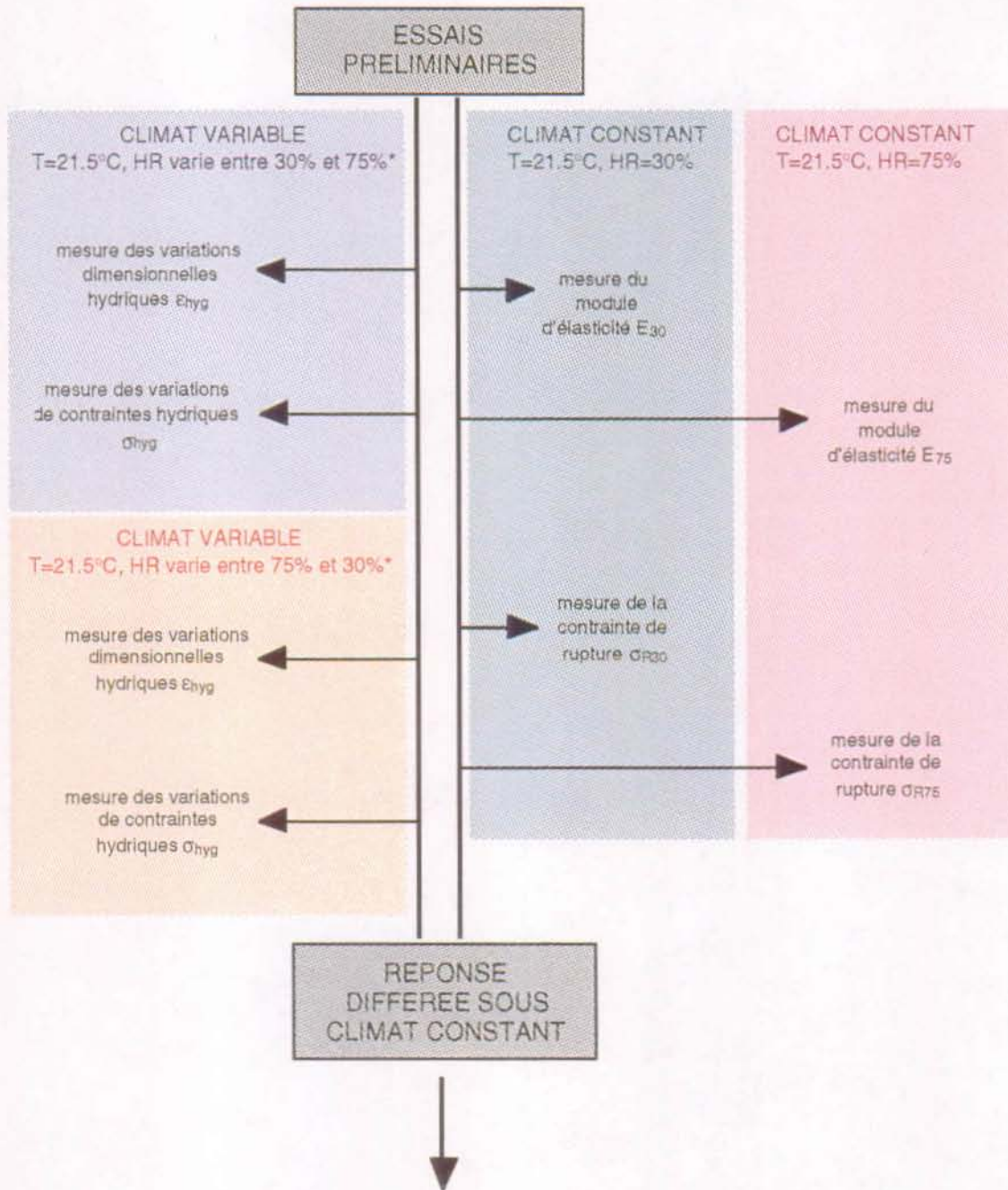


Schéma II.1.1 Plan des essais préliminaires

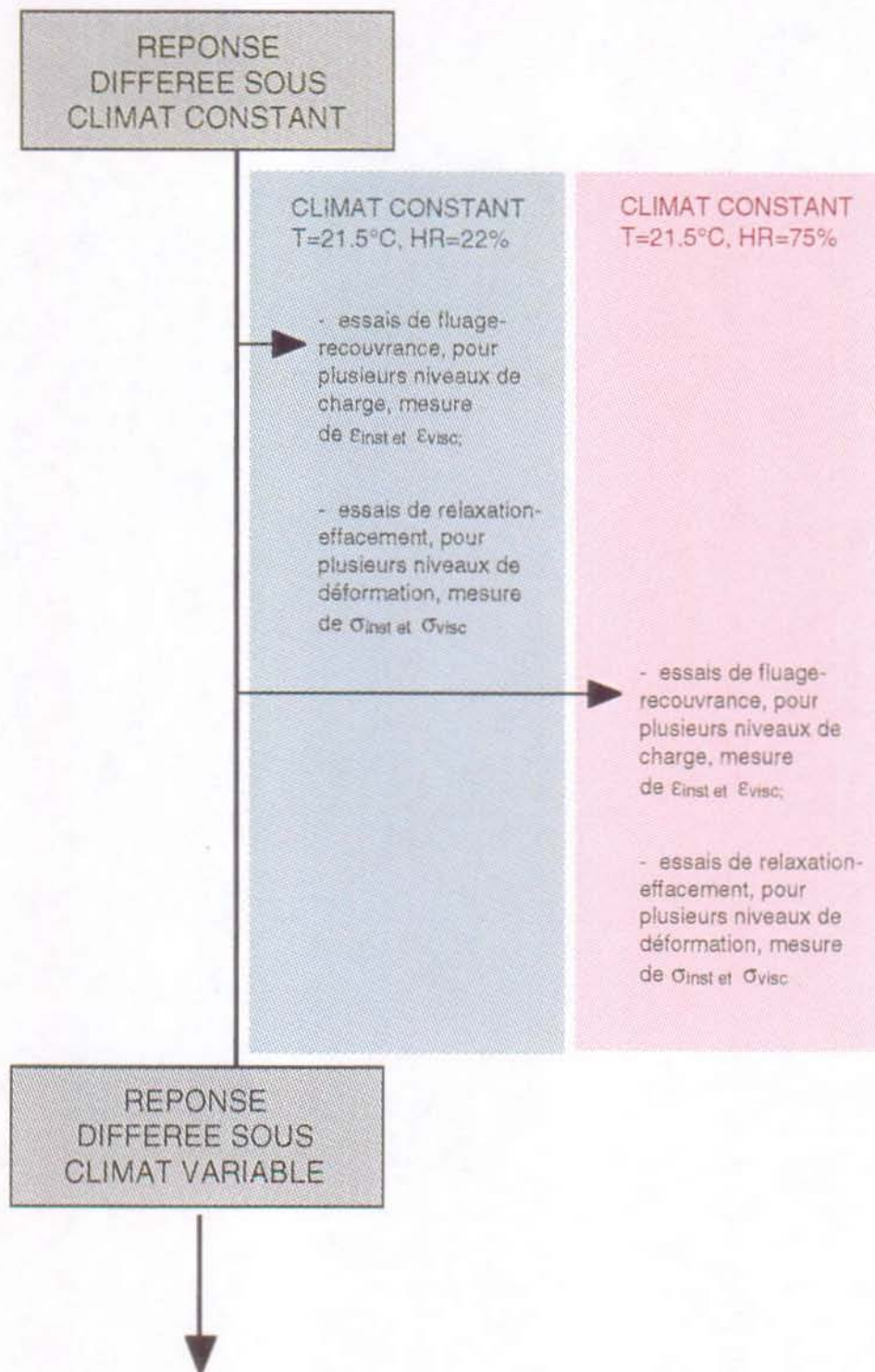


Schéma II.1.2 Plan des essais de fluage-recouvrance et relaxation-effacement effectués sous climat constant

REPONSE
DIFFEREE SOUS
CLIMAT VARIABLE

CLIMAT VARIABLE
T=21.5°C, HR VARIE ENTRE 30% ET 75%

observation des caractéristiques
générales du comportement
hygro-mécanique différé:
essais de fluage-recouvrance
mesure de ϵ_t , calcul de ϵ_r

CLIMAT VARIABLE
T=21.5°C, HR VARIE ENTRE 75% ET 30%

observation des caractéristiques
générales du comportement
hygro-mécanique différé:
essais de fluage-recouvrance
mesure de ϵ_t , calcul de ϵ_r

CLIMAT VARIABLE
T=21.5°C, HR VARIE ENTRE 30% ET 75%

étude de l'influence du décal de
mise en route du cyclage
d'humidité:
essais de fluage-recouvrance
mesure de ϵ_t , calcul de ϵ_r

CLIMAT VARIABLE
T=21.5°C, HR VARIE ENTRE 30% ET 75%

étude de l'influence de cycles
d'humidité sous cycles de
charge:
essais de fluage-recouvrance
mesure de ϵ_t , calcul de ϵ_r

CLIMAT VARIABLE
T=21.5°C, HR VARIE ENTRE 30% ET 75%

étude de l'influence de cycles
d'humidité sous décharges
partielles:
essais de fluage-recouvrance
mesure de ϵ_t , calcul de ϵ_r

Schéma II.1.3 Plan des essais de fluage-
recouvrance effectués sous
climat variable

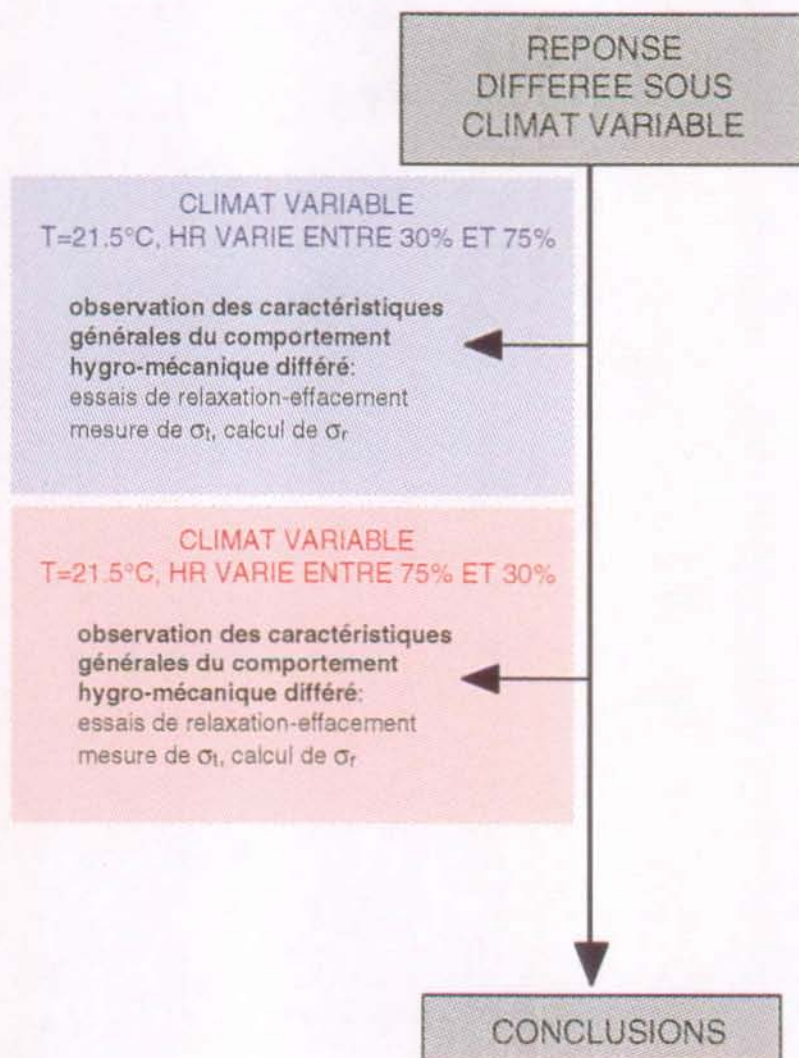


Schéma II.1.4 Plan des essais de relaxation-effacement effectués sous climat variable

CHAPITRE II.2

PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

II.2.1 INTRODUCTION

La première partie de ce chapitre est consacrée à la préparation des éprouvettes utilisées lors de la campagne d'essais. Le choix des dimensions retenues, puis la sélection des éprouvettes de bois utilisées sont explicités. La préparation spécifique de ces dernières pour la réalisation d'essais de traction est enfin exposée.

La deuxième partie est relative au dispositif expérimental. La description des principales caractéristiques de la presse utilisée ainsi que de la cellule hygrothermique et du système de régulation des conditions environnementales, réalisés dans notre laboratoire, est effectuée.

II.2.2 CARACTÉRISTIQUES DES ÉPROUVETTES

II.2.2.1 CHOIX DES DIMENSIONS

Excepté quelques premiers auteurs (Eriksson et Noren, 1965; Hearmon et Paton, 1964; Armstrong et Kingston, 1961), les essais déjà réalisés pour mettre en évidence l'effet mécanosorptif ont été principalement effectués sur des éprouvettes de dimensions relativement grandes, dont les épaisseurs variaient autour du centimètre.

En ce qui concerne nos essais, ceux-ci ont été réalisés sur des éprouvettes de bois de pin maritime (*Pinus Pinaster*), coupées dans la direction longitudinale. Les dimensions choisies ont été de:

- 30 mm dans la direction longitudinale;
- 3 mm dans la direction transversale;
- de l'ordre de 0.7 mm dans la direction radiale.

Les éprouvettes ainsi choisies comportent une vingtaine de fibres, au maximum, dans le sens de l'épaisseur. Cette dimension a dû être augmentée - par rapport aux 100 µm des copeaux utilisés lors des essais de traction - pour éviter les problèmes de flambement qui pourraient survenir lors de la partie de remise en forme des échantillons, faisant suite au maintien de la déformation (essai de relaxation-effacement) effectuée à climat variable.

Le choix de ces faibles dimensions comporte plusieurs motivations. En effet, il est tout d'abord possible de sélectionner ainsi un bois sans défauts macroscopiques.

De plus, cela permet de pouvoir choisir à volonté les éprouvettes dans un cerne de bois d'été ou dans un cerne de bois de printemps.

Mais le point le plus important est que la stabilisation des échantillons vis-à-vis de l'humidité relative ambiante, obtenue après un temps relativement court, permet de diminuer de manière importante la durée d'un essai. Une mesure des variations dimensionnelles hydriques sous charge nulle, permet, en effet, d'observer une stabilisation de la déformation après une durée maximale de 3 à 4 heures. Ceci conduit à penser que l'influence des gradients d'humidité pouvant exister après cette durée peut être négligée.

Malgré cela, les éprouvettes présentent encore quelques défauts par rapport à une éprouvette idéale. Tout d'abord, une certaine non-uniformité peut subsister dans le sens de la longueur. Elle est reliée, en premier lieu, à l'usinage des éprouvettes, qui peut laisser apparaître de légères différences dans l'épaisseur ou des défauts de coupe, tels fibres arrachées par exemple. D'autre part, il peut exister une différence d'orientation moyenne des fibres sur la longueur, malgré le fait qu'elles soient, en principe, toutes orientées longitudinalement, puisque l'on ne contrôle la direction que sur les deux faces de l'éprouvette, non pas sur toute l'épaisseur. Il peut enfin exister une différence quant à l'orientation moyenne des microfibrilles dans une section - suivant le cerne considéré, par exemple - reliées aux conditions de croissance de l'arbre. Cela conduit également à considérer que les éprouvettes ne sont pas représentatives dans la direction radiale.

En résumé, bien que le choix de ces dimensions permet d'éviter les hétérogénéités au niveau macroscopique, il importe de tenir compte de celles apparaissant au niveau microscopique. Pour tenter de remédier à ce problème, il a fallu non seulement préparer minutieusement les éprouvettes, mais également et surtout réaliser le maximum d'essais et de mesures sur le même échantillon. Ces deux points sont détaillés dans les paragraphes qui suivent.

II.2.2.2 MODE OPÉRATOIRE DE LA PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

L'ensemble des éprouvettes utilisées proviennent du même arbre, et ont été coupées uniquement sur un nombre réduit de cernes, sélectionnés pour leur épaisseur (schéma II.2.1), et leur position. Jusqu'ici, seules les éprouvettes de bois d'été ont été étudiées, l'ensemble nécessiterait le double d'essais et donc de temps.

Sur un cerne ont alors été sciées des "plaquettes" de bois d'épaisseur désirée. Un maximum d'éprouvettes, quatre ou plus, sont ensuite découpées après repérage de la direction des fibres, à l'aide d'une lunette binoculaire, de manière à former des séries sur lesquelles seront réalisées un type d'essai donné. Cela après choix des plaquettes selon l'uniformité, à l'oeil nu, de leur microstructure.

L'étape suivante consiste en la préparation des échantillons de manière à ce qu'ils puissent être utilisés sur la presse. En effet, les éprouvettes étant toujours sollicitées en traction, un problème se posait en ce qui concernait le serrage entre les mors. Le bois étant très fragile dans le sens transversal, on risquait, au vu de l'épaisseur faible, d'endommager l'éprouvette de façon trop importante. Ce problème avait été résolu, lors de l'utilisation des copeaux, par le collage de l'éprouvette entre deux supports en carton, comme montré sur la figure II.2.1.

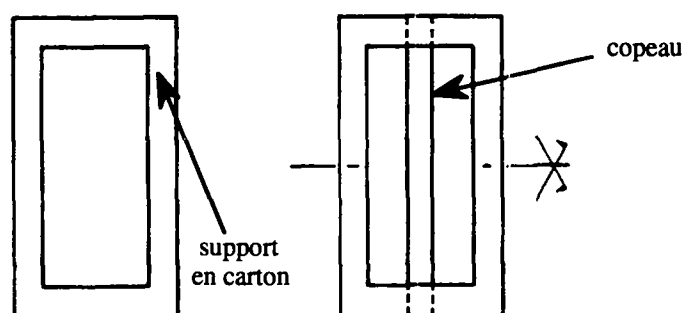


Figure II.2.1. Préparation d'un copeau de bois à la fixation sur presse de traction, d'après Navi et al. (1995).

Cette technique n'a pu être utilisée dans notre cas, à cause de l'épaisseur plus importante des échantillons. Il a finalement été décidé d'enrober l'extrémité des éprouvettes à l'aide d'une résine.

La mise en place de cet enrobage se fait par l'utilisation de moules en téflon, usinés selon la dimension des éprouvettes.

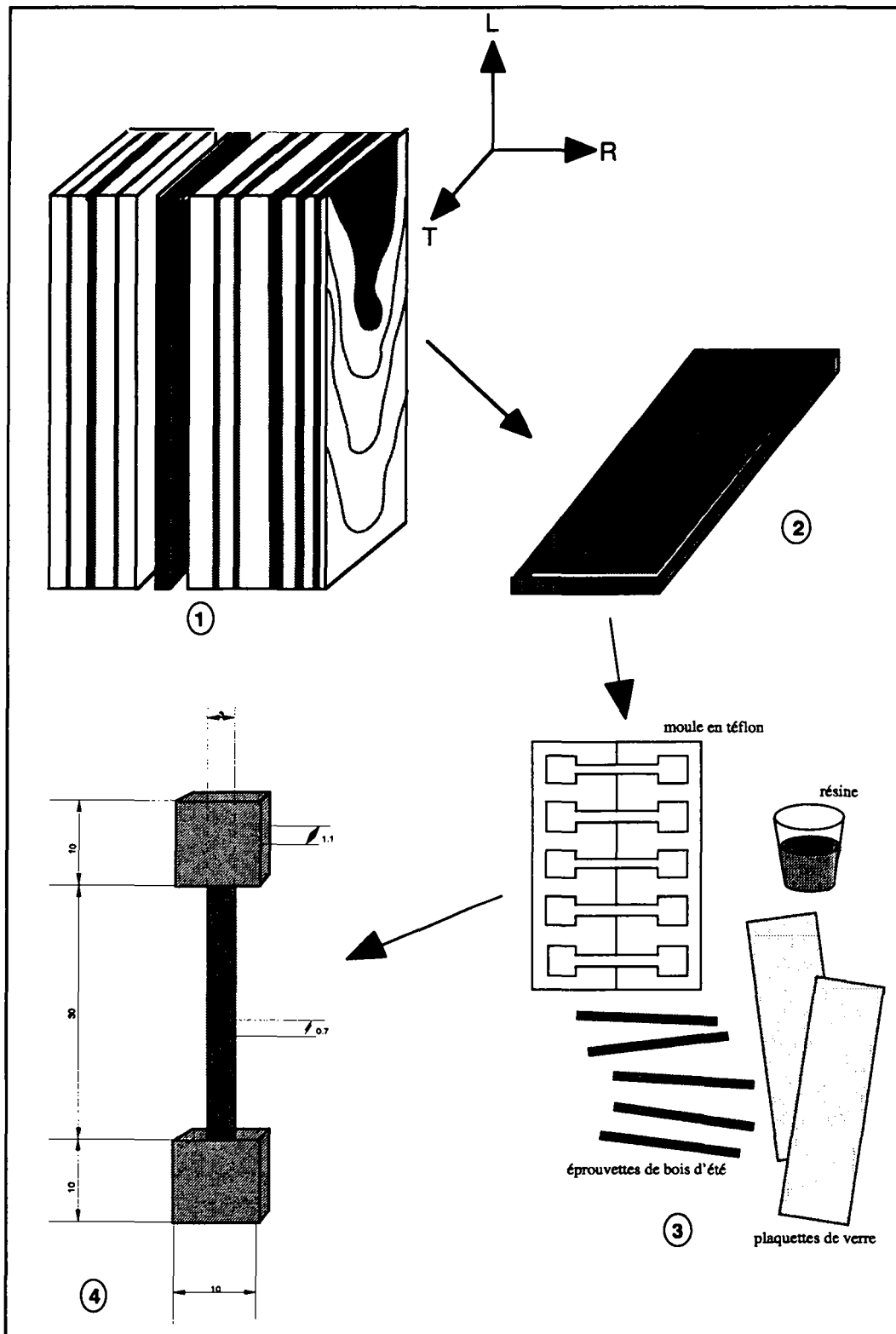


Schéma II.2.1. Étapes de sélection et préparation des éprouvettes: 1.- Sélection des cernes de bois d'été; 2.- Plaquette de bois d'où sont découpées les éprouvettes; 3.- Nécessaire de préparation des éprouvettes; 5.- Eprouvette finale, extrémités renforcées. (Les cotes sont en mm.)

Aux deux extrémités, un espace plus large ($10 \times 10 \times 1.1 \text{ mm}^3$) permet d'y couler la résine de renforcement. Cette résine est chargée par une poudre de quartz de manière à éviter au maximum une pénétration au sein de la structure du matériau. L'observation microscopique d'une éprouvette enrobée de résine colorée par un agent fluorescent a permis d'en effectuer la vérification.

Après séchage de la résine et démoulage, les éprouvettes sont numérotées par séries. Une mesure de la section moyenne est effectuée, et la direction des fibres est contrôlée une deuxième fois. Elle sont alors prêtes à l'emploi, figure. II.2.2.

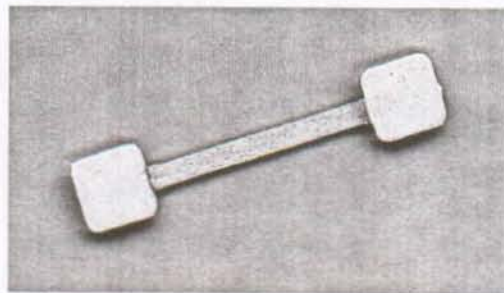


Figure II.2.2. Éprouvette type de bois d'été de pin maritime, prête être utilisée sur la presse.

Une statistique est ensuite effectuée sur le module d'élasticité et la contrainte à la rupture en traction, à partir d'essais réalisés sur une éprouvette test prélevée dans chacune des séries, comme illustré sur la figure II.2.3. Les résultats obtenus sont donnés dans le chapitre II.3.

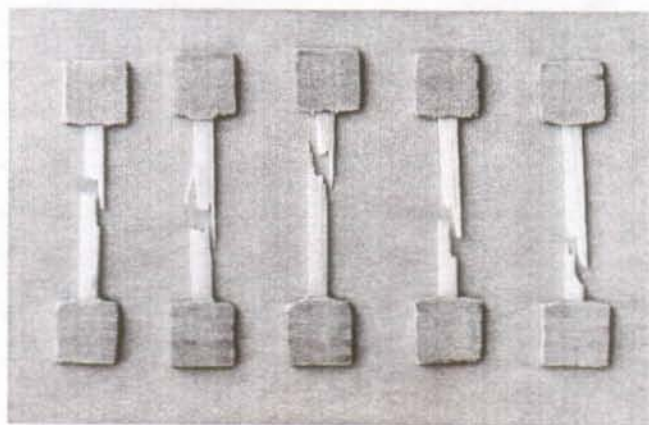


Figure II.2.3. Éprouvette de bois d'été de pin maritime, après utilisation lors d'essais de traction (détermination du module d'élasticité et de la contrainte de rupture).

II.2.2.3 DÉROULEMENT DES ESSAIS

Malgré un tri minutieux des éprouvettes, les mesures de caractéristiques mécaniques - telles le module d'élasticité E_{30} ou E_{75} , la contrainte de rupture σ_{R30} ou σ_{R75} - ou de caractéristiques hydriques - telles les variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} - nous ont permis d'observer, lors d'essais préliminaires, que les dispersions pouvaient être assez importantes. En effet, les modules E_{30} variaient par exemple entre 5 et 15 GPa, la contrainte à la rupture σ_{R30} entre 75 et 125 MPa (chapitre II.3, figures II.3.1, II.3.2 et II.3.3). Les coefficients d'expansion hydrique, quant à eux, pouvaient varier d'un facteur 3.

Pour ces raisons, il a été décidé, d'une part, de réaliser des essais comparatifs sur une même série d'éprouvette. De cette manière, il est en effet plus probable que le niveau de sollicitation appliqué soit effectivement dans le même ordre de grandeur, idem en ce qui concerne le module d'élasticité des échantillons, de même alors pour la sensibilité au fluage et à l'effet mécanosorptif.

D'autre part, nous avons constaté que, même dans une série donnée, la mesure des variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} pouvait présenter des écarts non négligeables entre les échantillons. C'est pour cette raison que ces variations dimensionnelles ont été mesurées de manière systématique sur chaque éprouvette, pour plusieurs cycles de variations d'humidité relative entre les paliers considérés, avant l'application du chargement. La même remarque est valable en ce qui concerne les mesures de variations de contraintes hydriques σ_{hyg} .

De plus, lorsque le type d'essai le permettait, le fluage à climat constant a également été mesuré pendant plusieurs heures, avant de procéder aux variations climatiques.

II.2.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Pour permettre l'étude des effets mécanosorptifs sur des éprouvettes de bois de petites dimensions, il est nécessaire, d'une part, de disposer d'un moyen de mesure suffisamment précis, et d'autre part de pouvoir contrôler de manière correcte les conditions environnementales imposées à l'éprouvette. Cela nous a amené à la mise en place d'un dispositif expérimental spécifique. Sa mise au point a nécessité beaucoup de temps.

En fait, l'installation décrite ci-dessous constitue le deuxième système utilisé pour tenter de réaliser les essais.

En effet, une première presse de type Minimat (Polymer Laboratories, Grande-Bretagne) avait d'abord été acquise dans ce but. Il s'agissait à l'époque de la seule machine disponible sur le marché pour réaliser ce type d'expériences. Ses très petites dimensions (de l'ordre de 50 cm de

longueur, 20 cm de largeur et 10 cm de hauteur) lui permettait d'être placée dans un aquarium hermétique contenant des solutions salines saturées fixant le pourcentage d'humidité relative désiré. Cependant, cette presse s'est révélée ne pas disposer d'un système de mesure suffisamment précis pour les essais à réaliser. En effet, nous avons constaté qu'un nombre trop important de jeux mécaniques influait sur les mesures de déformation, celles-ci restant toujours dans une gamme de valeurs très faibles (inférieures à 100 μm). Malgré plusieurs modifications effectuées sur la machine, la presse, influencée également par son manque de stabilité - dû aux nombreux déplacements -, ne nous avait pas satisfaits quant à la poursuite de l'expérimentation.

Il a donc été décidé de faire construire une nouvelle presse spécialement adaptée à nos besoins, et de repenser également le système de contrôle des conditions climatiques, en particulier au niveau d'un maintien précis des conditions isothermes autour de l'éprouvette et de l'indépendance des paramètres température et humidité relative.

Le dispositif expérimental final comporte:

- une presse de traction-compression, de capacité de charge maximale de 500 N;
- une cellule hygothermique placée autour de l'éprouvette et englobant une partie des tiges de fixation des mors.

La partie la plus importante consiste donc en une presse électromécanique, de type LFEM - HZ 1kN, commandée manuellement par l'intermédiaire d'un boîtier électronique, de type CS - 6000 - PC, et pilotée automatiquement par un ordinateur. L'ensemble est représenté sur la figure II.2.3.



Figure II.2.3. Ensemble de la presse et sa commande

La presse de traction-compression a été élaborée, sur notre demande et selon nos propres spécifications, par la firme Walter & Bai AG, figure II.2.4. Sa capacité maximale de charge est

de 500N, mais il est possible d'ajuster la gamme de force choisie (50N, 100N, 250N, 500N) en fonction du type d'essai à réaliser, de manière à obtenir une meilleure précision de mesure. De même en ce qui concerne le déplacement de la traverse, ainsi que la déformation (1000 μ m, 500 μ m, 200 μ m, 100 μ m). La précision de l'extensomètre utilisé est, pour la pleine échelle, de 1 μ m.

La conception de la machine est à une seule colonne ce qui permet de disposer d'un espace de travail au niveau de l'éprouvette suffisamment important. Les pieds de celle-ci reposent sur des vis micrométriques, ce qui donne la possibilité de pré-régler la distance à l'objectif, dans le cas où l'on souhaiterait réaliser des observations microscopiques au cours d'un essai.

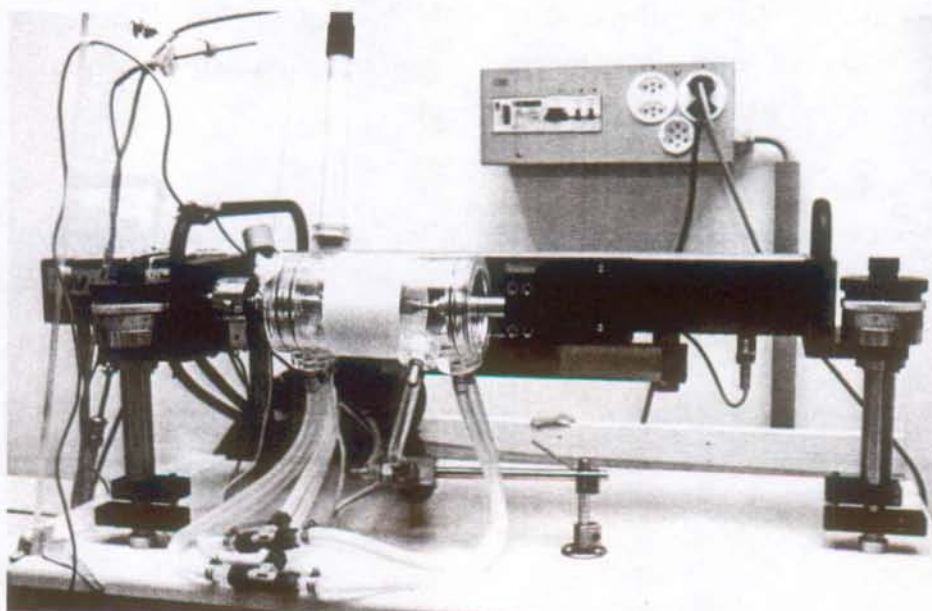


Figure II.2.4. Presse de traction-compression

Le positionnement de la traverse est commandé manuellement par l'intermédiaire d'un boîtier électronique. Le pilotage automatique est réalisé par micro-ordinateur. Celui-ci possède un logiciel permettant la programmation d'essais cycliques en force, déplacement ou déformation (Figure II.2.5.).

Ceci permet en outre la possibilité de réaliser des essais avec régulation de force nulle ou de déformation nulle, et de mesurer ainsi de manière précise les variations dimensionnelles hydriques ou de contraintes hydriques d'une éprouvette soumise à une sollicitation hydrique quelconque. Les mesures précises de la déformation, de même que les programmes de régulation sur ce paramètre, se font par l'intermédiaire d'un extensomètre très léger (8 g), pincé sur l'échantillon de bois.

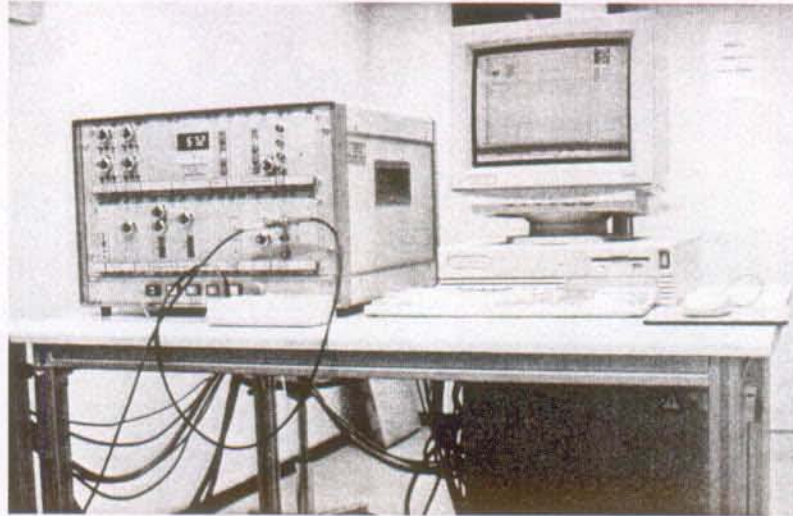


Figure II.2.5. Commandes manuelle et automatique de la presse.

Pour permettre un contrôle des conditions environnementales au niveau de l'éprouvette, une cellule hygothermique, spécialement conçue, a été installée autour des mors. Elle est disposée comme montré sur les figures II.2.6. et II.2.7.

La cellule est composée de deux demi-cylindres de 8 cm de diamètre et environ 10 cm de longueur chacune. Ceux-ci peuvent coulisser sur les bras des mors, de manière à permettre la fixation de l'éprouvette et la mise en place de l'extensomètre.

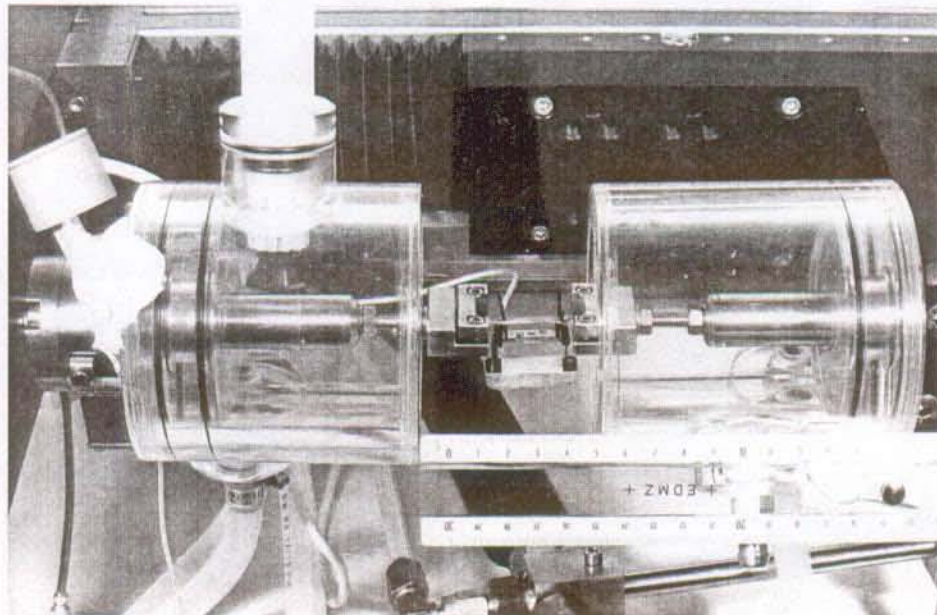


Figure II.2.6. Cellule hygothermique, position ouverte.

Un joint en caoutchouc naturel, possédant une grande élasticité, assure la fermeture de la cellule. Celle-ci est toujours en surpression, il n'y a donc pas de problèmes en ce qui concerne le fait qu'elle soit ou non suffisamment hermétique. La cellule, dans la position fermée est montrée sur la figure II.2.7.

Elle comporte une double-paroi, dans laquelle circule de l'eau à une température donnée, dont la régulation est assurée par un bain thermostatique (Figure II.2.9.), à partir d'une sonde PT100 placée dans la cellule, comme le montre la figure II.2.8. Dans notre programme expérimental, les essais ont été effectués à une seule température, fixée à 21.5°C. Les essais à température variable sont aussi possibles, avec ce même dispositif, dans la gamme 10°C à 60°C.

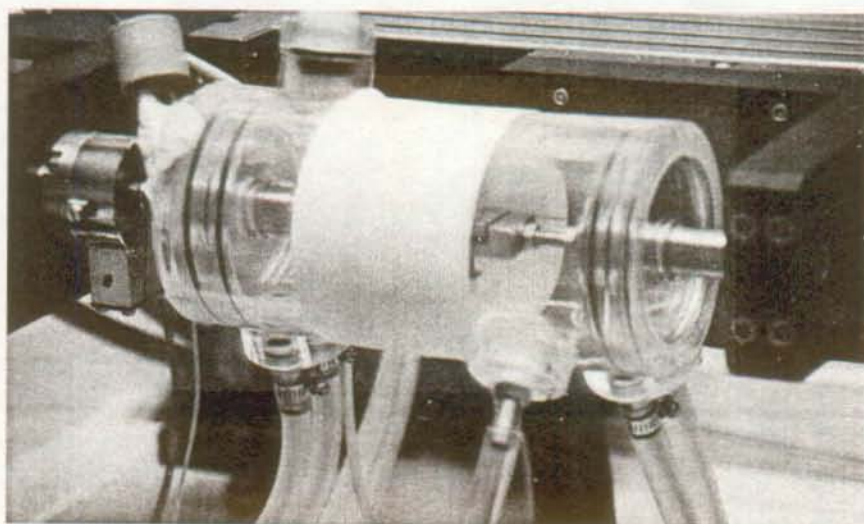


Figure II.2.7. Cellule hygrothermique, position fermée.

Plusieurs orifices ont été percés dans le cylindre de manière à permettre la fixation d'une sonde d'humidité et de température (ROTRONIC), ainsi que pour faire passer la sonde de régulation de la température du bain (figure II.2.8.). Le détail des cotations et des emplacements des orifices de la cellule hygrothermique est donnée en annexe 1.

Le banc d'essai comporte également une régulation de l'humidité indépendante de celle de la température. Des variations rapides de l'humidité relative peuvent être imposées entre divers paliers. Ceci est obtenu en effectuant des mélanges appropriés d'air comprimé sec et humide, réglés par le moyen de débitmètres (figure II.2.9.). Le schéma du système de régulation de la cellule hygrothermique est donné en annexe 2.

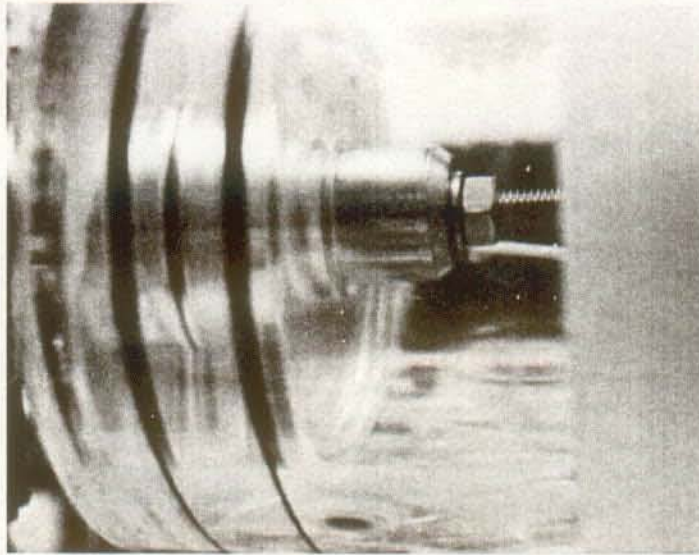


Figure II.2.8. Aperçu des orifices percés pour le placement des sondes

Le système mis en place assure une bonne régulation de la température et de l'humidité. Les variations observées lors des essais de vérification sont, en effet, de l'ordre de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ et de $\pm 1.5\%$ d'humidité relative au maximum. Le seul problème relevé est celui relatif aux changements de pression intervenant dans le local en début et fin de journée, ce qui modifie l'humidité relative, puisque les débitmètres employés y sont sensibles, et que les réglages se font manuellement et en principe une seule fois pour chaque changement d'humidité.

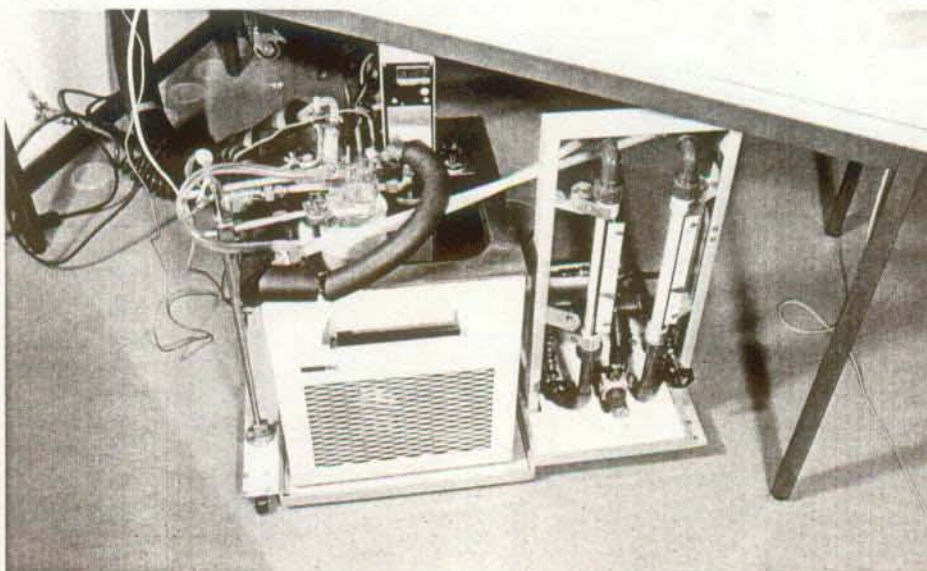


Figure II.2.9. Bain thermostatique de régulation.

Une première amélioration de ce système consisterait à introduire une automatisation au niveau du contrôle de la variation des débits d'air sec et humide.

II.2.4 CONCLUSION

Le dispositif expérimental présenté dans ce chapitre nous a permis de procéder à la réalisation d'essais de caractérisation du comportement hygro-mécanique sur les éprouvettes de bois de petites dimensions.

L'ensemble des essais réalisés, ainsi que les résultats obtenus sont exposés et discutés dans les chapitres II.3 à II.10.

CHAPITRE II.3

ESSAIS PRÉLIMINAIRES

II.3.1 INTRODUCTION

Une première partie des essais a consisté en la détermination de caractéristiques mécaniques - module d'élasticité, contrainte à la rupture - et de caractéristiques hydriques - coefficient d'expansion ou variation des contraintes hydriques dans la direction longitudinale, isotherme de sorption.

II.3.2 MESURES DE CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES ET HYDRIQUES DES ÉPROUVETTES DE FAIBLE ÉPAISSEUR

Pour pouvoir estimer le niveau de charge σ_0/σ_R appliqué lors d'un essai de fluage, il est nécessaire de mesurer préalablement la contrainte de rupture en traction σ_R des éprouvettes de petites dimensions.

La déformation ε_0 appliquée lors d'un essai de relaxation est calculée à partir de la contrainte correspondante, d'après la loi de Hooke:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E} \quad (\text{II.3.1})$$

Le module d'élasticité E devra donc, en plus de la contrainte de rupture, être mesuré préalablement pour réaliser ce type d'essai.

La détermination de ces deux caractéristiques mécaniques fait l'objet du paragraphe II.3.2.1.

D'autre part, une mesure des variations dimensionnelles ε_{hyg} de l'éprouvette, engendrées par les variations d'humidité relative, doit être effectuée pour pouvoir estimer la déformation ε_{ms} résultant de l'effet de couplage - effet mécanosorptif - apparaissant lors de l'application d'une sollicitation mécanique et hydrique.

Nous définissons cette dernière par:

$$\varepsilon_{ms} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{hyg} - \varepsilon_{visc} - \varepsilon_{inst} \quad (II.3.2)$$

avec ε_{tot} : déformation totale, mesurée par l'extensomètre;
 ε_{visc} : déformation de fluage à climat constant;
 ε_{inst} : déformation élastique instantanée, mesurée à la charge ou à la décharge.

Il est alors possible de calculer un coefficient d'expansion hydrique dans la direction longitudinale, par rapport à la variation d'humidité relative ou à la teneur en eau, pour les éprouvettes de faible épaisseur.

La détermination de ce coefficient est donnée dans le paragraphe II.3.2.2., de même que les courbes d'isotherme d'absorption et de désorption relatives aux éprouvettes de bois d'été utilisées. Les résultats de mesures de contraintes hydriques sont également exposés dans ce paragraphe.

II.3.2.1 CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Des essais de traction ont été réalisés sur un nombre donné d'éprouvettes de petites dimensions, dans le but de déterminer une contrainte de rupture et un module d'élasticité moyens. Une première partie de ces essais s'est déroulée sur des échantillons stabilisés dans une atmosphère à 30% d'humidité relative, une deuxième à 75%.

- éprouvettes stabilisées à 30% d'humidité relative

La répartition des résultats obtenus à partir de 30 essais sont donnés sur la figure II.3.1. La contrainte de rupture σ_{R30} et le module E_{30} sont mesurés lors du même essai. Les mesures ont été effectuées de manière systématique sur un échantillon "test" pris dans chaque série d'essai.

On peut observer que:

- ◆ La variation du module d'élasticité E_{30} est dans l'ensemble relativement importante. En effet, les valeurs mesurées sont comprises entre 5 et 15 GPa environ.;
- ◆ La valeur moyenne du module d'élasticité longitudinal E_{30} obtenue est de 10 GPa;
- ◆ La dispersion relative à la contrainte de rupture σ_{R30} est relativement moins importante que celle relative au module. Le 80% des valeurs est, en effet, compris entre 75 et 125 MPa;

- ◆ La valeur moyenne de la contrainte de rupture σ_{R30} est de 100 MPa.
- ◆ Les valeurs de contrainte de rupture σ_{R30} ne sont pas forcément en rapport d'amplitude avec celles du module d'élasticité.

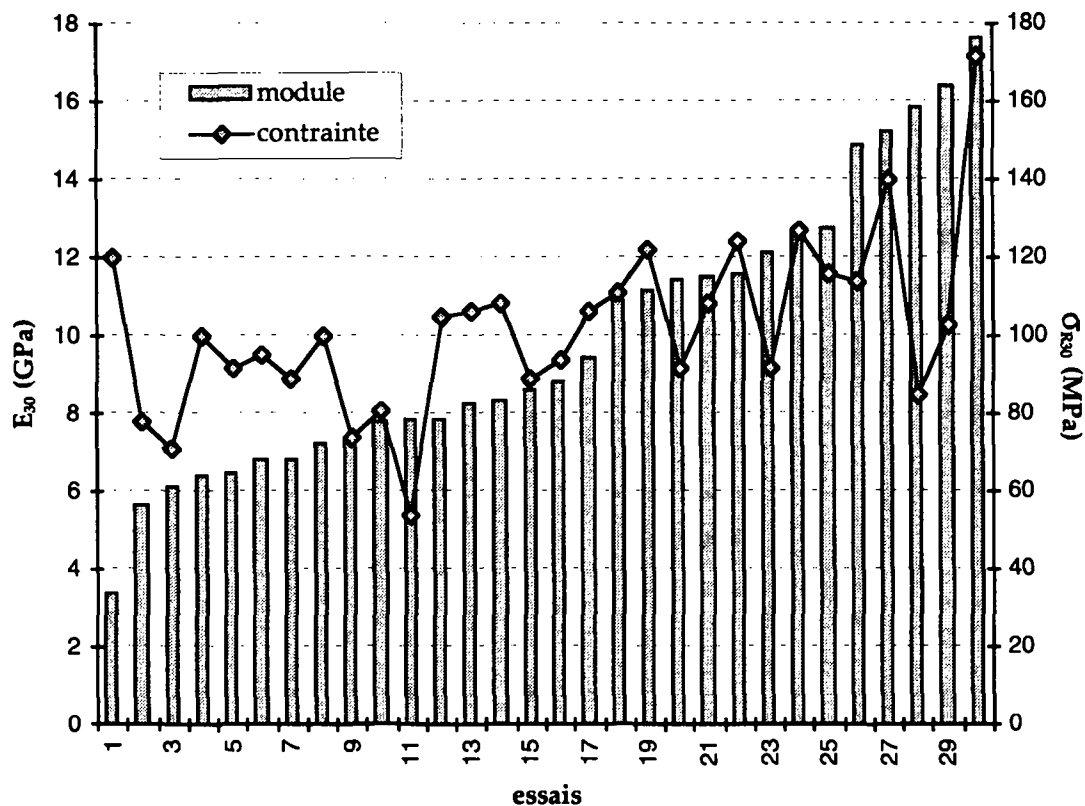


Figure II.3.1. Répartition des modules d'élasticité E_{30} et des contraintes à la rupture σ_{R30} mesurés sur 30 éprouvettes de bois d'été de pin maritime, pour une humidité relative de 30%.

Ces observations ont été faites malgré le choix minitieux des éprouvettes dans les cernes, et sont une conséquence de leur non-représentativité.

- éprouvettes stabilisées à 75% d'humidité relative

Un deuxième résultat à été relevé sur une population de 13 échantillons, figure II.3.2. Seules les valeurs de module d'élasticité E_{75} sont données sur le graphique. La contrainte de rupture, σ_{R75} relevée uniquement sur 3 éprouvettes, restait dans les mêmes ordres de grandeur que lors des essais réalisés à 30% d'humidité relative, à savoir très proche de 100 MPa.

On a observé que:

- ◆ La variabilité du module E_{75} est légèrement moins importante que dans le cas précédent - les valeurs mesurées sont comprises en moyenne entre 6 et 10.5 GPa;
- ◆ La valeur moyenne du module E_{75} calculée dans ce cas est d'environ 7.2 GPa.

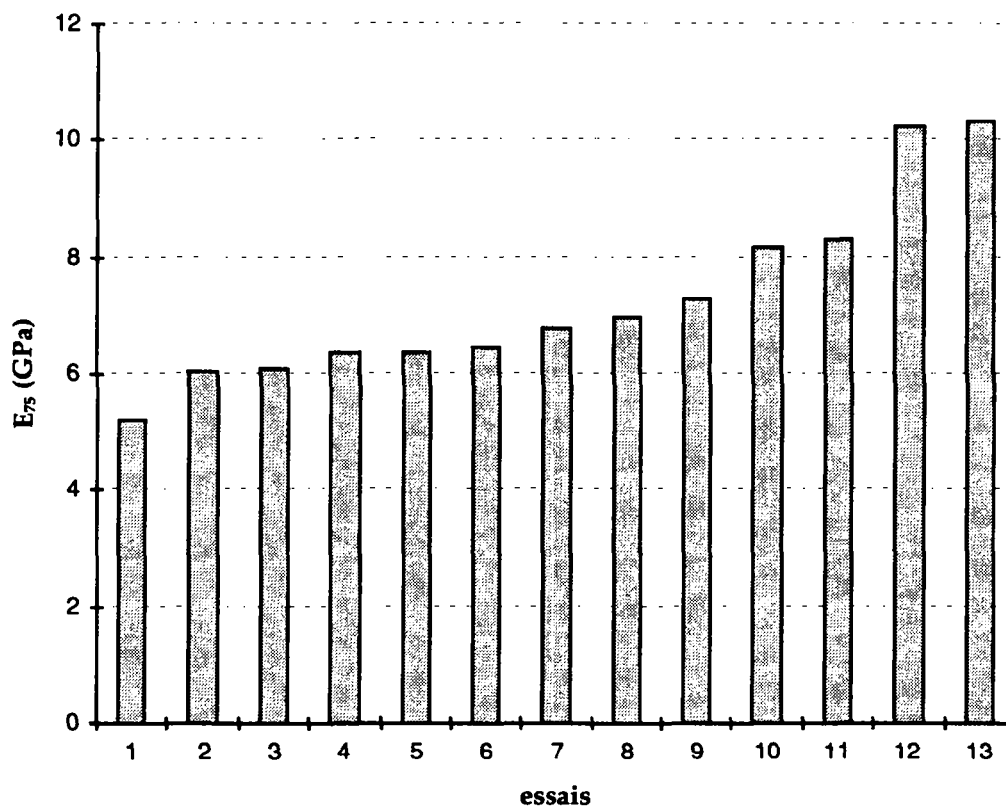


Figure II.3.2. Répartition des modules d'élasticité E_{75} mesurés sur 13 éprouvettes de bois d'été de pin maritime, pour une humidité relative de 75%.

On note donc une diminution d'environ 30% du module d'élasticité moyen mesuré à 75% d'humidité relative par rapport à celui mesuré à 30% d'humidité relative.

L'ensemble de ces résultats fait ressortir une grande dispersion au niveau des valeurs du module d'élasticité des éprouvettes de bois de petites dimensions. Il n'est donc pas correct, d'une part, d'utiliser simplement une moyenne de ces valeurs pour déterminer des paramètres d'essai. D'autre part, une comparaison quantitative de résultats, en particulier à climat constant, ne peut donc être réalisée entre des échantillons de bois provenant de séries différentes.

II.3.2.2 CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES

Les isothermes d'absorption et de désorption des éprouvettes de bois d'été de pin maritime de petites dimensions ont été déterminés, à partir de trois essais. Les courbes moyennes obtenues sont données sur la figure II.3.3.

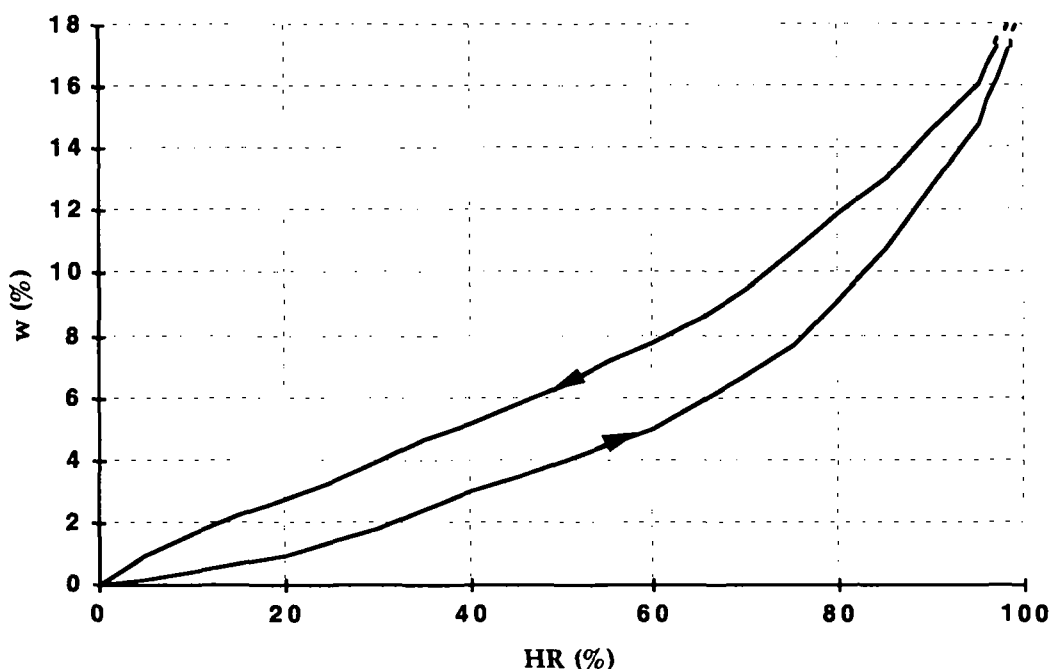


Figure II.3.3. Isotherme de sorption du bois d'été de pin maritime.

Les échantillons sont placés dans une nacelle et suspendus à la balance pendant toute la durée de l'essai. Un dispositif permettant d'imposer une humidité relative donnée à l'éprouvette a été spécialement conçu dans le laboratoire. Le schéma de cet ensemble est donné dans l'annexe 3. L'évolution du poids de l'échantillon est visualisé de manière continue sur un enregistreur. Les valeurs de stabilisation pour une humidité relative donnée sont reportées sur le graphe.

Les conditions correspondant à 100% d'humidité relative étant difficilement atteignables, il n'est pas possible de mesurer précisément le point de saturation des fibres.

Les essais de caractérisation du comportement hygro-mécanique du bois sont principalement étudiés pour des cycles de variations hydriques entre 30% et 75% d'humidité relative. Une mesure des variations de la teneur en eau w du bois d'été induite lors de 5 de ces cycles a été réalisée. Le résultat obtenu est donné sur la figure II.3.4.

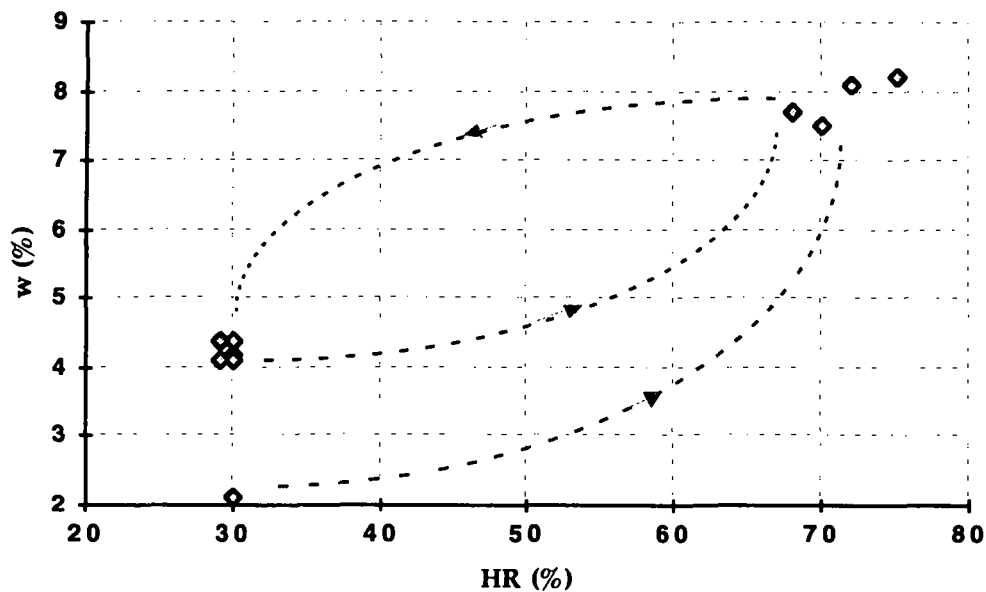


Figure II.3.4. Mesure de la teneur en eau du bois d'été de pin maritime correspondant à 5 cycles de variation de l'humidité relative entre 30% et 75%.

On constate que le premier changement d'humidité relative entraîne une variation de la teneur en eau d'amplitude supérieure aux suivants. En effet, à partir du deuxième changement, et lors des cycles suivants, la teneur en eau varie toujours entre 4% et 8%.

Cela semblerait signifier qu'une accommodation est atteinte après le premier changement d'humidité relative. Cette particularité se retrouve lors de la mesure des variations dimensionnelles nominales, comme on peut le voir sur la courbe, figure II.3.5. Elle peut être attribuée à l'effet d'hystérésis prenant place entre les phases d'absorption et de désorption.

Il est donc nécessaire de réaliser plus d'un cycle de variations d'humidité relative avant de pouvoir estimer de manière correcte les variations dimensionnelles nominales correspondant à un échantillon donné.

La mesure des variations dimensionnelles hydriques ϵ_{hyg} engendrées par une variation de l'humidité relative entre 30% et 75% est effectuée systématiquement sur chaque éprouvette, avant tout chargement. La période des cycles d'humidité est la même que celle considérée durant l'essai, et est, en général, de l'ordre de 3 heures.

Un exemple de résultat de mesure est donné sur la figure II.3.5.

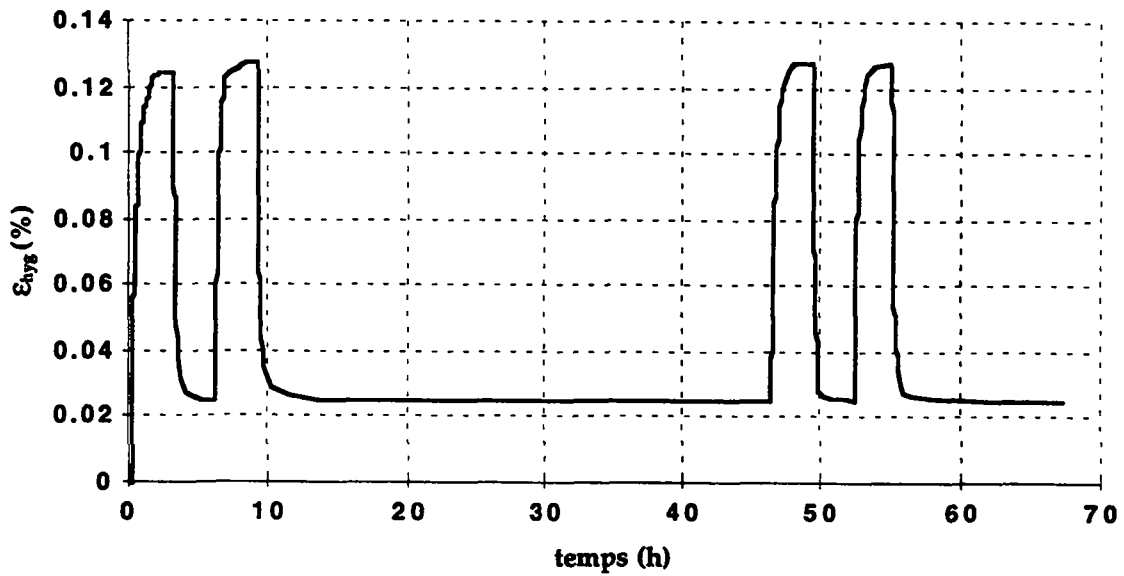


Figure II.3.5. Mesure des variations dimensionnelles hydriques ϵ_{hyg} d'une éprouvette soumise à 3 cycles d'humidité relative, avec humidification initiale, entre 30% et 75%.

On constate que, comme dit précédemment, après un ou deux cycles de variation d'humidité relative, l'amplitude des déformations de retrait et de gonflement engendrées devient répétitive.

A partir de la mesure des ces variations dimensionnelles, il est possible de calculer un coefficient d'expansion hydrique dans la direction longitudinale, relativement à la variation d'humidité relative, par la formule suivante, d'après Skaar (1988):

$$y_l = \frac{\left(\frac{dl}{l}\right)}{dh} = \frac{1}{l} \left(\frac{dl}{dh}\right) \quad (\text{II.3.3})$$

avec: h : humidité relative
 l : longueur de l'éprouvette (sens longitudinal)

$$\text{et } Y_l = 100 \times y_l \quad (\text{II.3.4})$$

Les valeurs du coefficient Y_l obtenues sur 16 éprouvettes sont données sur la figure II.3.6.

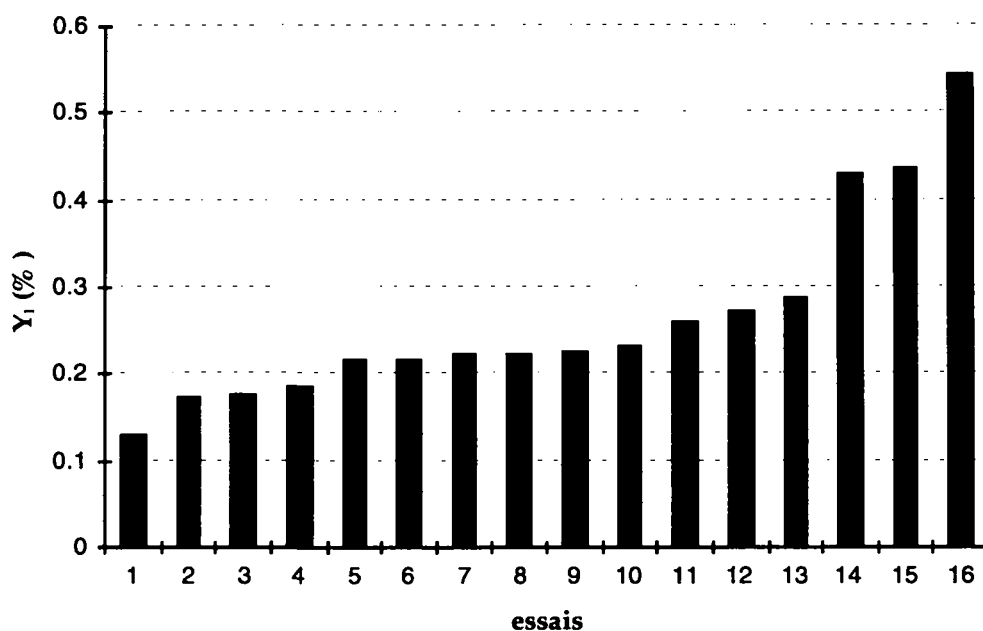


Figure II.3.6. Coefficients d'expansion hydrique, calculés pour une variation d'humidité relative entre 30% et 75%. Essais réalisés sur 16 éprouvettes.

On constate que la dispersion entre les valeurs est importante, Y_i pouvant varier entre 0.13 et 0.54 %.

C'est pour cette raison qu'il a été choisi d'exprimer le coefficient d'expansion hydrique par rapport à la variation d'humidité relative, et non par rapport à la variation de teneur en eau. En effet, cette dernière valeur ne pourrait être considérée comme correcte que si les variations dimensionnelles et les variations de teneur en eau seraient mesurées sur le même échantillon de bois.

Une mesure des contraintes hydriques σ_{hyg} , engendrées par les variations d'humidité relative, a été effectuée sur 2 séries d'essais:

- La première a été réalisée sur 2 éprouvettes stabilisées à 75% d'humidité relative. Celles-ci ont été soumises à deux ou trois cycles de variation hydrique entre 75% et 30%. L'allure des courbes obtenues est donnée sur la figure II.3.7.
- La deuxième a été réalisée sur 2 éprouvettes stabilisées à 30% d'humidité relative. Celles-ci ont été soumises à deux cycles de variation hydrique entre 30% et 75%. L'allure des courbes obtenues est donnée sur la figure II.3.8.

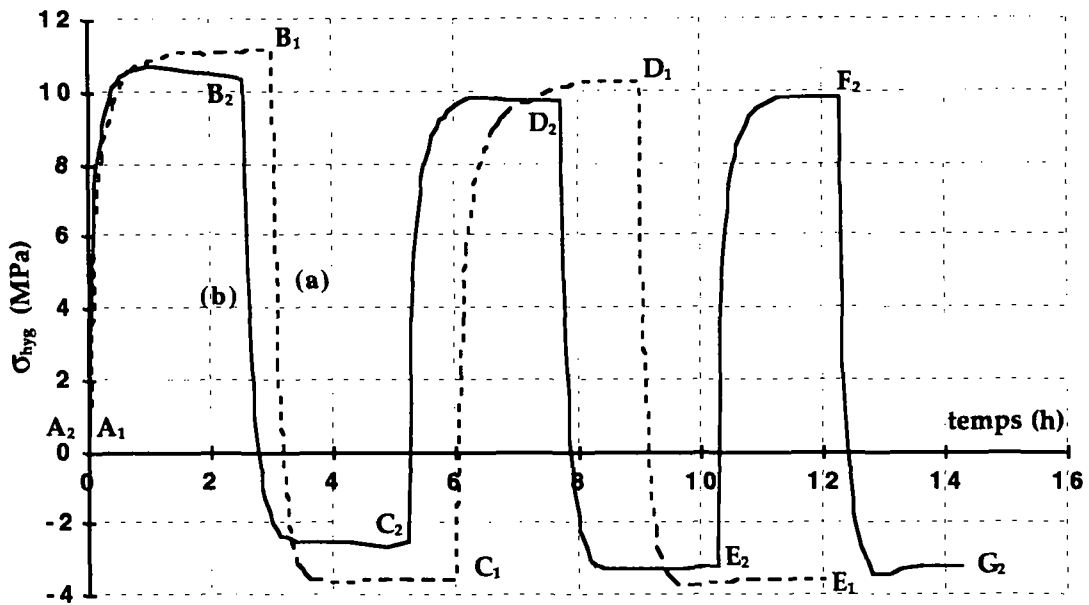


Figure II.3.7. Variation de la contrainte engendrée par des sollicitations hydriques, observée pour un cyclage de l'humidité relative, avec séchage initial, entre 75% et 30% (a) et (b).

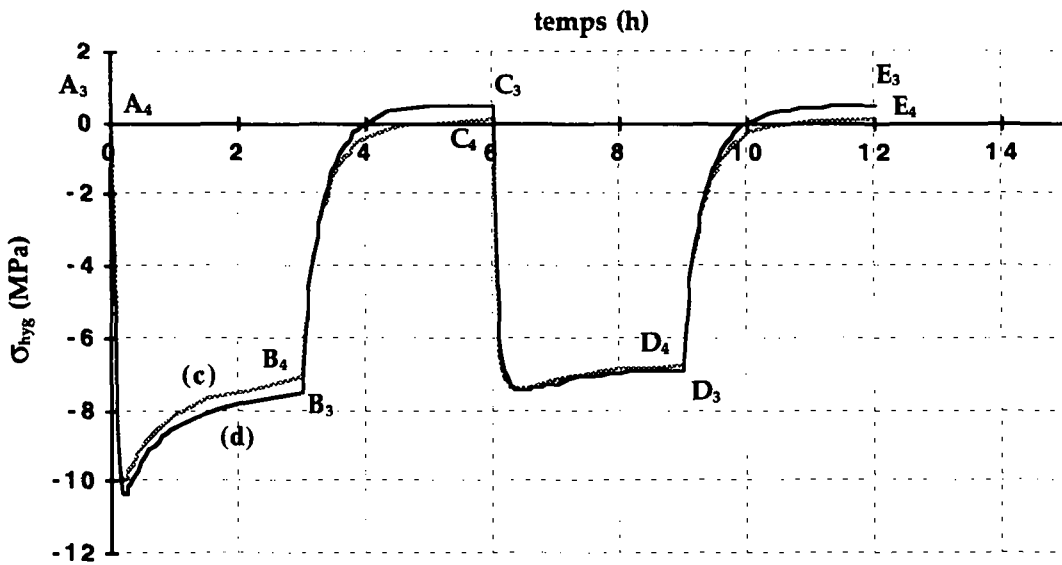


Figure II.3.8. Variation de la contrainte engendrée par des sollicitations hydriques, observée pour un cyclage de l'humidité relative, avec humidification initiale, entre 30% et 75% (c) et (d).

On constate sur ces résultats que:

- ◆ les contraintes de traction mesurées lors des essais (a) et (b) - lorsque le premier changement d'humidité est un séchage - sont d'amplitude plus élevées que les contraintes de compression mesurées lors des essais (c) et (d) - lorsque le premier changement d'humidité est une humidification. L'amplitude est environ 2 fois plus importante dans le premier cas. Ceci pourrait être lié à la différence existant entre module de traction et de compression, ce dernier étant plus faible.
- ◆ on ne constate, par contre, pas de changement, au bout d'un cycle d'accommodation, entre les contraintes résultant d'une adsorption et celles résultant d'une désorption - (C_1D_1) et (D_1E_1), courbe (a), (C_2D_2) et (D_2E_2), puis (E_2F_2) et (F_2G_2), courbe (b), (C_3D_3) et (D_3E_3), courbe (c) et enfin (C_4D_4) et (D_4E_4), courbe (d). Ceci semblerait montrer que le module ne varie pas entre les deux phases.
- ◆ lors d'une absorption, la contrainte passe par une valeur maximale, en compression, puis elle tend à se stabiliser, après une légère diminution. Une relaxation est donc mise en évidence, qui ferait suite à la contrainte engendrée dans le matériau. Celle-ci est très accentuée lors du premier changement d'humidité relative: (A_3B_3) et (A_4B_4), figure II.3.8
Lors d'une désorption, par contre, cet effet est moins marqué.

Une légère dispersion existe également dans la mesure des contraintes hydriques, mais il est difficile d'en donner un ordre de grandeur, vu le petit nombre d'essais effectués.

II.3.3 CONCLUSION

On a pu constater au cours des essais effectués l'existence de dispersions importantes aussi bien au niveau de la mesure de caractéristiques mécaniques que hydriques. Ceci nous amène à être attentifs au choix des éprouvettes et au déroulement d'un essai.

Par conséquent, il a été décidé, dans la mesure du possible:

- ★ de réaliser une mesure du module et de la contrainte de rupture sur une éprouvette "test" de chaque série;
- ★ de calculer les paramètres de chargement uniquement en rapport avec ces valeurs;
- ★ de n'effectuer une comparaison du point de vue quantitatif qu'entre les éprouvettes d'une même série;

- ★ d'utiliser en priorité les éprouvettes dont le module est compris entre 7 et 12 GPa.
- ★ de mesurer les variations dimensionnelles hydriques ϵ_{hyg} sous charge nulle de chaque éprouvette avant application du programme de sollicitation en contraintes.
- ★ de mesurer les variations de contraintes hydriques σ_{hyg} à déformation nulle avant application du programme de sollicitation en déformation.

CHAPITRE II.4

RÉPONSE DIFFÉRÉE SOUS CLIMAT CONSTANT

II.4.1 INTRODUCTION

La deuxième partie de l'étude expérimentale est consacrée à l'observation du comportement différé du bois sous climat constant. Celui-ci peut être mis en évidence par des essais de fluage-recouvrance et de relaxation-effacement.

Pour illustrer le comportement différé des éprouvettes de bois de faible épaisseur, une série d'essais de fluage-recouvrance et relaxation-effacement ont ainsi été réalisés sous climat constant, et plus particulièrement pour les deux niveaux d'humidité relative atmosphérique correspondant aux paliers des cycles imposés lors des essais à climat variable - en principe: 30% et 75%. La température est conservée, durant chaque essai, à une valeur constante de 21.5°C. Les essais sont réalisés en traction, la charge étant appliquée parallèlement au sens des fibres du bois. Les éprouvettes sont conditionnées dans un environnement stable - température et humidité relative constantes - pendant une durée minimale de 15 heures avant toute mise en charge.

II.4.2 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE

Des essais de fluage-recouvrance ont été réalisés pour plusieurs niveaux de charge - variant entre 12 et 30% de la contrainte de rupture en traction - et pour deux conditions d'humidité relative constantes.

Les résultats obtenus sont exposés dans les paragraphes qui suivent.

II.4.2.1 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION EFFECTUÉS À 22% D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR DEUX NIVEAUX DE SOLLICITATION.

- description de l'essai:

Deux éprouvettes (a) et (b) ont été maintenues pendant 18 heures dans une atmosphère à 22% d'humidité relative.

A l'instant t_0 , l'éprouvette (a) a été soumise à une charge en traction correspondant à environ 12% de la contrainte de rupture σ_{R22} et l'éprouvette (b) à environ 20%. Le fluage est alors mesuré pendant la durée $\Delta t_1 = 36$ heures, pour les deux essais, jusqu'à l'instant t_1 .

A l'instant $t_1 = 36$ heures, les éprouvettes sont totalement déchargées. La recouvrance est ensuite mesurée pendant la durée $\Delta t_2 = \Delta t_1$ jusqu'à l'instant $t_2 = 72$ heures.

Les résultats obtenus sont donnés sur les courbes de la figure II.4.1.

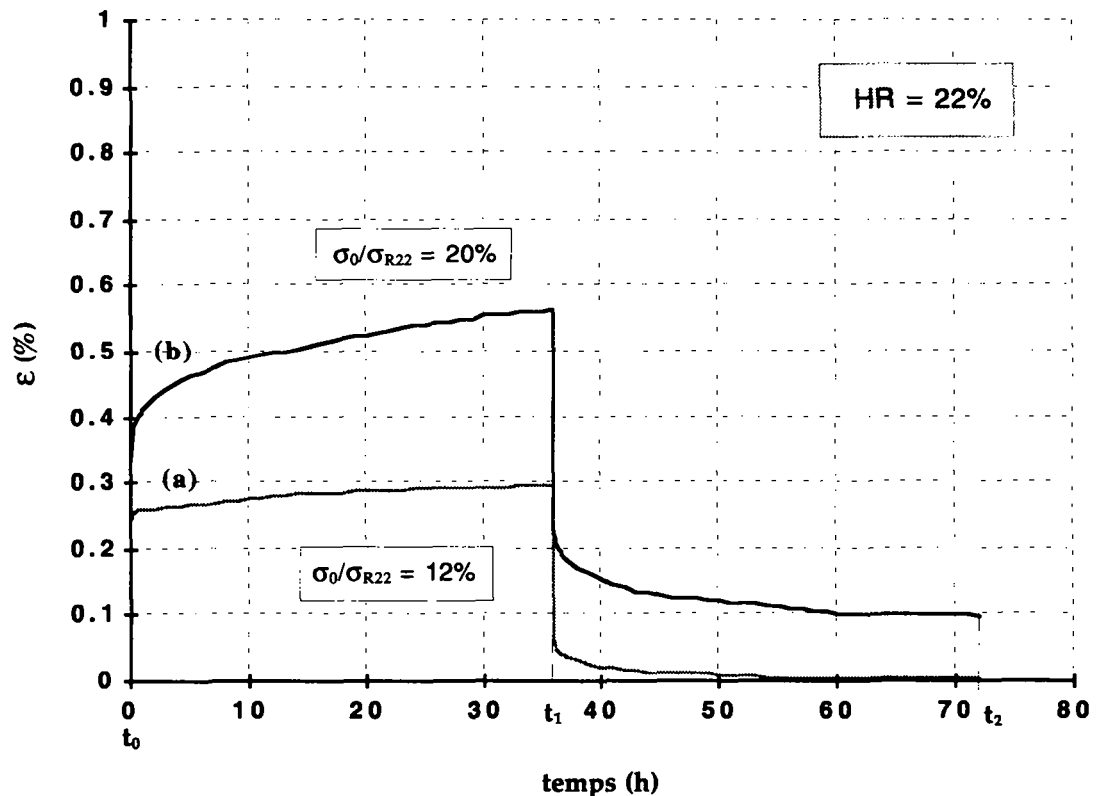


Figure II.4.1. Essais de fluage-recouvrance pour un niveau de charge d'environ 12% (a) et 20% (b) de la contrainte de rupture σ_{R22} . L'humidité relative est maintenue à un niveau constant de 22%, durant l'ensemble des essais.

- constatations:

On peut observer, sur les résultats de la figure II.4.1, que:

- ★ la cinétique de fluage diminue de manière très lente, même pour un niveau de force appliquée de 12%;
- ★ pour l'éprouvette sollicitée à un niveau de charge d'environ 12%, la recouvrance devient pratiquement totale au bout du temps de décharge Δt_2 ;
- ★ par contre, pour l'éprouvette qui a été chargée à un niveau supérieur à 12%, la recouvrance mesurée après décharge, au bout du temps Δt_2 , est partielle. Une déformation permanente ε_p peut être mise en évidence. Celle-ci est d'amplitude relativement importante - de l'ordre de 30% de la déformation instantanée.

Le niveau de déformation globalement atteint sur l'essai est d'amplitude élevé, ceci étant relié aux propriétés de la série d'éprouvettes utilisées, à savoir un module spécialement faible.

II.4.2.2 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION EFFECTUÉS À 75% D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR DEUX NIVEAUX DE SOLLICITATION.

- description de l'essai:

Une deuxième série d'essais a été réalisée sur deux éprouvettes (a) et (b), stabilisées dans une atmosphère à une humidité relative de 75%.

A l'instant t_0 , la première éprouvette a été chargée à 20% de la contrainte de rupture σ_{R75} et la deuxième à 30%. Le fluage a été mesuré jusqu'à l'instant t_1 pendant la durée $\Delta t_1 = 24$ heures. A l'instant $t_1 = 24$ heures, les éprouvettes ont été totalement déchargées. La recouvrance a été mesurée pendant la durée $\Delta t_2 = 18$ heures jusqu'à l'instant $t_2 = 42$ heures.

Les résultats obtenus sont donnés sur les courbes de la figure II.4.2.

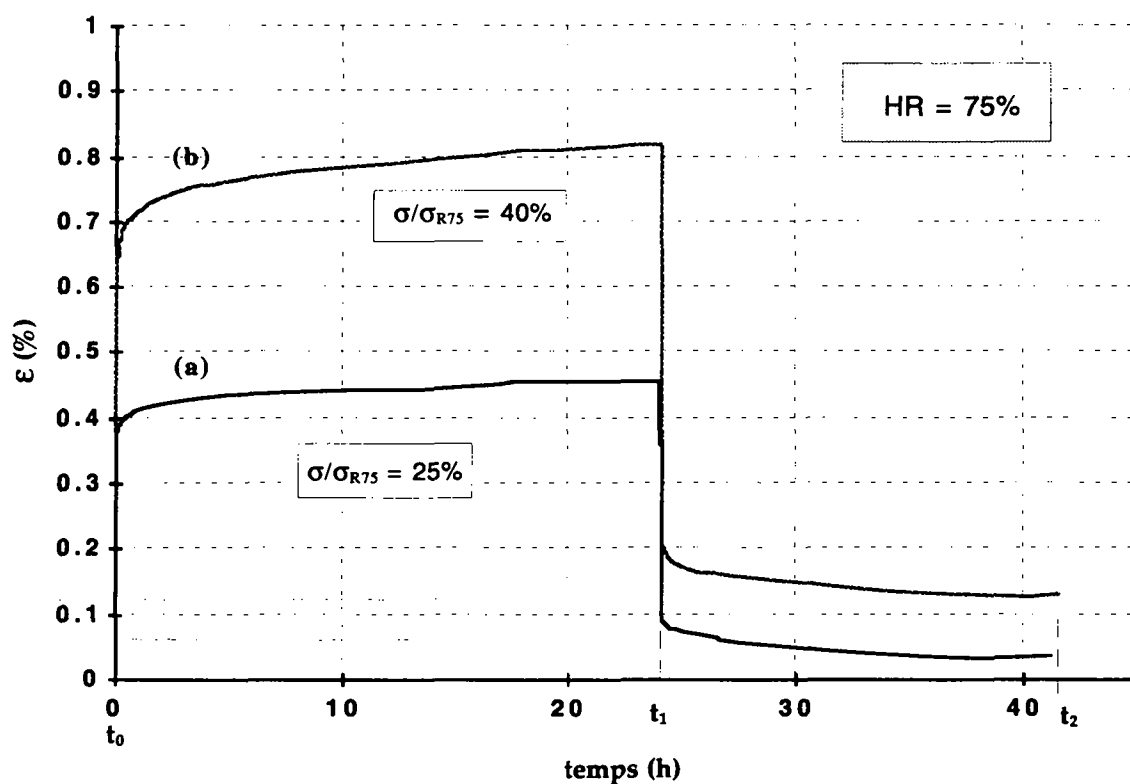


Figure II.4.2. Essais de fluage-recouvrance pour un niveau de charge de 25% (a) et 40% (b) de la contrainte de rupture σ_{R75} . L'humidité relative est maintenue à un niveau constant de 75% pendant la durée des essais.

- constatations:

Une déformation permanente ε_p a pu à nouveau être mise en évidence sur les courbes obtenues, elle augmente avec le niveau de sollicitation. En effet, pour l'essai (a), $\varepsilon_p \approx 10\% \varepsilon_{inst}$ et $\varepsilon_p \approx 20\% \varepsilon_{inst}$ pour l'essai (b). Celle-ci est cependant d'une amplitude plus faible que dans l'essai précédent, ceci pouvant être relié aux caractéristiques des éprouvettes utilisées.

II.4.2.3 ESSAIS DE FLUAGE-RECOURVANCE POUR UN MÊME NIVEAU DE SOLLICITATION, A DIVERS PALIERS D'HUMIDITÉ RELATIVE.

Une série d'essais a été réalisée dans le but d'observer et de comparer le comportement différé des éprouvettes en fonction de l'humidité relative, pour un même niveau de charge. Ces essais ont été réalisés sur quatre échantillons provenant d'une même série de coupe, de manière à rendre la comparaison possible.

- description de l'essai

Le niveau de charge appliquée correspond à environ 22% de la charge de rupture mesurée à l'humidité relative atmosphérique correspondante.

Pour deux essais, (a) et (b), l'humidité relative a été maintenue à un palier bas, correspondant à 28%. Pour les deux autres, (c) et (d), le palier considéré était élevé, correspondant à 75% et 79% d'humidité relative. Chaque éprouvette est maintenue, avant application de la charge, dans ses conditions climatiques constantes respectives durant 18 heures.

A l'instant t_0 , les éprouvettes sont chargées, puis le fluage est mesuré jusqu'à l'instant t_1 , pendant la durée $\Delta t_1 = 35$ heures. A l'instant $t_1 = 35$ heures, les éprouvettes sont totalement déchargées et la recouvrance est mesurée pendant la durée $\Delta t_2 = 20$ heures jusqu'à l'instant $t_2 = 55$ heures.

Les résultats obtenus sont donnés sur la figure II.4.3.

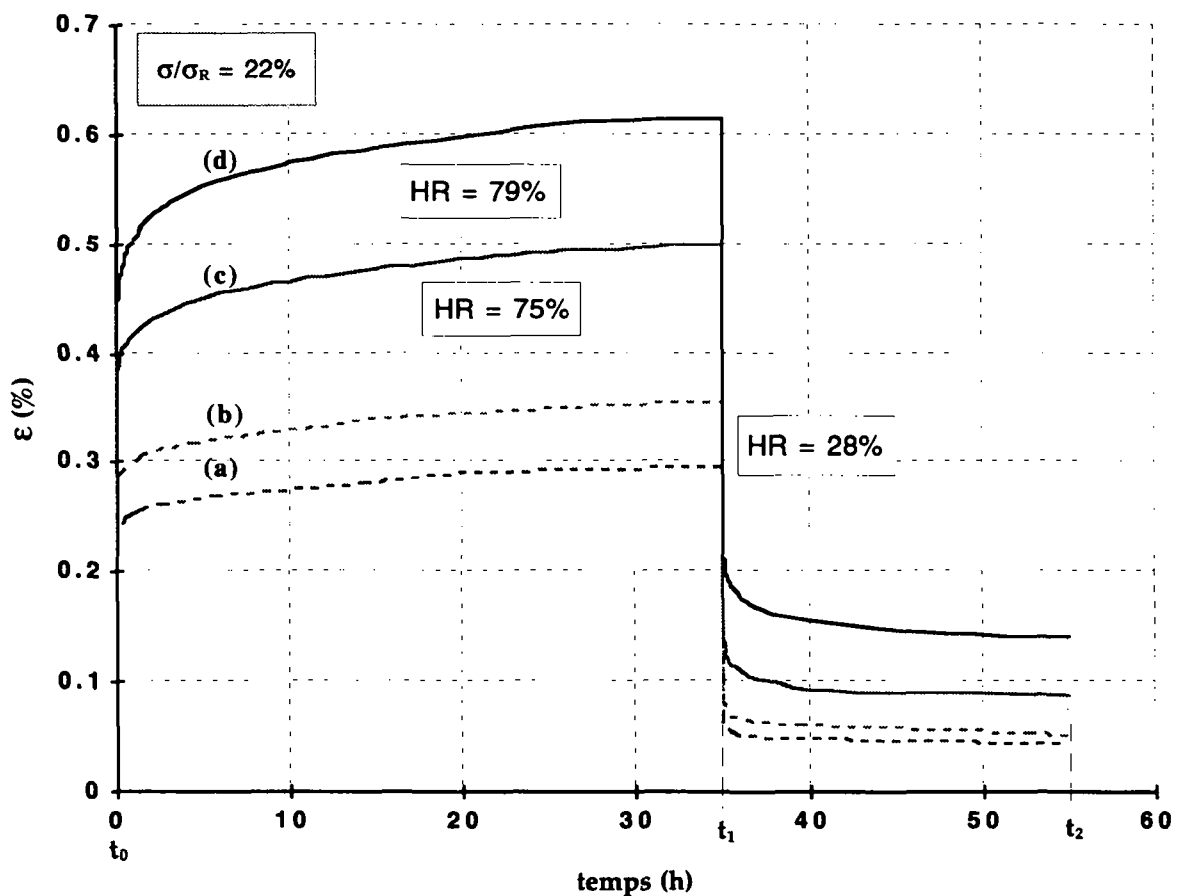


Figure II.4.3. Essais de fluage-recouvrance pour un même niveau de charge, effectués pour un niveau d'humidité relative constant de 28% (a et b), 75% (c) et 78.5% (d).

- constatations

- ★ la déformation instantanée ε_{inst} augmente lorsque l'humidité relative - et donc la teneur en eau du bois - augmente. Cette augmentation est d'ordre légèrement supérieure à 30%. En effet, le module d'élasticité a diminué d'environ 30% avec l'augmentation de la teneur en eau.
- ★ l'amplitude de la déformation différée ε_{visc} mesurée à l'instant t_1 - dont la vitesse diminue très progressivement, tendant vers une stabilisation très lente du fluage, si elle existe - augmente également avec l'humidité relative;
- ★ après décharge, on observe une recouvrance partielle. L'amplitude de la déformation permanente ε_p , mise en évidence après le temps t_2 augmente avec le niveau d'humidité relative. Pour les essais (a) et (b) - HR=28% - $\varepsilon_p \approx 20\% \varepsilon_{inst}$; pour l'essai (c) - HR=75% - $\varepsilon_p \approx 25\% \varepsilon_{inst}$ et pour l'essai (d) - HR=79% - $\varepsilon_p \approx 30\% \varepsilon_{inst}$.

II.4.3 ESSAIS DE RELAXATION-EFFACEMENT

Des essais de relaxation-effacement ont été réalisés pour deux niveaux d'humidité relative constants (30% et 75%). Les déformations appliquées correspondent à un niveau de contrainte de rupture en traction compris entre 8.5% et 50% .

L'ensemble de ces essais est globalement plus difficile à mettre en oeuvre, puisque les conditions de départ, et particulièrement la vérification de la fixation de l'extensomètre à une force nulle demande un travail de précision et de soin.

II.4.3.1 ESSAIS DE RELAXATION-EFFACEMENT EFFECTUÉS À 30% D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR PLUSIEURS NIVEAUX DE SOLLICITATION.

- description de l'essai

Quatre éprouvettes, (a), (b), (c) et (d), ont été maintenues pendant 18 heures dans une atmosphère à 30% d'humidité relative.

A l'instant t_0 , une déformation a été imposée, correspondant à un niveau de contrainte par rapport à la contrainte de rupture σ_{R30} de:

- 8.5% pour l'éprouvette (a);
- 24% pour l'éprouvette (b);

- 36.5% pour l'éprouvette (c);
- 51% pour l'éprouvette (d).

La relaxation a été mesurée jusqu'à l'instant t_1 , pendant la durée $\Delta t_1 = 12$ heures.

A l'instant $t_1 = 12$ heures, les éprouvettes ont été remises à leur forme initiale. L'effacement a été mesuré jusqu'à l'instant $t_2 = 24$ heures pendant la durée $\Delta t_2 = 12$ heures.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure II.4.4.

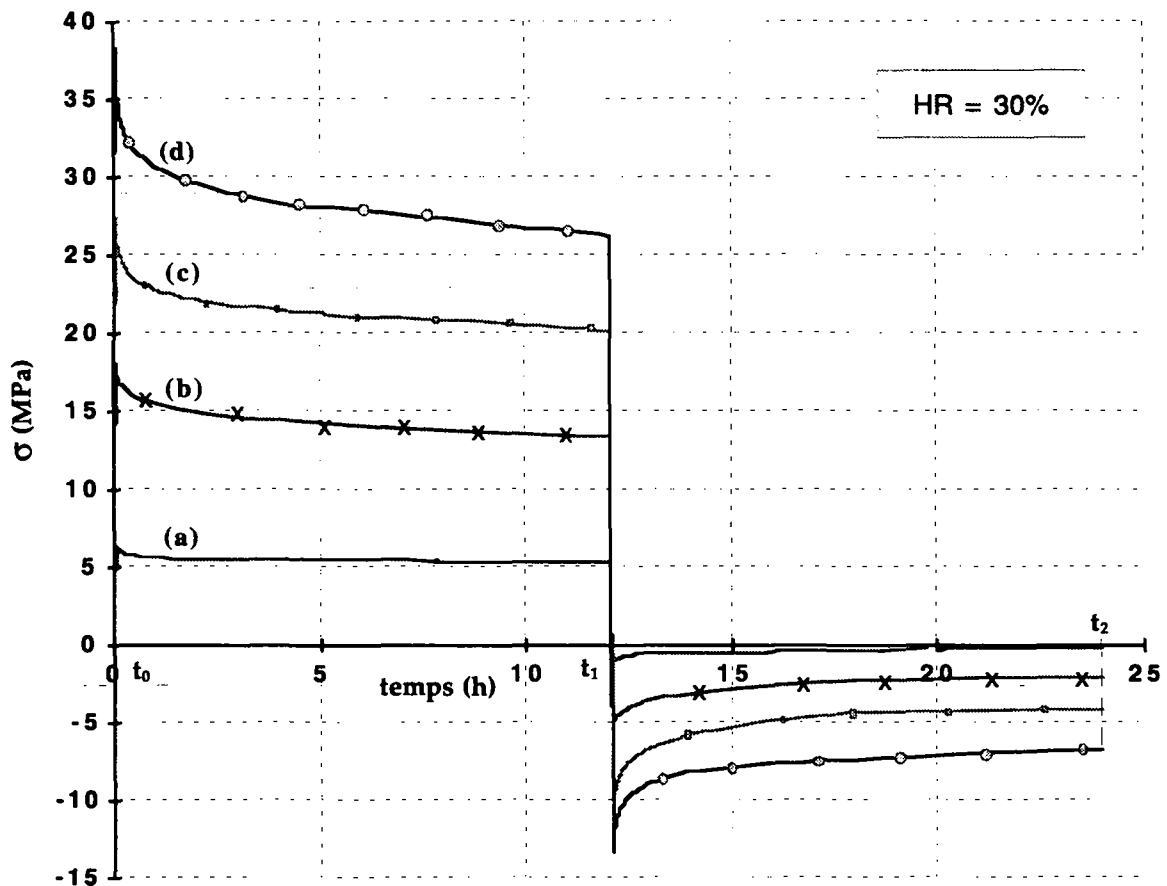


Figure II.4.4. Essais de relaxation - effacement, pour différents niveaux de déformation, correspondant à une contrainte de 8.5% (a), 24% (b), 36.5% (c) et 51% (d) de la contrainte de rupture. L'humidité relative atmosphérique est maintenue à un niveau constant de 30%.

- constatations

On observe que:

- ★ la relaxation tend à se stabiliser de manière assez rapide lorsque la déformation maintenue est faible (a);

- ★ l'effacement semble se stabiliser plus rapidement que la relaxation;
- ★ après remise en forme des éprouvettes, l'effacement de la contrainte est total pour un niveau de sollicitation appliquée faible (a);
- ★ par contre, lorsque le niveau de sollicitation augmente, l'effacement est partiel. En effet, il subsiste une contrainte résiduelle σ_p dans le matériau après remise en forme. Son amplitude augmente avec le niveau de sollicitation appliquée. Elle est de $\sigma_p \approx 12\% \sigma_{inst}$ pour l'essai (b), $\sigma_p \approx 15\% \sigma_{inst}$ pour l'essai (c) et $\sigma_p \approx 17\% \sigma_{inst}$ pour l'essai (d).

II.4.3.2 ESSAIS DE RELAXATION-EFFACEMENT EFFECTUÉS À 75% D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR PLUSIEURS NIVEAUX DE SOLLICITATION.

- description de l'essai

Quatre éprouvettes, (a), (b), (c) et (d), ont été maintenues pendant 18 heures dans une atmosphère à 75% d'humidité relative.

A l'instant t_0 , une déformation a été imposée, correspondant à un niveau de contrainte par rapport à la contrainte de rupture σ_{R75} de:

- 10.5% pour l'éprouvette (a);
- 32% pour l'éprouvette (b);
- 40% pour l'éprouvette (c);
- 48% pour l'éprouvette (d).

La relaxation a été mesurée jusqu'à l'instant t_1 , pendant la durée $\Delta t_1 = 3$ heures.

A l'instant $t_1 = 3$ heures, les éprouvettes ont été remises à leur forme initiale. L'effacement a été mesuré jusqu'à l'instant $t_2 = 7.5$ heures pendant la durée $\Delta t_2 = 4.5$ heures.

Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure II.4.5.

- constatations

On constate sur ces courbes un comportement similaire, dans les grandes lignes, au précédent, à savoir:

- ★ une relaxation qui tend à se stabiliser rapidement pour les sollicitations faibles

★ la mise en évidence d'une contrainte résiduelle σ_p dont l'amplitude augmente avec la sollicitation. Elle est telle que $\sigma_p \approx 7\% \sigma_{inst}$ pour l'essai (a), $\sigma_p \approx 11\% \sigma_{inst}$ pour l'essai (b), $\sigma_p \approx 16\% \sigma_{inst}$ pour l'essai (c) et $\sigma_p \approx 16\% \sigma_{inst}$ pour l'essai (d).

De plus, on observe que, pour l'humidité relative élevée considérée, l'effacement partiel est déjà mis en évidence pour un niveau de sollicitation relativement faible (a).

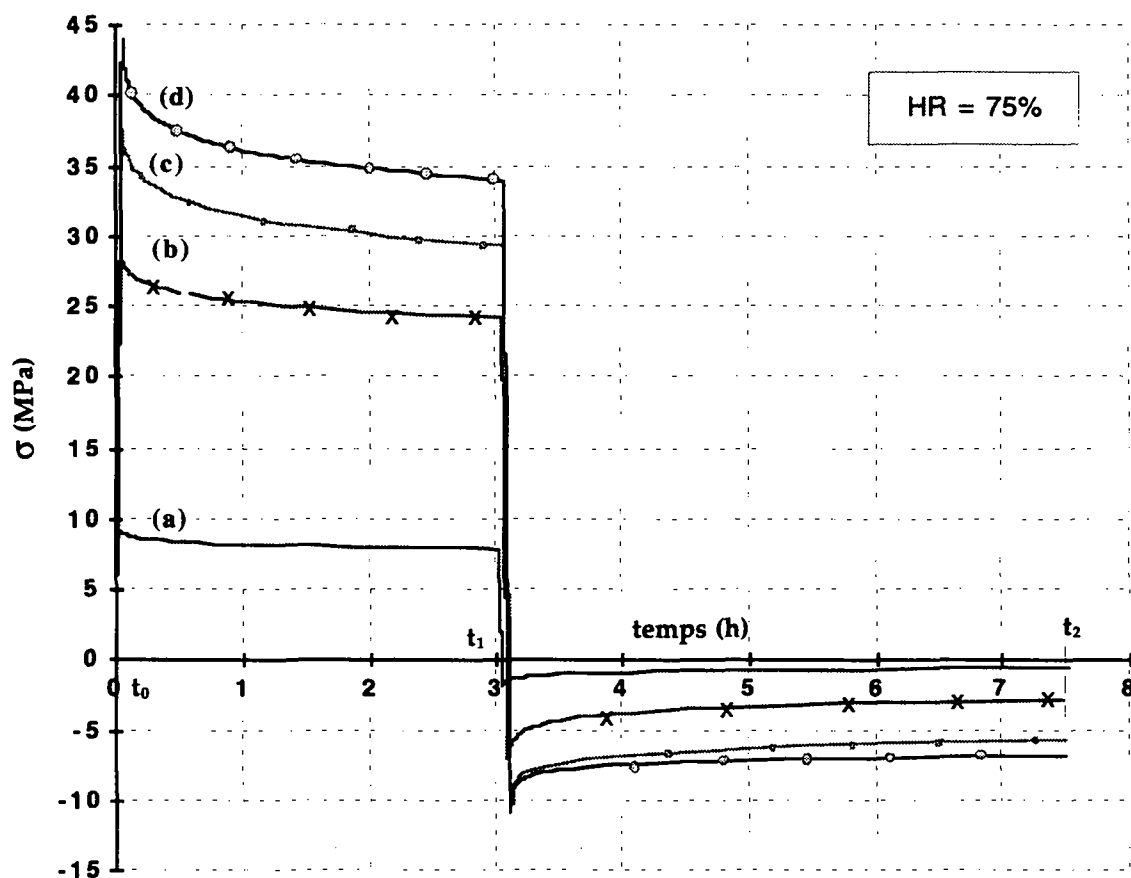


Figure II.4.5. Essais de relaxation - effacement pour différents niveaux de déformation, correspondant à un niveau de contrainte de 10.5% (a), 32% (b), 40% (c) et 48% (d) de la contrainte de rupture. L'humidité relative est maintenue constante à 75%.

Une autre particularité, que l'on peut observer en comparant les courbes relatives aux essais (c) et (d), est que les valeurs de contraintes instantanées mesurées à la charge et à la décharge ne sont pas de même amplitude. En effet, et ceci s'est retrouvé sur l'ensemble des essais réalisés pour autant que la sollicitation appliquée corresponde à une charge supérieure à environ 10% de

la charge de rupture, la contrainte instantanée mesurée à la décharge est d'amplitude légèrement plus élevée que celle mesurée à la charge. Ceci semblerait signifier que le matériau a subi une légère rigidification lors du processus de maintien de la déformation.

II.4.4 CONCLUSION

Les essais réalisés sous climat constant nous ont permis d'effectuer plusieurs observations:

- ★ d'une part, en ce qui concerne le déroulement d'un essai. En effet, nous avons pu constater l'importance de réaliser une bonne sélection des éprouvettes pour qu'une comparaison quantitative des résultats puisse s'avérer possible (si tel est le but de l'essai).
- ★ d'autre part, du point de vue qualitatif, l'ensemble des résultats a permis de relever les caractéristiques du comportement différé des éprouvettes de bois d'été de petites dimensions suivantes:
 - ◆ mise en évidence d'une déformation permanente ε_p lors d'essais de fluage-recouvrance à partir d'un niveau de force appliquée supérieur à 12% de la force de rupture (humidité relative faible). Celle-ci augmente avec le niveau de sollicitation et la teneur en eau, et peut atteindre 30% de la déformation instantanée mesurée à la charge.
 - ◆ mise en évidence d'une contrainte résiduelle σ_p lors d'essais de relaxation-effacement pour une déformation appliquée correspondant à un niveau de contrainte supérieur à environ 10% de la contrainte de rupture. Celle-ci augmente avec le niveau de sollicitation. L'amplitude maximale de la contrainte résiduelle mesurée était, dans les essais réalisés, de l'ordre de 20% de la contrainte instantanée, mesurée à la charge.
 - ◆ l'amplitude de la déformation permanente ε_p mesurée lors des essais de fluage-recouvrance effectués sur les éprouvettes de faible épaisseur semble être plus importante que celle mesurée lors d'essais similaires effectués sur des éprouvettes de dimensions plus élevées.

Cette dernière caractéristique pourrait être liée à la faible épaisseur des éprouvettes utilisées. En effet, il a été montré, Navi et al. (1995), qu'une déformation irréversible peut être mise en évidence lors d'essais de traction effectués sur des copeaux de bois (5 fibres en épaisseur). Cette déformation serait liée à des zones d'endommagement locales apparaissant à partir d'un

certain niveau de sollicitation. Elle est la conséquence d'hétérogénéités mises en évidence uniquement sur les éprouvettes de faible épaisseur.

En ce qui concerne la linéarité du comportement différé à climat constant des éprouvettes utilisées, il n'a pas été possible, vu le petit nombre d'essais effectués - et la dispersion existant entre les éprouvettes - d'effectuer une observation satisfaisante et de donner une conclusion sur ce point.

CHAPITRE II.5

INTRODUCTION A L'ÉTUDE DE LA RÉPONSE DIFFÉRÉE SOUS CLIMAT VARIABLE

Les essais de traction réalisés nous ont permis d'être attentifs à la non-représentativité des éprouvettes de petites dimensions utilisées. Les caractéristiques mécaniques, mesurées pour chaque série d'essais, ont permis de fixer convenablement les paramètres nécessaires aux essais de fluage ou de relaxation et ont conduit à un tri supplémentaire des éprouvettes.

L'observation du comportement différé du bois sous climat constant a été réalisé à partir d'essais de fluage-recouvrance et relaxation-effacement, pour plusieurs niveaux de sollicitation et d'humidité relative. La cohérence des résultats obtenus nous a permis de vérifier le bon fonctionnement de la presse prototype utilisée, ainsi que la possibilité de faire des mesures précises sous des programmes de chargement bien définis. D'autre part, le maintien d'un climat constant ainsi que la mesure des variations dimensionnelles hydriques - ou des contraintes hydriques - a pu être assuré avec une grande précision grâce au système de régulation développé.

Grâce aux moyens mis en place, il a donc été possible, à partir de là, de pouvoir procéder avec précision à des essais mécaniques sous climat variable sur les éprouvettes de petites dimensions.

Dans le présent programme, tous les essais ont été réalisés sur le bois d'été. L'ensemble des essais s'est déroulé à température atmosphérique constante ($T = 21.5^{\circ}\text{C}$). Les variations d'humidité appliquées à un échantillon correspondent toujours à des cycles entre les deux humidités relatives atmosphériques de 30% et 75%.

Les différentes parties de l'expérimentation à climat variable ont été regroupées en cinq chapitres. Ils sont relatifs à chacun des points suivants:

- ◆ observation des caractéristiques générales du comportement hygro-mécanique différé, mises en évidence lors d'essais de fluage-recouvrance avec cycles de variation d'humidité (chapitre II.6);

- ◆ étude de l'influence du délai de mise en route des variations d'humidité sur l'effet mécanosorptif (chapitre II.7);
- ◆ étude de l'influence des cycles d'humidité sur la réponse sous cycles de charge (chapitre II.8);
- ◆ étude de l'influence des cycles d'humidité sur une charge suivie de décharges partielles (chapitre II.9).

Ceux-ci ont été réalisés dans l'intention d'examiner s'il est possible de distinguer, dans l'effet mécanosorptif, deux parties:

- l'une pouvant mettre principalement en jeu les phénomènes de plastification liés à l'interaction entre l'eau et les constituants chimiques du bois, et se déroulerait donc au niveau moléculaire;
 - l'autre étant principalement liée à la microstructure du bois.
-
- ◆ observation des caractéristiques générales du comportement hygro-mécanique différé, mises en évidence lors d'essais de relaxation-effacement avec cycles de variation d'humidité (chapitre II.10).

Le chapitre II.11 est une conclusion générale sur l'ensemble de l'étude expérimentale.

CHAPITRE II.6

OBSERVATION DE CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE LA RÉPONSE DIFFÉRÉE SOUS CLIMAT VARIABLE

ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE

II.6.1 ESSAI DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE SUR ÉPROUVETTE INITIALEMENT SÈCHE (STABILISÉE À UNE HUMIDITÉ ATMOSPHÉRIQUE DE 30%).

II.6.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Un essai de fluage-recouvrance sur éprouvette sèche avec variations cycliques d'humidité relative sous charge a été réalisé pour observer le comportement hygro-mécanique du bois. Celui-ci s'est déroulé suivant les étapes données sur le schéma II.6.1. Il se détaille de la manière suivante:

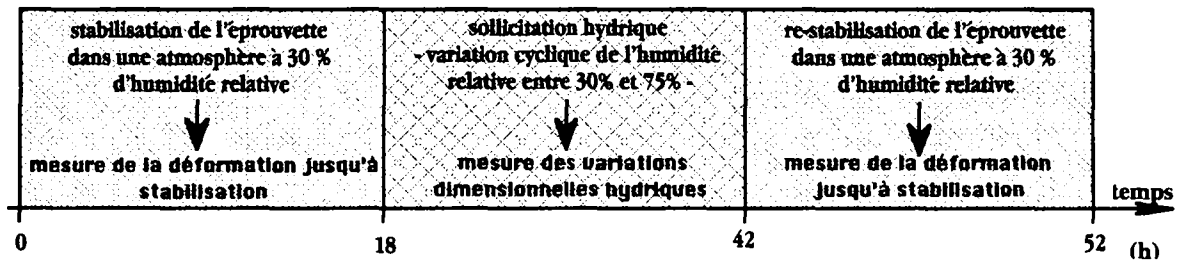
Première partie de l'essai:

L'éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une charge constante et nulle.

- Un niveau constant de 30% d'humidité relative atmosphérique est maintenu pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la déformation est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte. Cette étape tient compte du temps nécessaire pour obtenir une stabilisation de l'humidité relative dans la cellule. Elle est principalement liée au temps de régulation et d'atteinte de la température d'essai, fixée à 21.5°C. Cette dernière peut, en effet, varier de plusieurs degrés lors de l'ouverture de la cellule. Une durée de 2 à 4 heures est nécessaire pour atteindre à nouveau une température constante.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 30% et 75%. Les variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.

PREMIÈRE PARTIE DE L'ESSAI

mesure des variations dimensionnelles



DEUXIÈME PARTIE DE L'ESSAI

application d'une sollicitation mécanique

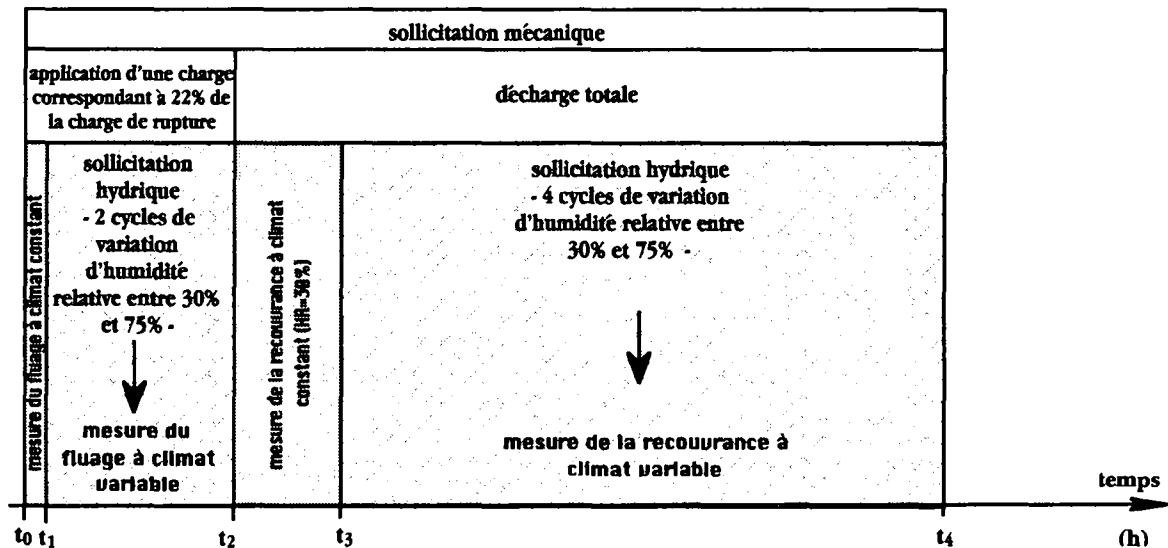


Schéma II.6.1. Étapes de déroulement de l'essai de fluage-recouvrance avec variations hydriques effectué sur une éprouvette initialement sèche, dont les résultats sont donnés sur la figure II.6.1.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	t_0	Δt_1	t_1	Δt_2	t_2	Δt_3	t_3	Δt_4	t_4
temps (h)	0	1	1	12	13	9	22	26	48

Tableau II.6.1 Notations en correspondance avec l'essai décrit sur le schéma II.6.1.

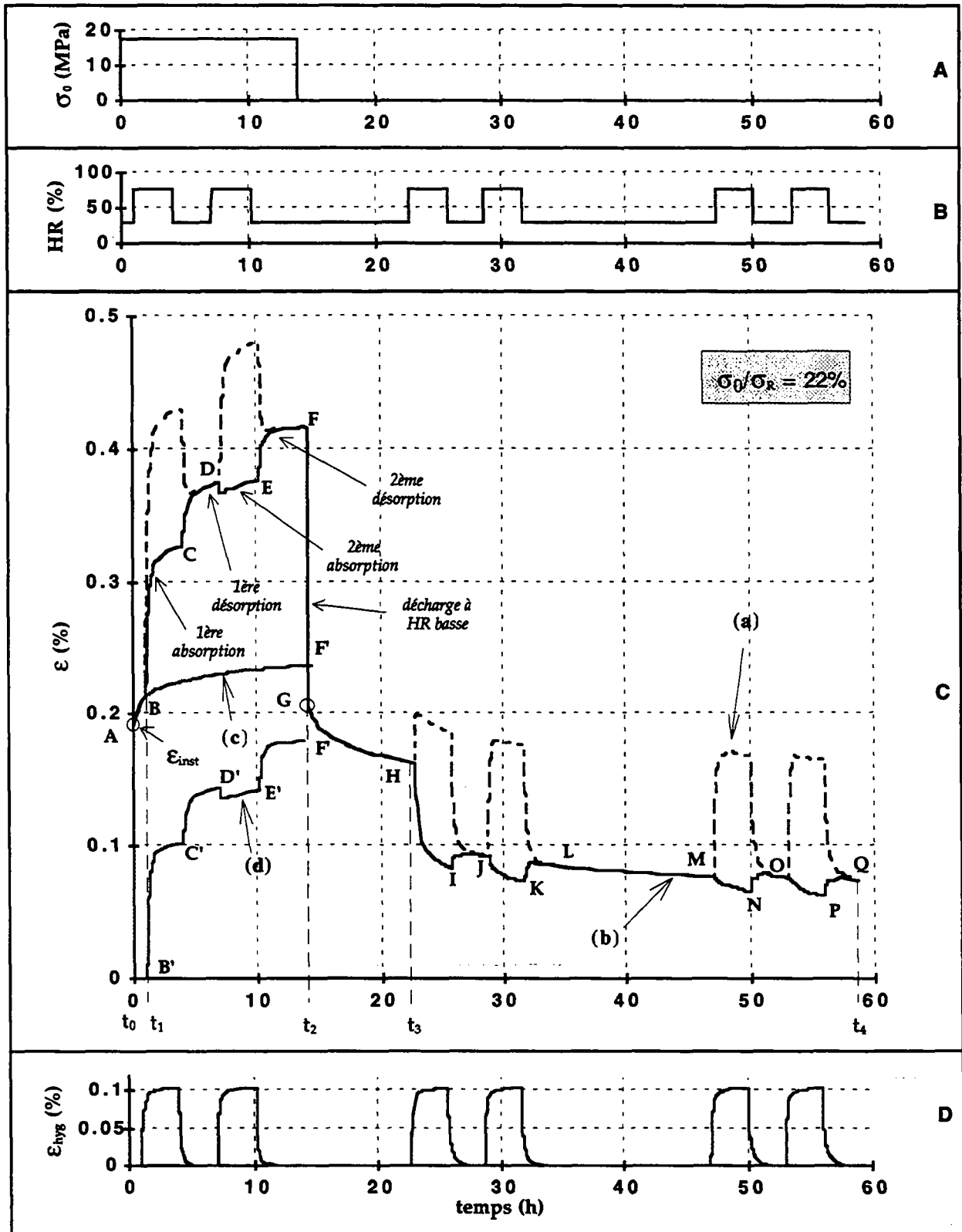


Figure II.6.1. Essai de fluage-recouvrance avec variations d'humidité réalisé sur une éprouvette initialement sèche, pour un niveau de force appliquée de 22% environ de la force de rupture. A: programme de chargement; B: programme de sollicitation hydrique; C: déformations ϵ_{tot} (a), ϵ_r (b) ϵ_{visc} (c) d'après simulation et ϵ_{ms} (d); D: déformation ϵ_{hyg} .

- Un niveau constant de 30% d'humidité relative est à nouveau fixé durant une dernière période de 10 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la déformation avant application du programme de chargement.

Deuxième partie de l'essai:

- A l'instant t_0 l'éprouvette est chargée à 22% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Le fluage à humidité constante - ϵ_{visc} - est mesuré jusqu'à l'instant t_1 pendant la durée Δt_1 . Deux cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants t_1 et t_2 , selon la figure II.6.1.B. La réponse différée sous climat variable ϵ_{tot} est mesurée pendant la durée Δt_2 .
- A l'instant t_2 , l'éprouvette est totalement déchargée. La recouvrance, pour un niveau d'humidité relative constant de 30%, est mesurée jusqu'à l'instant t_3 pendant la durée Δt_3 . Quatre cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants t_3 et t_4 , selon la figure II.6.1.B. La recouvrance différée sous climat variable est mesurée pendant la durée Δt_4 .

L'ensemble des sollicitations imposées et des résultats obtenus sont donnés sur la figure II.6.1.

Sur la figure II.6.1.C, la courbe (b) représente la déformation ϵ_r , définie comme suit:

$$\epsilon_r = \epsilon_{tot} - \epsilon_{hyg} \quad (II.6.1)$$

Avec ϵ_{tot} : déformation totale;
 ϵ_{hyg} : variations dimensionnelles hydriques.

La déformation ϵ_r représente donc la somme de la déformation de fluage sous climat constant ϵ_{visc} et de celle due à l'effet mécanosorptif ϵ_{ms} :

II.6.1.2 DONNÉES COMPARATIVES

Les tableaux II.6.2 et II.6.3 contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ϵ_r , aux points notés A à Q sur la figure II.6.1.C, ainsi que les variations de la déformation ϵ_r , dans chacun des segments AB à PQ.

notations	ϵ_A	ϵ_B	ϵ_C	ϵ_D	ϵ_E	ϵ_F	ϵ_G	ϵ_H	ϵ_I
ϵ_r (%)	0.189	0.213	0.327	0.375	0.376	0.417	0.214	0.162	0.083
notations	ϵ_J	ϵ_K	ϵ_L	ϵ_M	ϵ_N	ϵ_O	ϵ_P	ϵ_Q	
ϵ_r (%)	0.092	0.073	0.084	0.076	0.065	0.076	0.062	0.074	

Tableau II.6.2 Valeurs de déformation ϵ_r , correspondant aux points A à Q, figure II.6.1.C.

notations	$\Delta\epsilon_{AB}$	$\Delta\epsilon_{BC}$	$\Delta\epsilon_{CD}$	$\Delta\epsilon_{DE}$	$\Delta\epsilon_{EF}$	$\Delta\epsilon_{FG}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.024	0.114	0.048	0.001	0.041	-0.203
notations	$\Delta\epsilon_{GH}$	$\Delta\epsilon_{HI}$	$\Delta\epsilon_{IJ}$	$\Delta\epsilon_{JK}$	$\Delta\epsilon_{KL}$	$\Delta\epsilon_{LM}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	-0.052	-0.079	0.009	-0.019	0.011	-0.008
notations	$\Delta\epsilon_{MN}$	$\Delta\epsilon_{NO}$	$\Delta\epsilon_{OP}$	$\Delta\epsilon_{PQ}$		
$\Delta\epsilon_r$ (%)	-0.011	0.011	-0.014	0.012		

Tableau II.6.3 Valeurs de déformation ϵ_r , correspondant aux segments AB à PQ, figure II.6.1.C.

Les deux tableaux II.6.4 et II.6.5 contiennent les valeurs de la déformation mécanosorptive ϵ_{ms} aux points notés B' à F' sur la figure II.6.1.C, ainsi que les variations de la déformation ϵ_{ms} dans chacun des segments B'C' à E'F'.

notations	$\epsilon_{B'}$	$\epsilon_{C'}$	$\epsilon_{D'}$	$\epsilon_{E'}$	$\epsilon_{F'}$
ϵ_{ms} (%)	0	0.101	0.144	0.142	0.181

Tableau II.6.4 Valeurs de déformation ϵ_{ms} , correspondant aux points B' à F', figure II.6.1.C.

notations	$\Delta\epsilon_{B'C'}$	$\Delta\epsilon_{C'D'}$	$\Delta\epsilon_{D'E'}$	$\Delta\epsilon_{E'F'}$
$\Delta\epsilon_{ms}$ (%)	0.101	0.043	-0.002	0.039

Tableau II.6.5 Valeurs de déformation ϵ_{ms} , correspondant aux segments B'C' à E'F', figure II.6.1.C.

II.6.1.3 CONSTATATIONS

On observe, à partir des résultats de la figure II.6.1.C que:

Après application de la charge:

- ★ la *première absorption*, correspondant à une variation de 30% à 75% de l'humidité relative atmosphérique, est celle qui entraîne la *plus grande augmentation* de la déformation ϵ_r : (BC). Elle est telle que: $\epsilon_{rBC} \approx 0.60 \epsilon_{inst}$;
- ★ l'amplitude de l'augmentation de déformation ϵ_r , engendrée lors de chaque cycle hydrique va en décroissant - pour le niveau de force considéré et pour une variation de l'humidité relative entre 2 mêmes paliers. Elle est, en effet, telle que: $\epsilon_{rBD} \approx \epsilon_{inst}$ lors du premier cycle et $\epsilon_{rDF} \approx 0.25 \epsilon_{inst}$ lors du second.

On trouve de plus le fait que:

- ◆ une *désorption* entraîne une nouvelle *augmentation* de la déformation ϵ_r : (CD) et (EF);
 - ◆ l'*absorption suivante* entraîne une *diminution* de la déformation ϵ_r : (DE);
- ★ à l'issue des 2 cycles d'humidité imposés à l'éprouvette, l'augmentation de la déformation due au couplage mécanosorptif ϵ_{ms} estimée (point F') est d'environ 0.95 fois la déformation ϵ_{inst} .

Après suppression de la charge (observations sur la déformation ϵ_r):

- ★ la recouvrance instantanée - mesurée à la décharge, entre les points F et G - est du même ordre de grandeur que la déformation instantanée mesurée à la charge. En effet, $\epsilon_{rFG} \approx 1.07 \epsilon_{rA}$.
- ★ la *première absorption* (HI) entraîne la *plus importante augmentation* de la recouvrance. En effet, au point H, l'amplitude de la recouvrance - 9 heures après la décharge - est telle que $\epsilon_{rH} \approx 0.9 \epsilon_{inst}$. Après la première absorption, la déformation diminue d'environ 0.45 fois ϵ_{inst} .
- ★ l'amplitude de la diminution de déformation engendrée lors de chaque cycle hydrique va en décroissant. En effet, après le premier cycle d'humidité (HJ) la recouvrance augmente d'une amplitude telle que $\epsilon_{rHJ} \approx 0.50 \epsilon_{inst}$. Elle augmente de $\epsilon_{rJL} \approx 0.04 \epsilon_{inst}$ après le deuxième cycle (JL) et reste quasiment inchangée après le troisième cycle (MO). La recouvrance n'augmente plus que de $\epsilon_{rOQ} \approx 0.01 \epsilon_{inst}$ après le dernier cycle hydrique (OQ).

On a de plus, le fait que:

- ◆ une *désorption* entraîne une *ré-augmentation* de la déformation: (IJ), (KL), (NO) et (PQ);
 - ◆ les *absorptions suivantes* entraînent une *diminution* de la déformation (nouvelle augmentation de la recouvrance): (JK), (MN) et (OP).
- ★ la recouvrance est partielle. Une déformation permanente ε_p d'amplitude relativement importante - environ 40% de la déformation ε_{inst} - peut être mise en évidence après 35 heures de décharge, même après plusieurs cycles de variation d'humidité relative.

II.6.2 ESSAI DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE SUR ÉPROUVETTE INITIALEMENT HUMIDE (STABILISÉE À UNE HUMIDITÉ ATMOSPHERIQUE DE 75%).

II.6.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Un essai de fluage-recouvrance avec variations cycliques d'humidité relative a été réalisé sur une éprouvette humide stabilisée préalablement dans une atmosphère à 75% d'humidité relative, dans le but d'observer les similarités et différences qui apparaîtraient par rapport à l'essai précédent. La description des étapes de l'essai est donnée sur le schéma II.6.2. Il se détaille de la manière suivante:

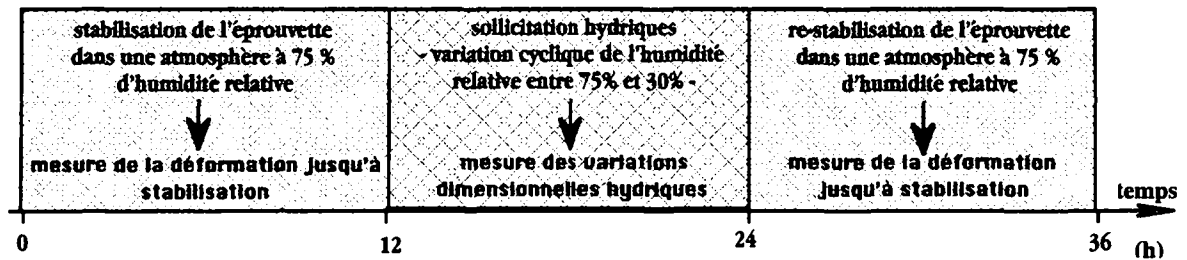
Première partie de l'essai:

L'éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une charge constante et nulle.

- Un niveau constant de 75% d'humidité relative atmosphérique est fixé pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la déformation est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 75% et 30%. Les variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.
- Un niveau constant de 75% d'humidité relative est à nouveau fixé durant la dernière période de 10 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la déformation avant application du programme de chargement.

PREMIÈRE PARTIE DE L'ESSAI

mesure des variations dimensionnelles



DEUXIÈME PARTIE DE L'ESSAI

application d'une sollicitation mécanique

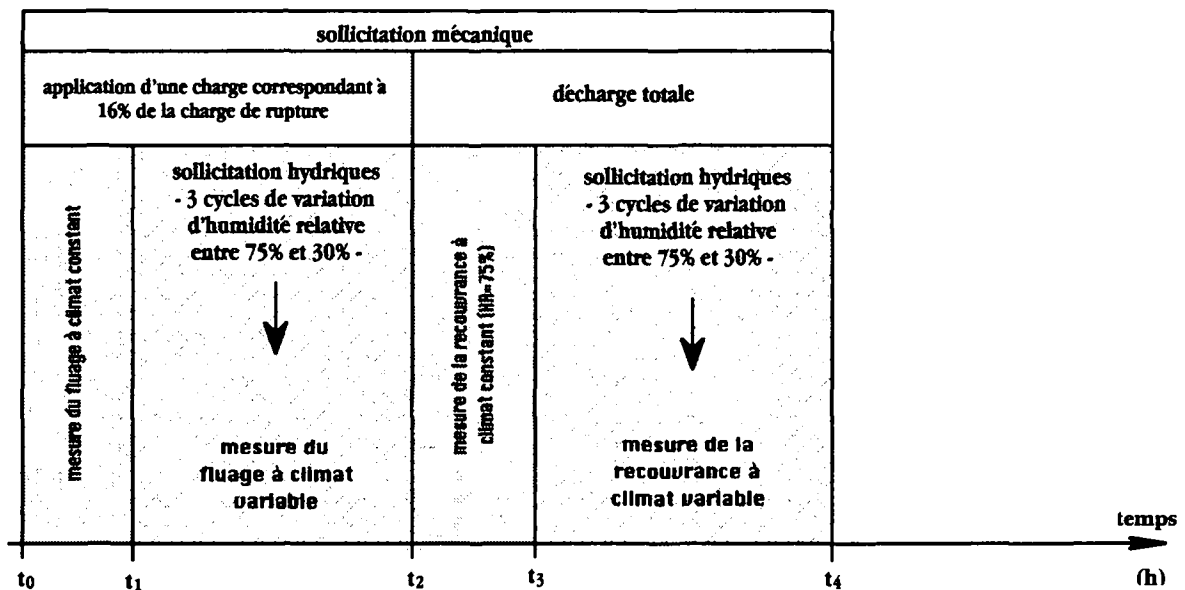


Schéma II.6.2. Étapes de déroulement de l'essai de fluage-recouvrance avec variations hydriques effectué sur une éprouvette initialement humide, dont les résultats sont donnés sur la figure II.6.2.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	t_0	Δt_1	t_1	Δt_2	t_2	Δt_3	t_3	Δt_4	t_4
temps (h)	0	0.36	0.36	16.64	17	15	24	19	43

Tableau II.6.6. Notations en correspondance avec l'essai décrit sur le schéma II.6.2.

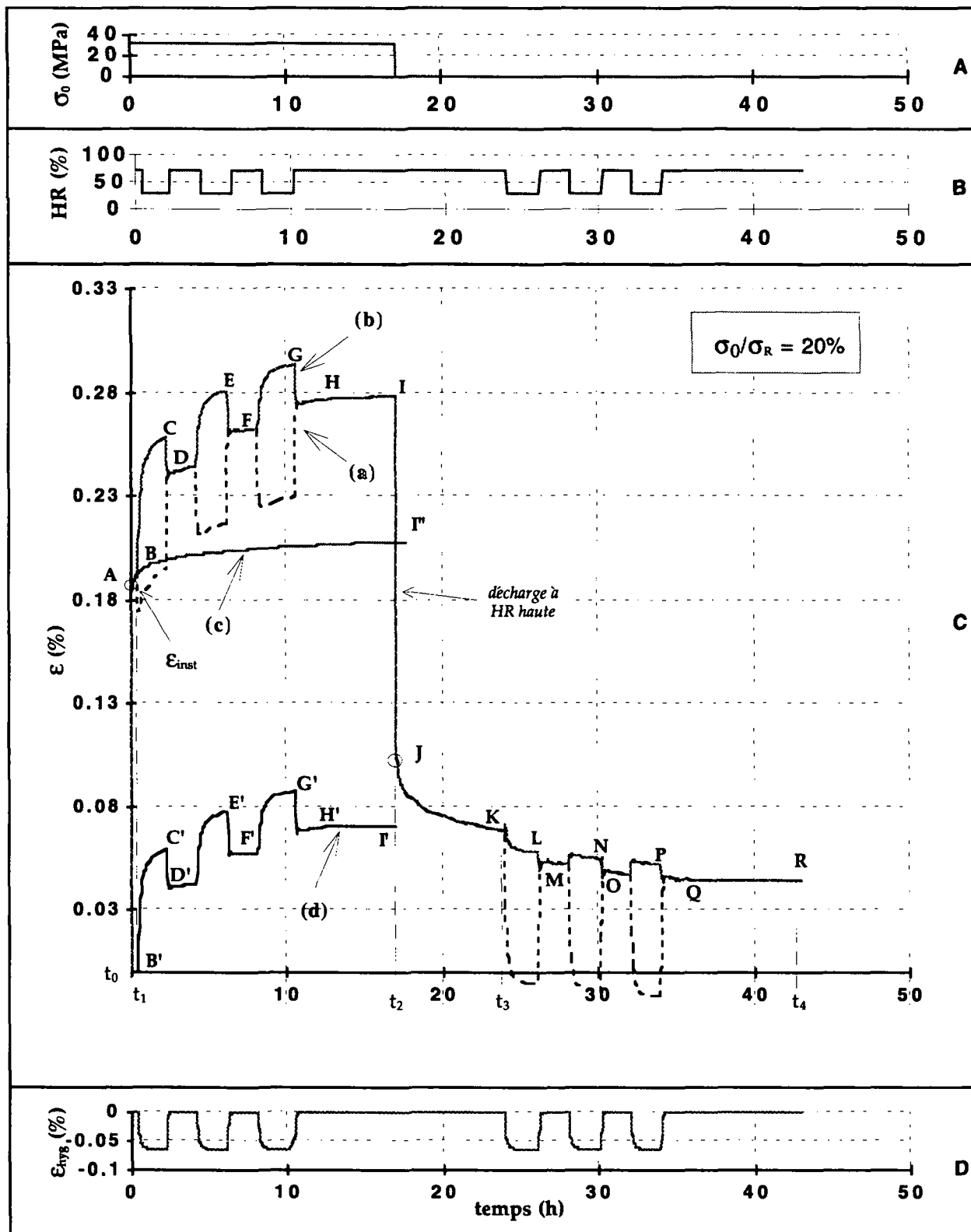


Figure II.6.2. Essai de fluage-recouvrance avec variations d'humidité réalisé sur une éprouvette initialement humide, pour un niveau de force appliquée de 20% environ de la force de rupture. **A**: programme de chargement; **B**: programme de sollicitation hydrique; **C**: déformations ϵ_{tot} (a), ϵ_r (b), ϵ_{visc} (c) d'après simulation et ϵ_{ms} (d); **D**: déformation ϵ_{hyg} .

Deuxième partie de l'essai:

- A l'instant t_0 l'éprouvette est chargée à 20% environ de la contrainte de rupture σ_{R75} . Le fluage à une humidité relative constante de 75% - ϵ_{visc} - est mesuré jusqu'à l'instant t_1 pendant la durée Δt_1 . Trois cycles de variation d'humidité relative entre 75% et 30% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants t_1 et t_2 , selon la figure II.6.2.B. La réponse différée sous climat variable ϵ_{tot} est mesurée pendant la durée Δt_2 .
- A l'instant t_2 , l'éprouvette est totalement déchargée. La recouvrance, pour un niveau d'humidité relative constant de 75%, est mesurée jusqu'à l'instant t_3 pendant la durée Δt_3 . Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants t_3 et t_4 , selon la figure II.6.2.B. La recouvrance différée sous climat variable est mesurée pendant la durée Δt_4 .

L'ensemble des sollicitations imposées et des résultats obtenus sont donnés sur la figure II.6.2.

II.6.2.2 DONNÉES COMPARATIVES

Les tableaux II.6.7 et II.6.8 contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ϵ_r , aux points notés A à R sur la figure II.6.2.C, ainsi que les variations de la déformation ϵ_r , dans chacun des segments AB à QR.

notations	ϵ_A	ϵ_B	ϵ_C	ϵ_D	ϵ_E	ϵ_F	ϵ_G	ϵ_H	ϵ_I
ϵ_r (%)	0.179	0.192	0.258	0.245	0.281	0.262	0.293	0.277	0.279
notations	ϵ_J	ϵ_K	ϵ_L	ϵ_M	ϵ_N	ϵ_O	ϵ_P	ϵ_Q	ϵ_R
ϵ_r (%)	0.106	0.069	0.058	0.052	0.055	0.047	0.052	0.045	0.044

Tableau II.6.7. Valeurs de déformation ϵ_r , correspondant aux points A à R, figure II.6.2.C.

notations	$\Delta\epsilon_{AB}$	$\Delta\epsilon_{BC}$	$\Delta\epsilon_{CD}$	$\Delta\epsilon_{DE}$	$\Delta\epsilon_{EF}$	$\Delta\epsilon_{FG}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.013	0.066	-0.013	0.036	-0.0189	0.031
notations	$\Delta\epsilon_{GH}$	$\Delta\epsilon_{HI}$	$\Delta\epsilon_{IJ}$	$\Delta\epsilon_{JK}$	$\Delta\epsilon_{KL}$	$\Delta\epsilon_{LM}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	-0.016	0.002	-0.173	-0.037	-0.011	-0.006
notations	$\Delta\epsilon_{MN}$	$\Delta\epsilon_{NO}$	$\Delta\epsilon_{OP}$	$\Delta\epsilon_{PQ}$	$\Delta\epsilon_{QR}$	
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.003	-0.008	0.005	-0.007	-0.001	

Tableau II.6.8. Valeurs de déformation ϵ_r , correspondant aux segments AB à QR, figure II.6.2.C.

Les tableaux II.6.9 et II.6.10 contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation due à l'effet mécanosorptif ϵ_{ms} aux points notés B' à I' sur la figure II.6.2.C, ainsi que les variations de la déformation ϵ_{ms} dans chacun des segments B'C' à H'I'.

notations	$\epsilon_{B'}$	$\epsilon_{C'}$	$\epsilon_{D'}$	$\epsilon_{E'}$	$\epsilon_{F'}$	$\epsilon_{G'}$	$\epsilon_{H'}$	$\epsilon_{I'}$
ϵ_{ms} (%)	0	0.059	0.043	0.077	0.058	0.087	0.070	0.071

Tableau II.6.9. Valeurs de déformation ϵ_{ms} correspondant aux points B' à I', figure II.6.2.C.

notations	$\Delta\epsilon_{B'C'}$	$\Delta\epsilon_{C'D'}$	$\Delta\epsilon_{D'E'}$	$\Delta\epsilon_{E'F'}$	$\Delta\epsilon_{F'G'}$	$\Delta\epsilon_{G'H'}$	$\Delta\epsilon_{H'I'}$
$\Delta\epsilon_{ms}$ (%)	0.059	-0.016	0.034	-0.019	0.029	-0.017	0.001

Tableau II.6.10. Valeurs de déformation ϵ_{ms} correspondant aux segments B'C' à H'I', figure II.6.2.C.

II.6.2.3 CONSTATATIONS

On constate, à partir des résultats de la figure II.6.2.C, que:

Après application de la charge:

- ★ la *première désorption*, intervenant après application de la charge (BC), n'entraîne *pas une augmentation très importante de la déformation* ϵ_r , par rapport à celle mesurée lors des désorptions suivantes. En effet, l'augmentation engendrée est telle que: $\epsilon_{rBC} \approx 0.37 \epsilon_{inst}$.
- ★ les *désorptions suivantes* entraînent, dans tous les cas, une *augmentation* de la déformation ϵ_r . Elles sont respectivement d'une amplitude telle que $\epsilon_{rDE} \approx 0.20 \epsilon_{inst}$ et $\epsilon_{rFG} \approx 0.17 \epsilon_{inst}$.
- ★ les *absorptions* entraînent, dans tous les cas, une *diminution* de la déformation ϵ_r .
- ★ l'amplitude de l'augmentation de déformation ϵ_r engendrée lors de chaque cycle hydrique va en décroissant. Elle est telle que $\epsilon_{rBD} \approx 0.29 \epsilon_{inst}$ lors du premier cycle (BD), $\epsilon_{rDF} \approx 0.10 \epsilon_{inst}$ lors du deuxième (DF) et $\epsilon_{rFH} \approx 0.08 \epsilon_{inst}$ lors du troisième (FH).
- ★ à l'issue des 3 cycles d'humidité, l'augmentation de la déformation due au couplage mécanosorptif ϵ_{ms} estimée (point I') est d'environ 0.40 fois ϵ_{inst} .

Après suppression de la charge (observations sur la déformation ϵ_r):

- ★ la recouvrance instantanée - mesurée à la décharge, entre les points I et J - est du même ordre de grandeur que la déformation instantanée mesurée à la charge. En effet, $\epsilon_{rIJ} \approx \epsilon_{rA}$.
- ★ au point K - 15 heures après la décharge - l'amplitude de la recouvrance est telle que $\epsilon_{rK} \approx 0.40 \epsilon_{inst}$. On observe une diminution de la déformation (augmentation de la recouvrance) après le premier cycle d'humidité (KM), d'une amplitude telle que $\epsilon_{rKM} \approx 0.10 \epsilon_{inst}$. Après le deuxième cycle (MO) la recouvrance diminue d'une amplitude $\epsilon_{rMO} \approx 0.03 \epsilon_{inst}$ puis $\epsilon_{rOQ} \approx 0.01 \epsilon_{inst}$ après le troisième (OQ).
- ★ la recouvrance est partielle. Une déformation permanente ϵ_p peut être mise en évidence au point R, 34 heures après la décharge. Celle-ci est d'amplitude relativement élevée. Elle correspond, en effet, à environ 25% de la déformation instantanée ϵ_{inst} mesurée à la charge.

D'autre part, on peut remarquer l'accélération importante du fluage induite par les variations d'humidité, courbe (a), et particulièrement après chaque désorption.

II.6.3 CONCLUSION

Des essais de fluage et recouvrance avec variations cycliques d'humidité relative ont été effectués pour observer le comportement hygro-mécanique du bois. Ils ont été réalisés sur éprouvette initialement sèche ou initialement humide.

Les résultats obtenus nous ont permis, dans un premier temps, d'observer des caractéristiques générales de l'effet mécanosorptif, comme trouvées lors des travaux expérimentaux de précédents auteurs, à savoir:

- ★ lorsque le premier changement d'humidité qui intervient après charge de l'éprouvette est une absorption, une augmentation de la déformation ϵ_{ms} est engendrée;
- ★ les absorptions suivantes entraînent une diminution de la déformation ϵ_{ms} ;
- ★ les désorption entraînent une augmentation de la déformation ϵ_{ms} ;
- ★ la recouvrance instantanée est d'amplitude quasiment identique à la déformation instantanée mesurée lors de l'application de la charge;

- ★ la récupération est partielle et peut être d'amplitude relativement importante (entre 25% et 40% de la déformation instantanée, dans notre cas);
- ★ on retrouve l'observation mentionnée par Armstrong et Kingston (1962), mais de façon plus marquée, comme quoi l'augmentation de la déformation ϵ_{ms} après plusieurs cycles de variations hydriques est plus importante en amplitude si la charge est appliquée sur une éprouvette initialement sèche.

D'autre part, nous avons pu observer les points nouveaux suivants:

- lorsque le **premier changement d'humidité** que subit l'éprouvette va dans le sens de l'**absorption** - force appliquée sur éprouvette initialement sèche - une **augmentation de la déformation** est engendrée, contrairement à ce qui est observé lors des absorptions ultérieures. Cette augmentation est d'**amplitude importante**.
- lorsque le **premier changement d'humidité** que subit l'éprouvette va dans le sens de la **désorption** - force appliquée sur éprouvette initialement humide - une **augmentation de la déformation** est induite, comme observée lors des désorptions ultérieures. Cette augmentation **n'est pas d'amplitude beaucoup plus importante que celle induite lors des désorptions ultérieures**.

CHAPITRE II.7

INFLUENCE DU DÉLAI DE MISE EN ROUTE DES CYCLES D'HUMIDITÉ

Quatre séries d'essais de fluage en traction avec variations d'humidité ont été réalisées pour observer l'influence du délai de mise en route des cycles d'humidité. Trois de ces séries ont été réalisées sur des éprouvettes initialement sèches et une sur éprouvettes initialement humides. Elles ont été effectuées pour plusieurs niveaux de charge compris entre 20% et 35% de la charge de rupture à l'humidité relative atmosphérique correspondante.

II.7.1 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT SÈCHES AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE DÉBUTANT APRÈS 60 SECONDES, 10 MINUTES ET 3 HEURES (NIVEAU DE CHARGE DE 22%).

II.7.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Le premier groupe d'essais a été effectué sur 3 éprouvettes choisies dans une même série de coupe. Les étapes du déroulement des trois essais sont décrites sur le schéma II.7.1. La première partie de l'essai est similaire dans les 3 cas. La différence au niveau du délai de mise en route des cycles d'humidité relative sous charge est spécifiée, pour chaque éprouvette, dans le descriptif de la seconde partie.

Première partie de l'essai:

Chaque éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une charge constante et nulle.

- Un niveau constant de 30% d'humidité relative atmosphérique est fixé pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la déformation est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 30% et 75%. Les variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.

- Un niveau constant de 30% d'humidité relative est à nouveau fixé durant la dernière période de 12 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la déformation avant application du programme de chargement.

Deuxième partie de l'essai:

- Une charge correspondant à environ 22% de la contrainte de rupture σ_{R30} est appliquée à chaque éprouvette aux instants respectifs $t_0(1)$, $t_0(2)$ et $t_0(3)$.
- Le fluage à humidité constante - ε_{visc} - est mesuré jusqu'à l'instant $t_1(1)$ - respectivement $t_1(2)$ et $t_1(3)$ - pendant la durée $\Delta t_1(1)$ - respectivement $\Delta t_1(2)$ et $\Delta t_1(3)$.
- Deux cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à chaque éprouvette, selon les figures II.7.1.B, II.7.2.B et II.7.3.B. La mise en route des cycles d'humidité intervient après $t_1(1) = 60 \text{ secondes}$ pour la première éprouvette $t_1(2) = 10 \text{ minutes}$ pour la deuxième et $t_1(3) = 3 \text{ heures}$ pour la troisième. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée jusqu'à l'instant $t_2(1)$ - respectivement $t_2(2)$ et $t_2(3)$ - pendant la durée $\Delta t_2(1)$ - respectivement $\Delta t_2(2)$ et $\Delta t_2(3)$.
- A l'instant $t_2(1)$ - respectivement $t_2(2)$ et $t_2(3)$ -, les éprouvettes sont totalement déchargées. La recouvrance instantanée est mesurée.

L'ensemble des résultats obtenus est donné sur les figures II.7.1. à II.7.6.

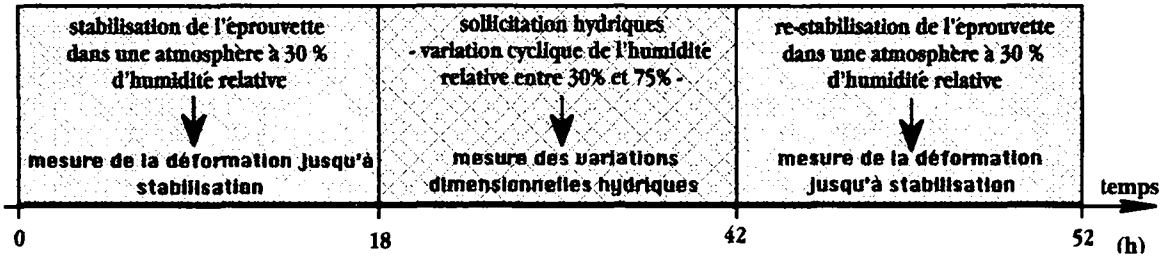
Les figures II.7.1, II.7.2 et II.7.3 sont relatives à chacun des trois essais pris séparément. Sont donnés sur ces figures:

- ❶ les programmes de chargement (II.7.1.A), (II.7.2.A) et (II.7.3.A) et de sollicitation hydrique (II.7.1.B), (II.7.2.B) et (II.7.3.B) imposés respectivement à chaque éprouvette;
- ❷ les résultats des mesures de la déformation ε_{tot} - (II.7.1.C), courbe (1a); (II.7.2.C), courbe (2a) et (II.7.3.C), courbe (3a) - ainsi que des variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} correspondantes - (II.7.1.D), courbe (1c); (II.7.2.D), courbe (2c), et (II.7.3.D), courbe (3c);
- ❸ le résultat du calcul de la déformation ε_r , définie en (II.6.1), respectivement courbes (1b), (2b) et (3b).

Les courbes représentées sur la figure II.7.4 correspondent à la superposition de la déformation ε_r obtenue lors des trois essais. Ces résultats sont ensuite représentés sur un graphique semi-logarithmique, figure II.7.5, ce qui permet une meilleure visualisation des instants de mise en route des variations d'humidité pour l'ensemble des trois essais.

PREMIÈRE PARTIE DE L'ESSAI

mesure des variations dimensionnelles



DEUXIÈME PARTIE DE L'ESSAI

application d'une sollicitation mécanique

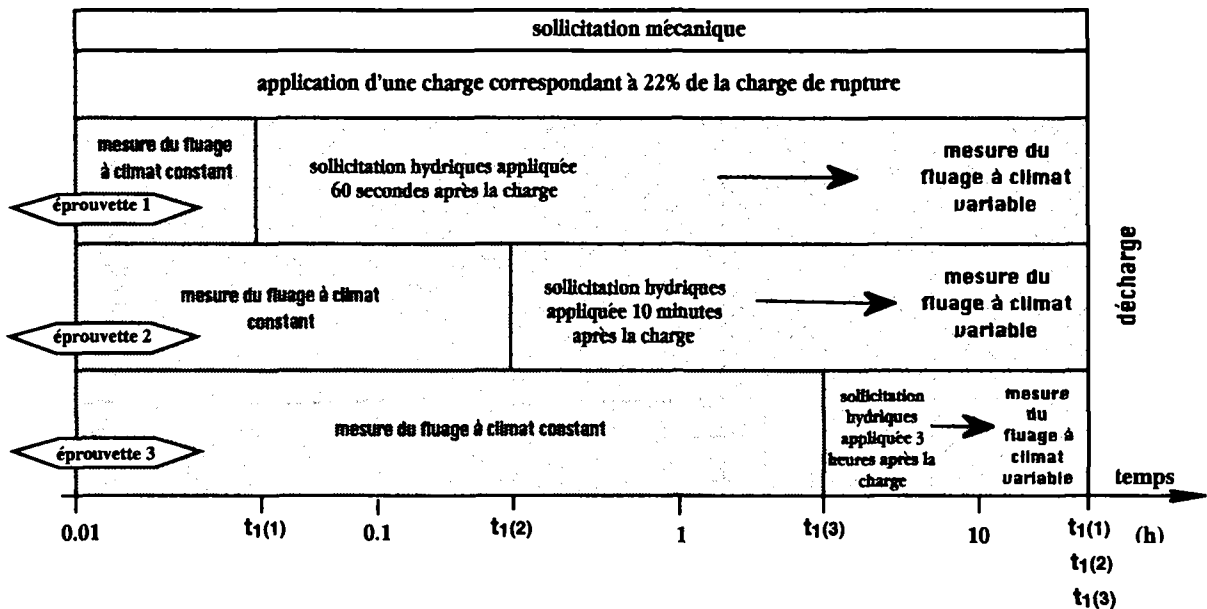


Schéma II.7.1. Étapes de déroulement des essais de fluage-recouvrance avec variations hydriques effectués sur 3 éprouvettes initialement sèches, dont les résultats sont donnés sur les figures II.7.1 à II.7.6.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	$t_0(1)$	$\Delta t_1(1)$	$t_1(1)$	$\Delta t_2(1)$	$t_2(1)$
temps (h)	0	0.0167	0.0167	21.983	21
notations	$t_0(2)$	$\Delta t_1(2)$	$t_1(2)$	$\Delta t_2(2)$	$t_2(2)$
temps (h)	0	0.1667	0.1667	18.833	19
notations	$t_0(3)$	$\Delta t_1(3)$	$t_1(3)$	$\Delta t_2(3)$	$t_2(3)$
temps (h)	0	3	3	22	25

Tableau II.7.1. Notations en correspondance avec les essais décrits sur le schéma II.7.1.

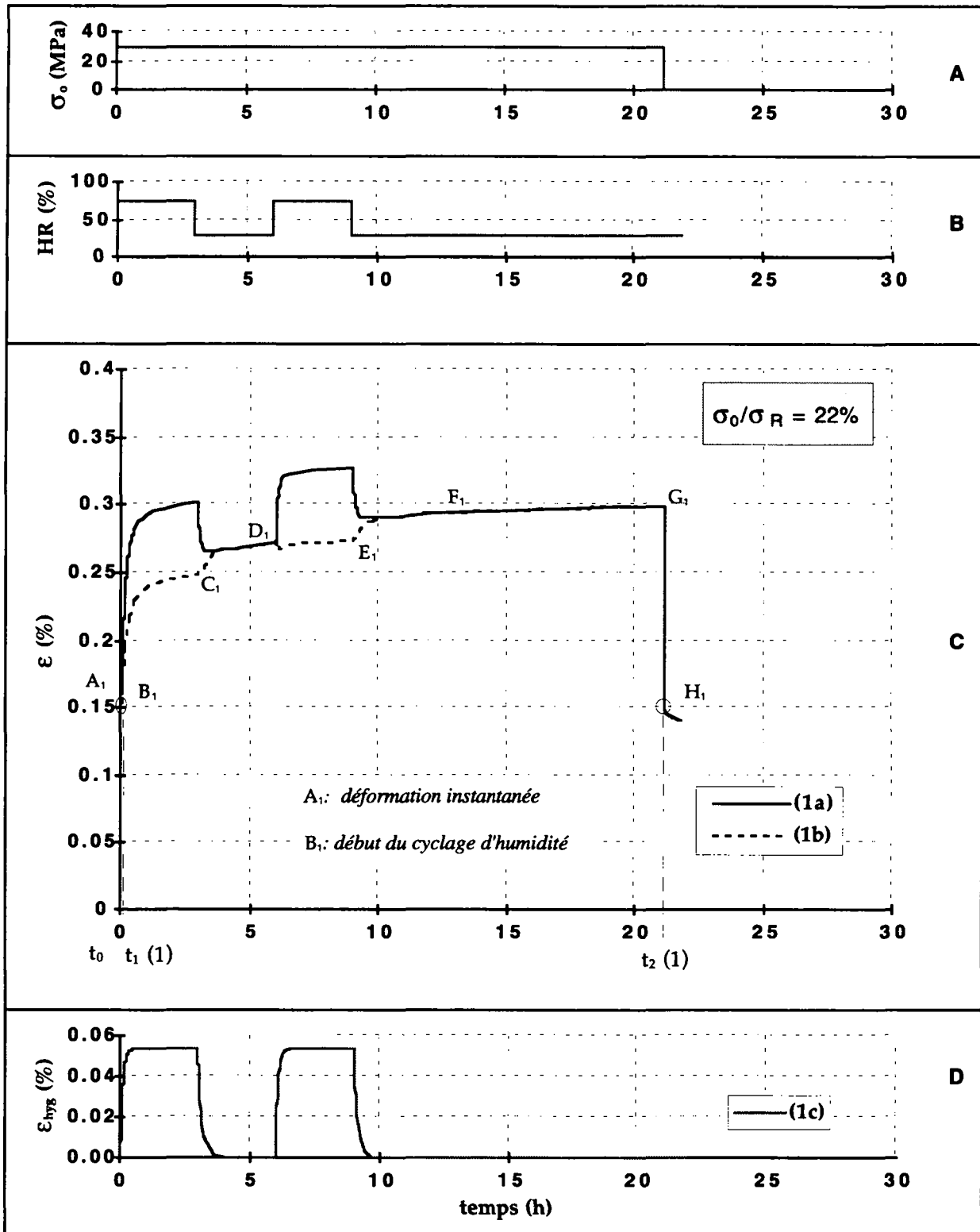


Figure II.7.1. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Premier essai de fluage-recouvrance sur éprouvette initialement sèche. Les variations d'humidité débutent après 60 secondes. Le niveau de force appliquée correspond à environ 22% de la force de rupture. **A**: programme de chargement; **B**: programme de sollicitation hydrique; **C**: déformations ϵ_{tot} (1a) et ϵ_r (1b); **D**: déformation ϵ_{hyg} (1c).

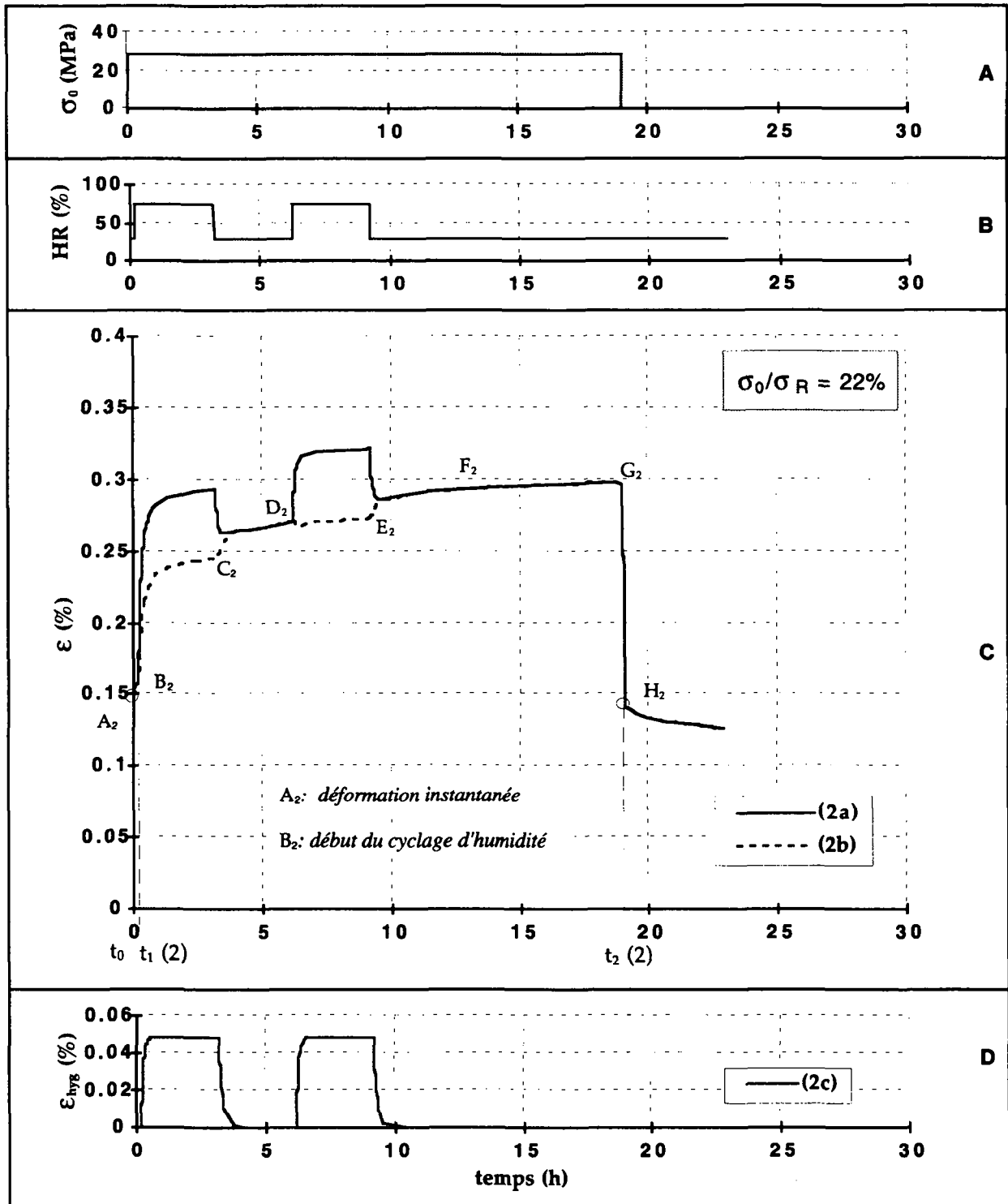


Figure II.7.2 Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Deuxième essai de fluage-recouvrance sur éprouvette initialement sèche. Les variations d'humidité débutent après 10 minutes. Le niveau de force appliquée correspond à environ 22% de la force de rupture. A: programme de chargement; B: programme de sollicitation hydrique; C: déformations ϵ_{tot} (2a) et ϵ_r (2b); D: déformation ϵ_{hyg} : (2c).

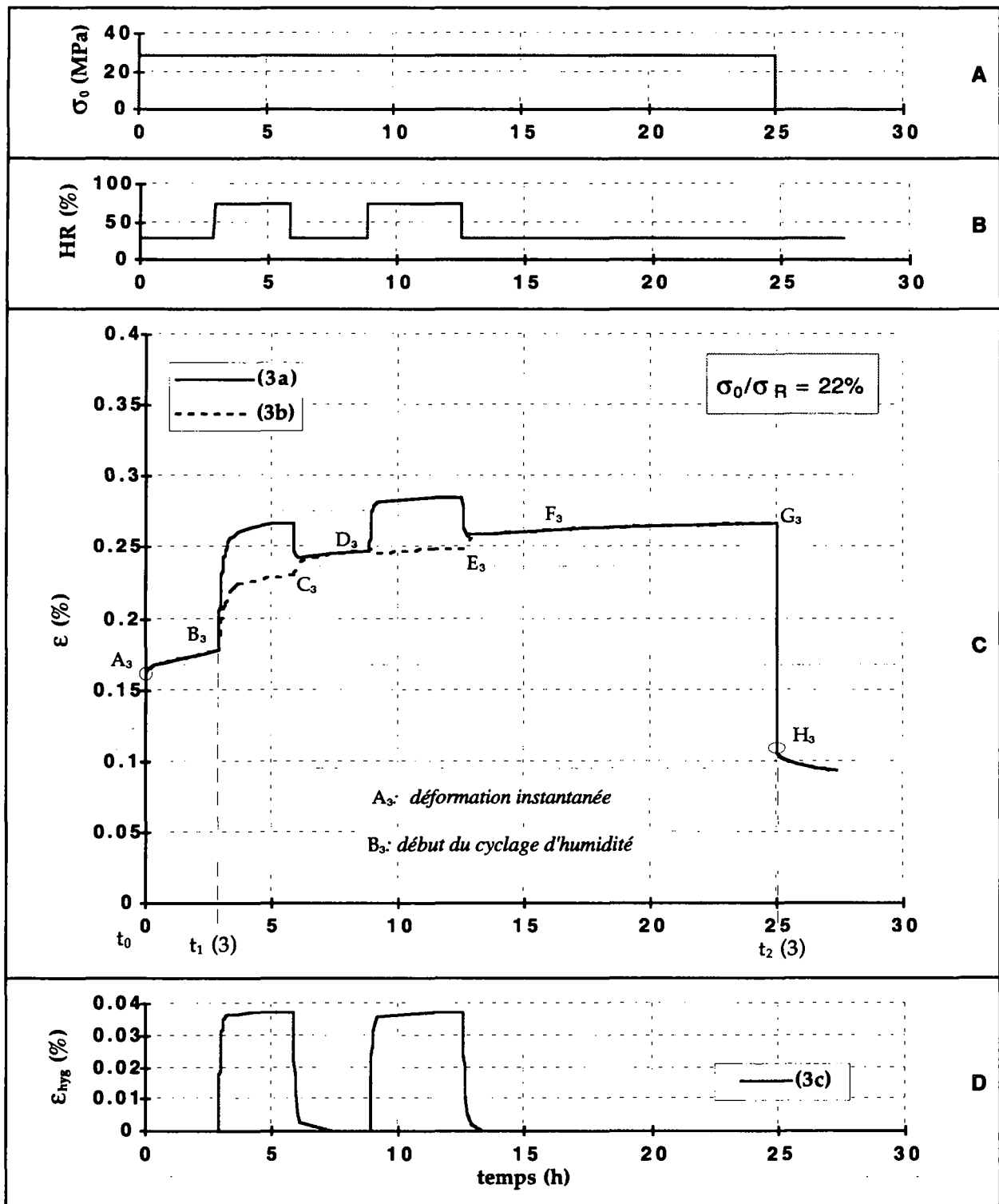


Figure II.7.3. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Troisième essai de fluage-recouvrance sur éprouvette initialement sèche. Les variations d'humidité débutent après 3 heures. Le niveau de force appliquée correspond à environ 22% de la force de rupture. **A:** programme de chargement; **B:** programme de sollicitation hydrique; **C:** déformations ϵ_{tot} (3a) et ϵ_r (3b); **D:** déformation ϵ_{hyg} : (3c).

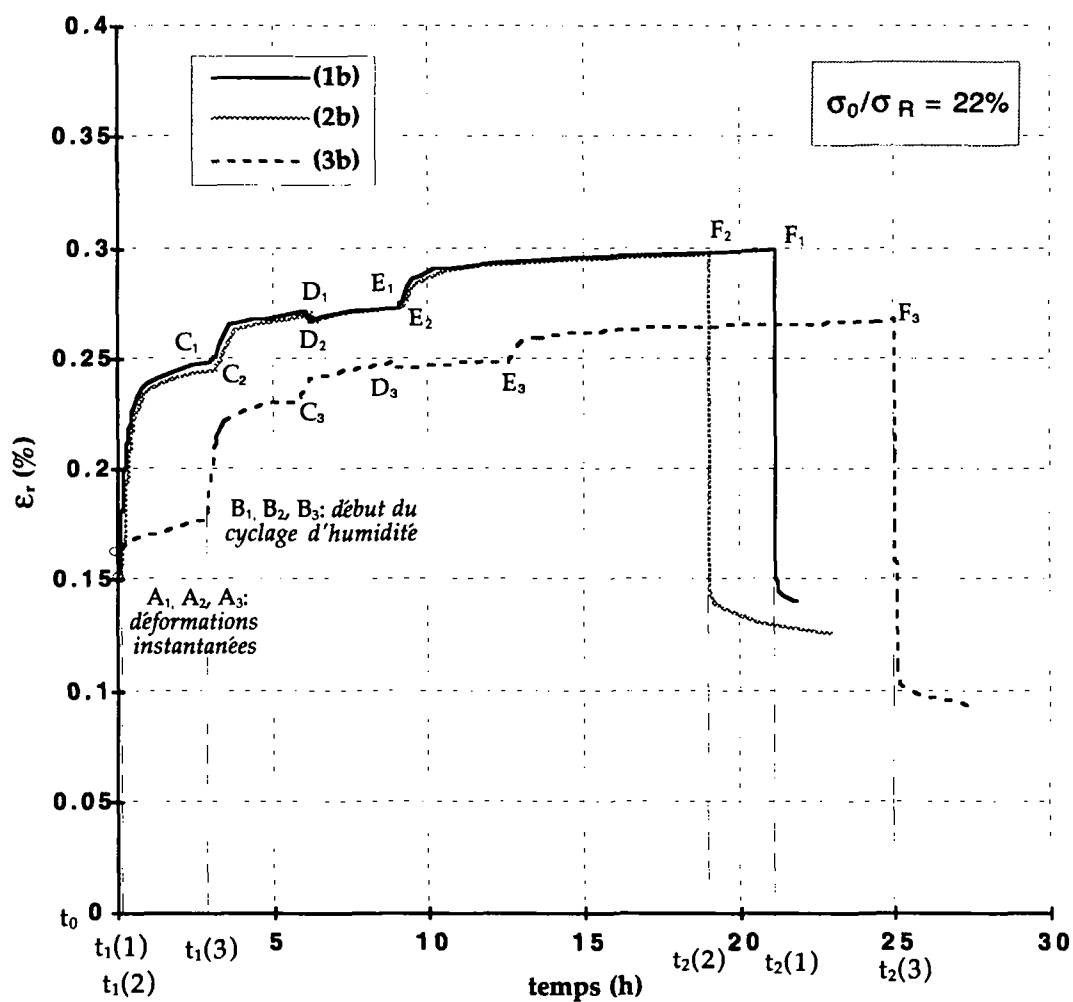


Figure II.7.4. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Comparaison entre les trois essais de fluage-recouvrance avec variations cycliques d'humidité relative effectués sur des éprouvettes initialement sèches, pour un niveau de force de 22% (échelle de temps linéaire). Le cyclage hydrique débute après 60 secondes: (1b), 10 minutes: (2b) et 3 heures: (3b). Les déformations représentées correspondent à ϵ_r .

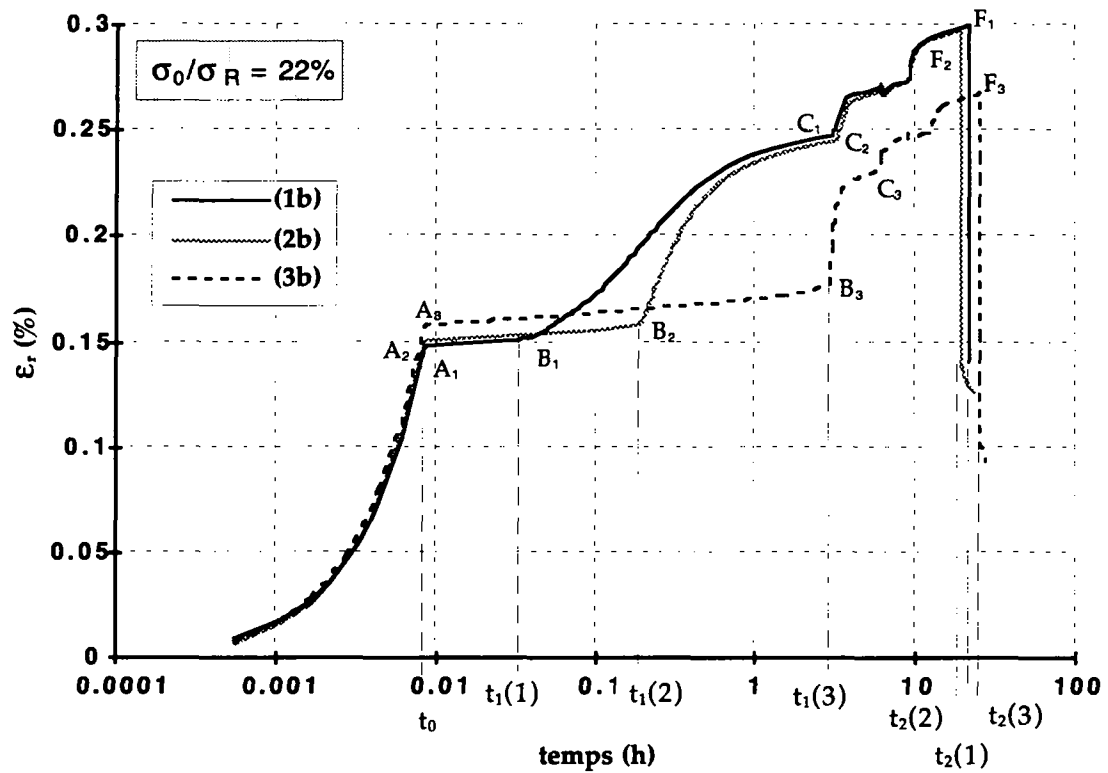


Figure II.7.5. Influence du délai d'application du cyclage d'humidité. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation ϵ_r lors des 3 essais de fluage-recouvrance avec variations d'humidité en fonction de $\log t$.

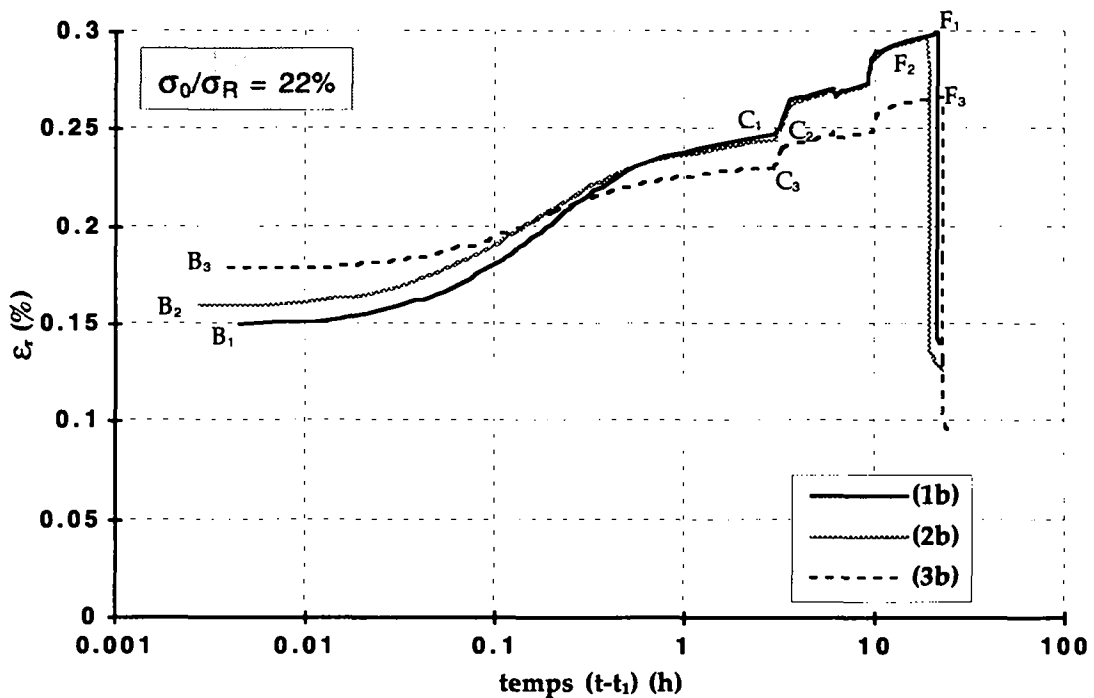


Figure II.7.6. Influence du délai d'application du cyclage d'humidité. Comparaison entre les déformations obtenues à partir du premier changement d'humidité en fonction de $\log (t-t_1)$, t_1 : instant d'application du cyclage d'humidité ($t_1(1) = 60$ secondes, $t_1(2) = 10$ minutes et $t_1(3) = 3$ heures).

Pour pouvoir effectuer une comparaison entre les déformations ϵ_r , à l'endroit où débutent les variations d'humidité (t_1), une translation ($t-t_1$) a été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que ces instants coïncident. Les courbes ainsi obtenues sont données Figure II.7.6.

II.7.1.2 DONNÉES COMPARATIVES

Les tableaux II.7.3 et II.7.4 contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ϵ_r , aux points notés A_i à H_i sur les figures II.7.1.C, II.7.2.C et II.7.3.C, ainsi que les variations de la déformation dans chacun des segments A_iB_i à G_iH_i .

notations	ϵ_{A_1}	ϵ_{B_1}	ϵ_{C_1}	ϵ_{D_1}	ϵ_{E_1}	ϵ_{F_1}	ϵ_{G_1}	ϵ_{H_1}
ϵ_r (%)	0.148	0.150	0.248	0.271	0.273	0.293	0.299	0.152

notations	ϵ_{A_2}	ϵ_{B_2}	ϵ_{C_2}	ϵ_{D_2}	ϵ_{E_2}	ϵ_{F_2}	ϵ_{G_2}	ϵ_{H_2}
ϵ_r (%)	0.150	0.158	0.245	0.271	0.274	0.292	0.297	0.148

notations	ϵ_{A_3}	ϵ_{B_3}	ϵ_{C_3}	ϵ_{D_3}	ϵ_{E_3}	ϵ_{F_3}	ϵ_{G_3}	ϵ_{H_3}
ϵ_r (%)	0.159	0.178	0.230	0.248	0.248	0.262	0.267	0.110

Tableau II.7.3. Valeurs de déformation correspondant aux points A_i à H_i , figures II.7.1.C, II.7.2.C et II.7.3.C.

notations	$\Delta\epsilon_{A_1B_1}$	$\Delta\epsilon_{B_1C_1}$	$\Delta\epsilon_{C_1D_1}$	$\Delta\epsilon_{D_1E_1}$	$\Delta\epsilon_{E_1F_1}$	$\Delta\epsilon_{F_1G_1}$	$\Delta\epsilon_{G_1H_1}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.002	0.098	0.023	0.002	0.020	0.007	-0.148

notations	$\Delta\epsilon_{A_2B_2}$	$\Delta\epsilon_{B_2C_2}$	$\Delta\epsilon_{C_2D_2}$	$\Delta\epsilon_{D_2E_2}$	$\Delta\epsilon_{E_2F_2}$	$\Delta\epsilon_{F_2G_2}$	$\Delta\epsilon_{G_2H_2}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.008	0.087	0.026	0.003	0.018	0.005	-0.149

notations	$\Delta\epsilon_{A_3B_3}$	$\Delta\epsilon_{B_3C_3}$	$\Delta\epsilon_{C_3D_3}$	$\Delta\epsilon_{D_3E_3}$	$\Delta\epsilon_{E_3F_3}$	$\Delta\epsilon_{F_3G_3}$	$\Delta\epsilon_{G_3H_3}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.019	0.052	0.018	0.000	0.014	0.005	-0.157

Tableau II.7.4. Valeurs de déformation correspondant aux points A_iB_i à G_iH_i , figures II.7.1.C, II.7.2.C et II.7.3.C.

II.7.1.3 CONSTATATIONS

Après application de la charge:

- ★ la *première absorption* entraîne une augmentation de la déformation ε_r telle que:
 - ◆ $\varepsilon_{rB_1C_1} \approx 0.66 \varepsilon_{inst}$, si elle intervient 60 secondes après la charge;
 - ◆ $\varepsilon_{rB_2C_2} \approx 0.58 \varepsilon_{inst}$, si elle intervient 5 minutes après la charge;
 - ◆ $\varepsilon_{rB_3C_3} \approx 0.33 \varepsilon_{inst}$, si elle intervient 3 heures après la charge;
- ★ dans le premier essai, l'augmentation de déformation ε_r induite par le premier cycle d'humidité (B₁D₁) est telle que $\varepsilon_{rB_1D_1} \approx 0.80 \varepsilon_{inst}$, puis $\varepsilon_{rD_1F_1} \approx 0.15 \varepsilon_{inst}$ après le second (D₁F₁);
- ★ dans le deuxième essai, l'augmentation de déformation ε_r induite par le premier cycle d'humidité (B₂D₂) est telle que $\varepsilon_{rB_2D_2} \approx 0.75 \varepsilon_{inst}$, puis $\varepsilon_{rD_2F_2} \approx 0.15 \varepsilon_{inst}$ après le second (D₂F₂);
- ★ dans le troisième essai, l'augmentation de déformation ε_r induite par le premier cycle d'humidité (B₃D₃) est telle que $\varepsilon_{rB_3D_3} \approx 0.45 \varepsilon_{inst}$, puis $\varepsilon_{rD_3F_3} \approx 0.10 \varepsilon_{inst}$ après le second (D₃F₃).

Après suppression de la charge:

La valeur de la recouvrance instantanée, mesurée à la décharge, est très proche de la déformation instantanée initiale, mesurée à la charge, dans chacun des trois essais, comme on peut l'observer en comparant les déformations ε_{A_i} et $|\Delta \varepsilon_{G_i H_i}|$.

II.7.2 ESSAIS DE FLUAGE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT SÈCHES AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE DÉBUTANT APRÈS 5 MINUTES ET 45 HEURES (NIVEAU DE CHARGE DE 22%).

II.7.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Le deuxième groupe d'essais a été effectué sur deux éprouvettes. Les étapes du déroulement des deux essais sont décrites sur le schéma II.7.2. Comme précédemment, la première étape est identique dans les deux cas, seule change la seconde étape, au niveau du délai de mise en route du cyclage hydrique.

Première partie de l'essai:

Chaque éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une charge constante et nulle.

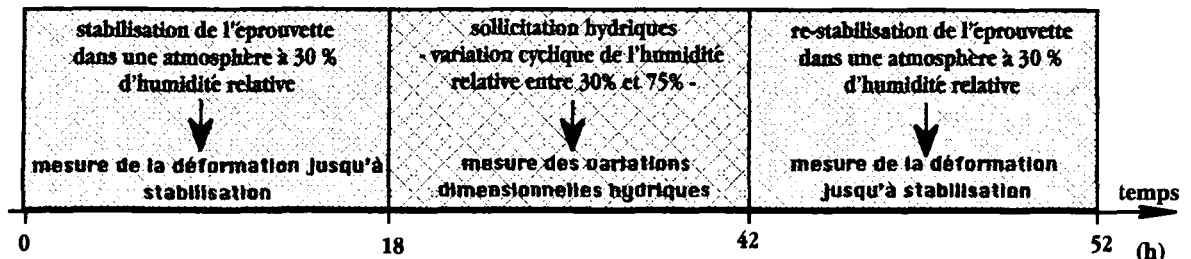
- Un niveau constant de 30% d'humidité relative atmosphérique est fixé pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la déformation est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 30% et 75%. Les variations dimensionnelles hydriques ϵ_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.
- Un niveau constant de 30% d'humidité relative est à nouveau fixé durant la dernière période de 10 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la déformation avant application du programme de chargement.

Deuxième partie de l'essai:

- Une charge correspondant à environ 22% de la contrainte de rupture σ_{R30} est appliquée à chaque éprouvette aux instants respectifs $t_0(4)$ et $t_0(5)$.
- Le fluage à humidité constante - ϵ_{visc} - est mesuré jusqu'à l'instant $t_1(4)$ - respectivement $t_1(5)$ - pendant la durée $\Delta t_1(4)$ - respectivement $\Delta t_1(5)$.
- Deux cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à chaque éprouvette, selon les figures II.7.7.B et II.7.8.B. La mise en route des cycles d'humidité intervient après $t_1(4) = 5 \text{ minutes}$ pour la première éprouvette et $t_1(3) = 45 \text{ heures}$ pour la deuxième. Lors du premier essai, donné sur la figure II.7.7, l'humidité est maintenue constante entre les instants $t_{11}(4)$ et $t_{12}(4)$, pendant une durée $\Delta t_{12}(4)$. Deux cycles d'humidité supplémentaires sont ensuite appliqués à l'éprouvette à partir de $t_{12}(4)$. La réponse différée sous climat variable ϵ_{tot} est mesurée jusqu'à l'instant $t_2(4)$ - respectivement $t_2(5)$ - pendant la durée $\Delta t_2(4)$ - respectivement $\Delta t_2(5)$.

PREMIÈRE PARTIE DE L'ESSAI

mesure des variations dimensionnelles



DEUXIÈME PARTIE DE L'ESSAI

application d'une sollicitation mécanique

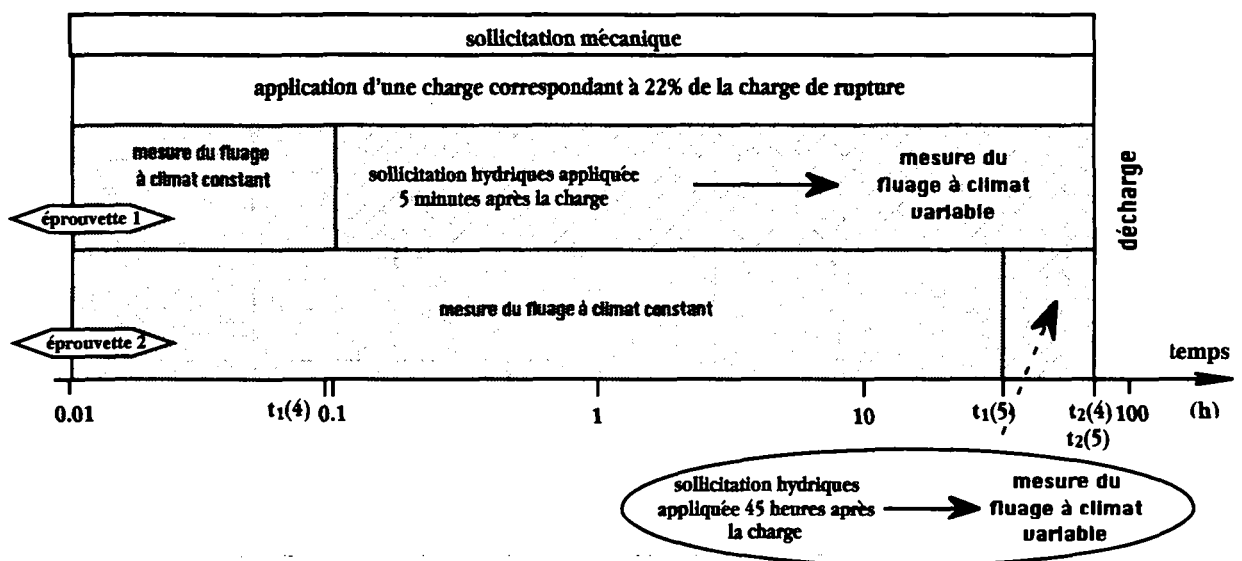


Schéma II.7.2. Étapes de déroulement des essais de fluage avec variations hydriques effectués sur 2 éprouvettes initialement sèches, dont les résultats sont donnés sur les figures II.7.7 à II.7.11.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	$t_0(4)$	$\Delta t_1(4)$	$t_1(4)$	$\Delta t_2(4)$	$t_2(4)$
temps (h)	0	0.0873	0.0873	61.913	62
notations	$t_0(5)$	$\Delta t_1(5)$	$t_1(5)$	$\Delta t_2(5)$	$t_2(5)$
temps (h)	0	45	45	25	70

Tableau II.7.4 Notations en correspondance avec les essais décrits sur le schéma II.7.2.

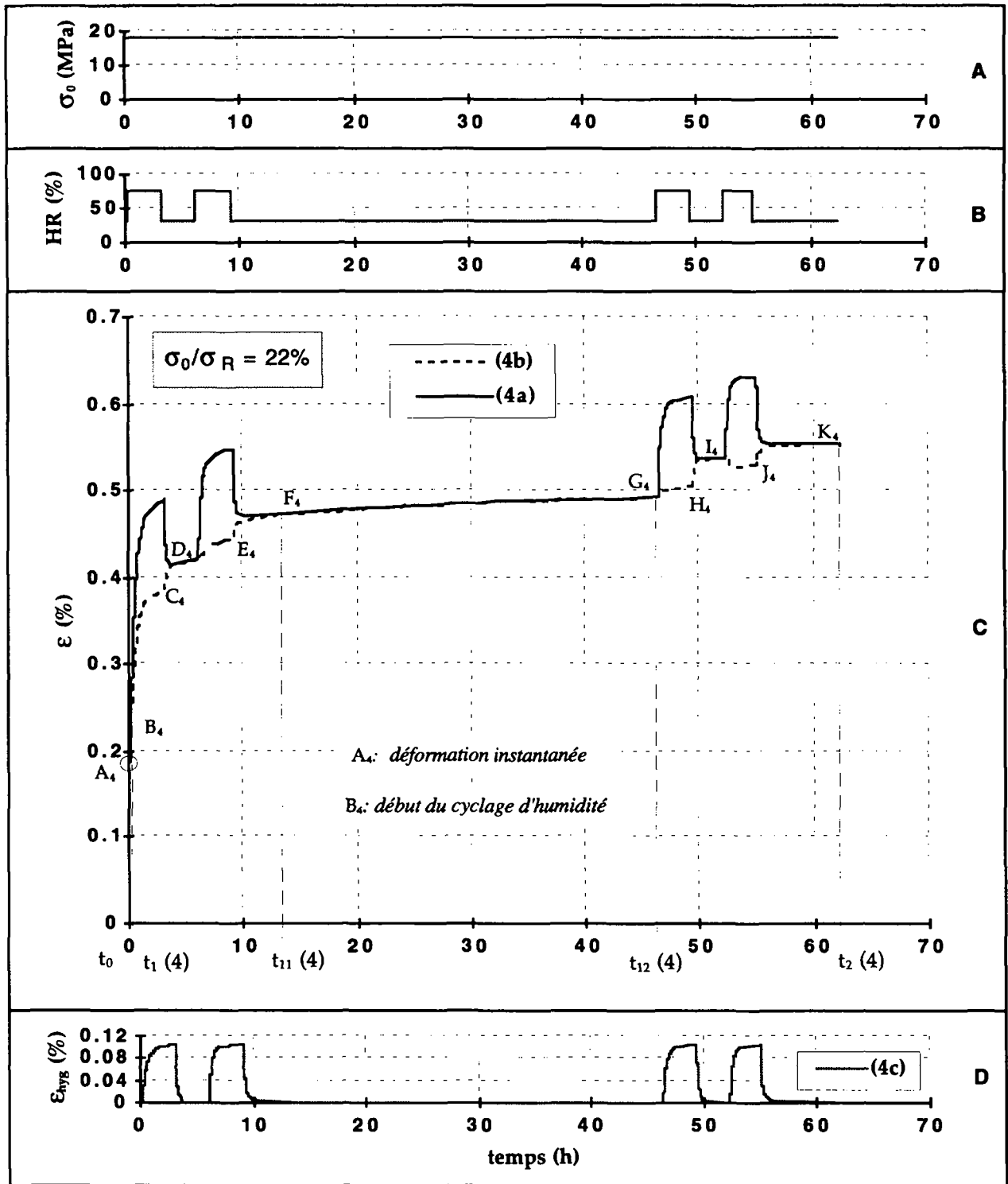


Figure II.7.7. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Premier essai de fluage sur éprouvette initialement sèche. Les variations d'humidité débutent après 5 minutes. Le niveau de force appliquée correspond à environ 22% de la force de rupture. A: programme de chargement; B: programme de sollicitation hydrique; C: déformations ϵ_{tot} (4a) et ϵ_r (4b); D: déformation ϵ_{hyg} : (4c).

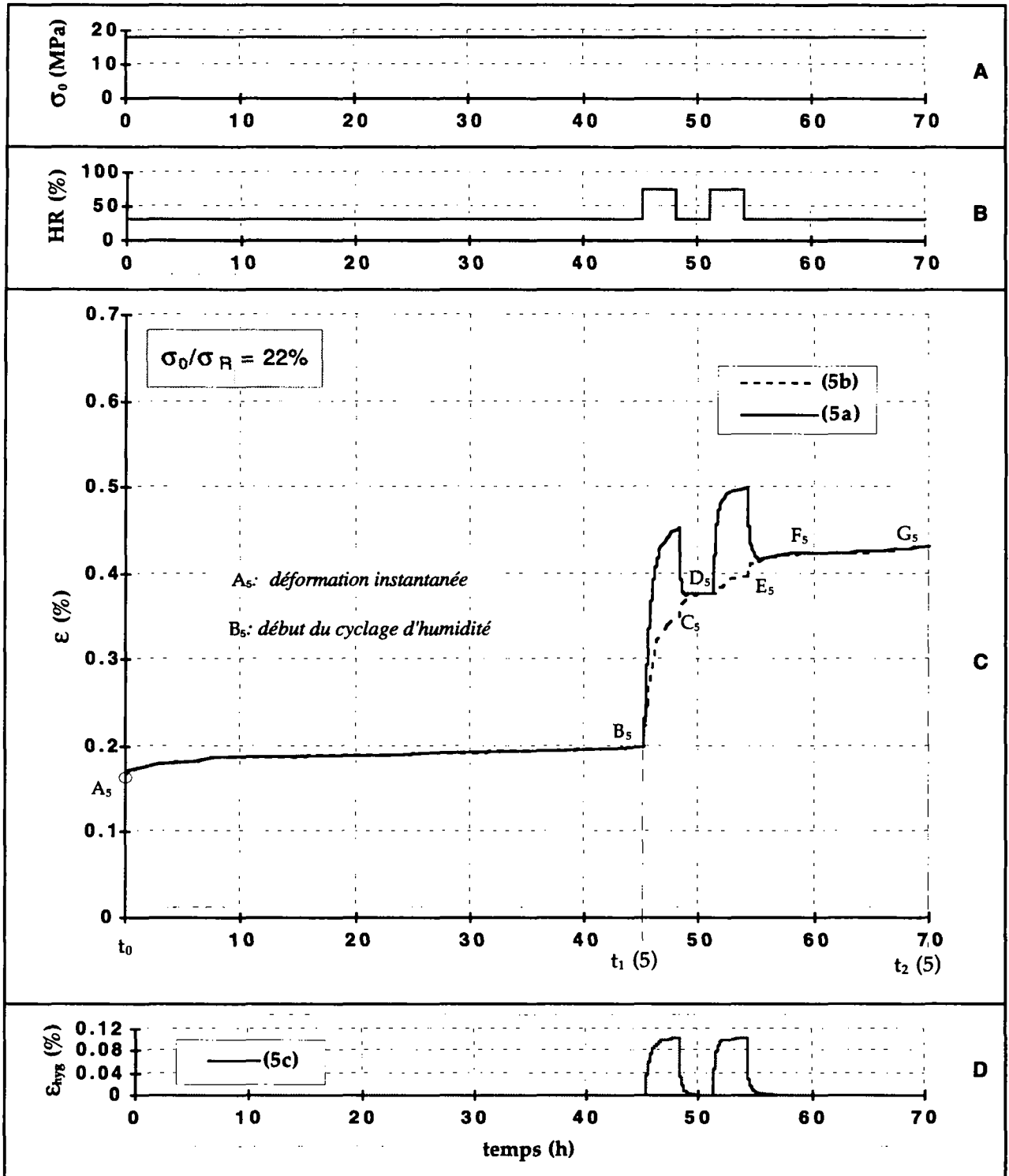


Figure II.7.8. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Deuxième essai de fluage sur éprouvette initialement sèche. Les variations d'humidité débutent après 45 heures. Le niveau de force appliquée correspond à environ 22% de la force de rupture. **A**: programme de chargement; **B**: programme de sollicitation hydrique; **C**: déformations ϵ_{tot} (5a) et ϵ_r (5b); **D**: déformation ϵ_{hyg} : (5c).

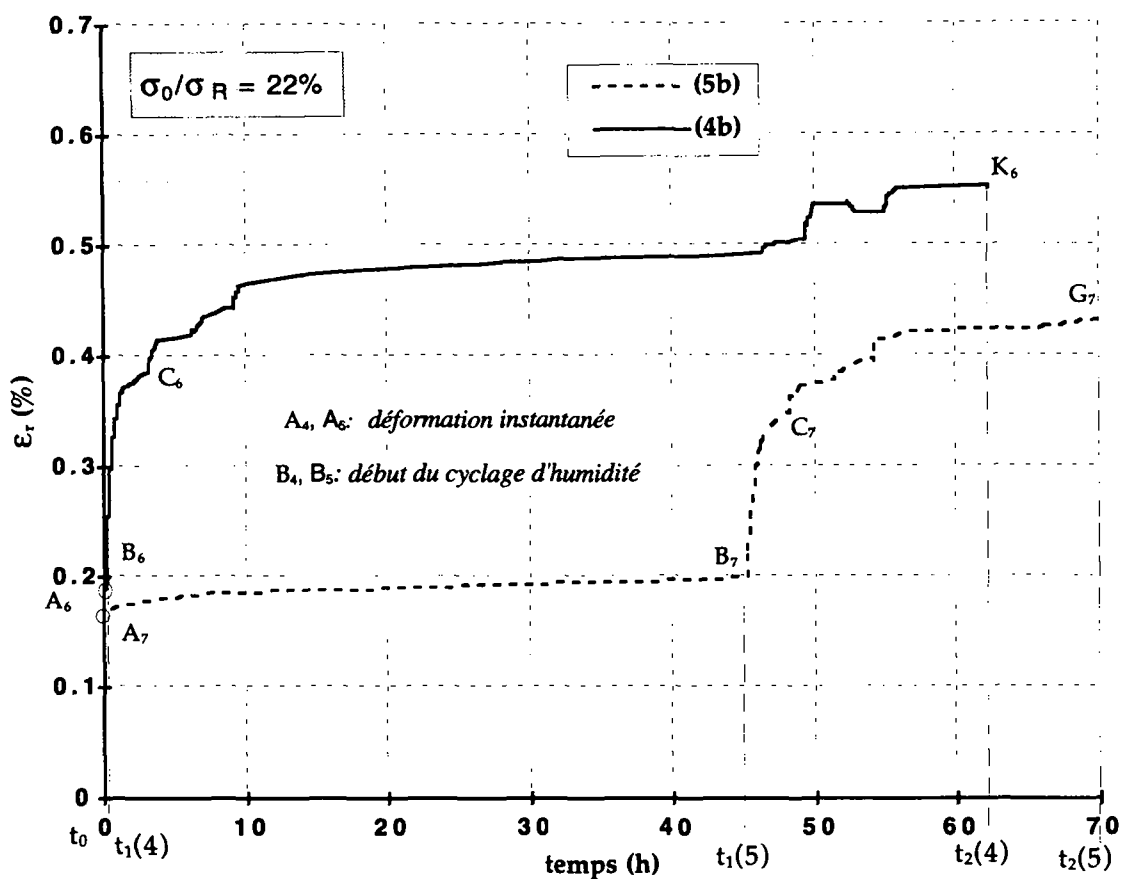


Figure II.7.9. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Comparaison entre les deux essais de fluage avec variations cycliques d'humidité relative réalisés sur des éprouvettes initialement sèches, pour un niveau de force de 22%. Le cyclage hydrique débute après 5 minutes: (4b) et 45 heures: (5b). Les déformations représentées correspondent à ε_r .

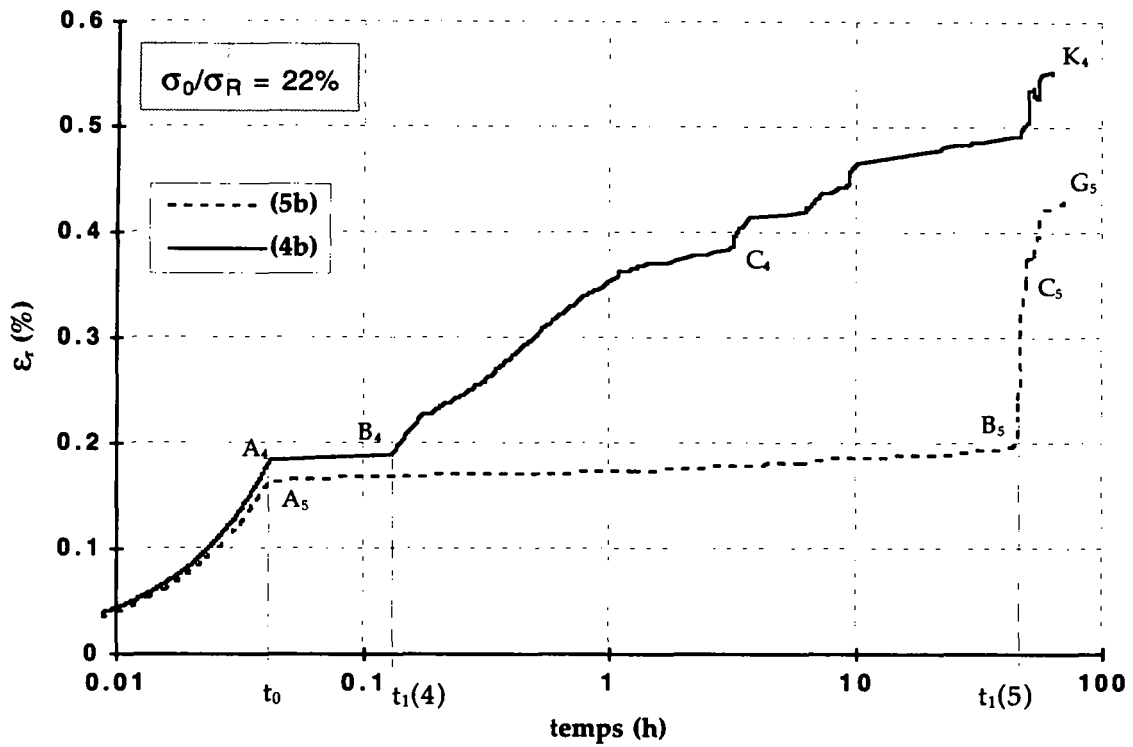


Figure II.7.10. Influence du délai d'application du cyclage d'humidité. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation ε_r lors des 2 essais de fluage avec variations d'humidité en fonction de $\log t$.

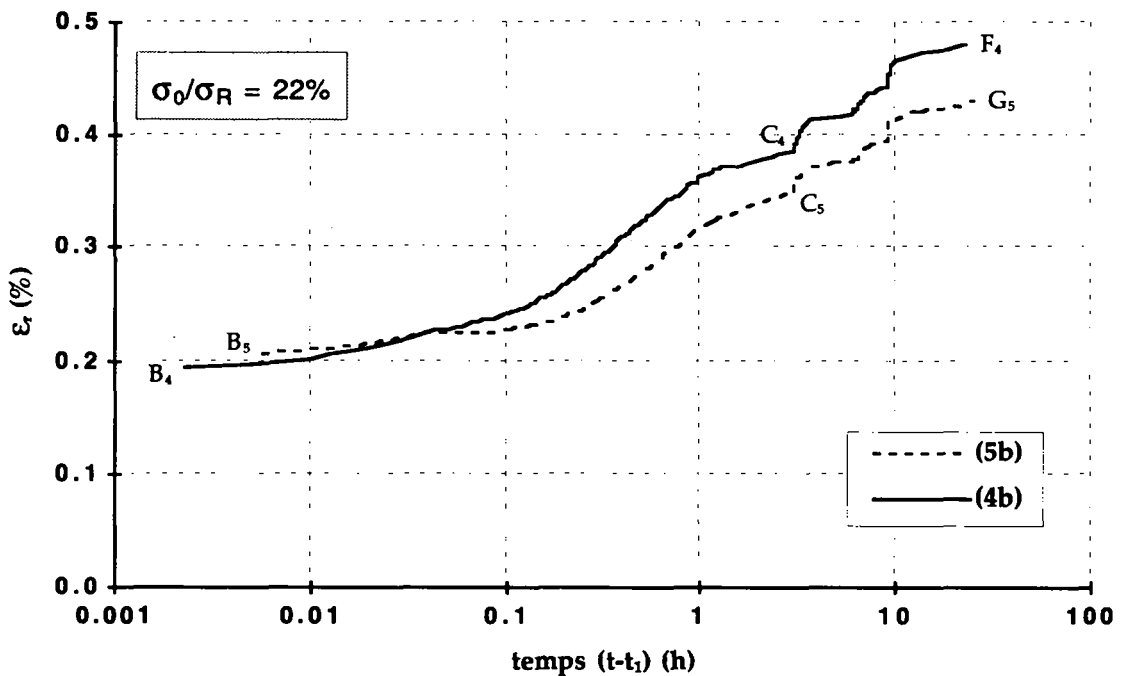


Figure II.7.11. Influence du délai d'application du cyclage d'humidité. Comparaison entre les déformations obtenues à partir du premier changement d'humidité en fonction de $\log (t-t_1)$, t_1 : instant d'application du cyclage d'humidité ($t_1(4) = 5$ minutes et $t_1(5) = 45$ heures)

L'ensemble des résultats obtenus est donné sur les figures II.7.7. à II.7.11.

Les figures II.7.7 et II.7.8 sont relatives à chacun des deux essais pris séparément. Sont donnés sur ces figures:

- ① les programmes de chargement (II.7.7.A) et (II.7.8.A) et de sollicitation hydrique (II.7.7.B) et (II.7.8.B) imposés respectivement à chaque éprouvette;
- ② les résultats des mesures de la déformation ϵ_{tot} - (II.7.7.C), courbe (4a) et (II.7.8.C), courbe (5a) - ainsi que des variations dimensionnelles hydriques ϵ_{hyg} correspondantes - (II.7.7.D), courbe (4c) et (II.7.8.D), courbe (5c);
- ③ le résultat du calcul de la déformation ϵ_r , définie en (II.6.1), respectivement courbes (4b) et (5b).

Les courbes représentées sur la figure II.7.9 correspondent à superposition de la déformation ϵ_r obtenue lors des deux essais. Ces résultats sont ensuite représentés sur un graphique semi-logarithmique, figure II.7.10, pour permettre une meilleure visualisation des instants de mise en route des variations d'humidité sur les deux essais.

Pour pouvoir effectuer une comparaison entre les différentes déformations, à l'endroit où débutent les variations d'humidité (t_1), une translation ($t-t_1$) a été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que ces instants coïncident. Les courbes ainsi obtenues sont données figure II.7.11.

II.7.2.2 DONNÉES COMPARATIVES

Les tableaux II.7.5 et II.7.6 qui suivent contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ϵ_r aux points notés sur les figures II.7.7.C et II.7.8.C, ainsi que les variations de la déformation ϵ_r dans chacun des segments.

notations	ϵ_{A_4}	ϵ_{B_4}	ϵ_{C_4}	ϵ_{D_4}	ϵ_{E_4}	ϵ_{F_4}	ϵ_{G_4}
ϵ_r (%)	0.180	0.189	0.388	0.421	0.444	0.470	0.494
notations	ϵ_{H_4}	ϵ_{I_4}	ϵ_{J_4}	ϵ_{K_4}			
ϵ_r (%)	0.505	0.538	0.529	0.551			

notations	ϵ_{A_5}	ϵ_{B_5}	ϵ_{C_5}	ϵ_{D_5}	ϵ_{E_5}	ϵ_{F_5}	ϵ_{G_5}
ϵ_r (%)	0.165	0.200	0.349	0.377	0.396	0.422	0.432

Tableau II.7.5. Valeurs de déformation ϵ_r correspondant aux points figures II.7.7.C et II.7.8.C.

notations	$\Delta\epsilon_{A_4B_4}$	$\Delta\epsilon_{B_4C_4}$	$\Delta\epsilon_{C_4D_4}$	$\Delta\epsilon_{D_4E_4}$	$\Delta\epsilon_{E_4F_4}$	$\Delta\epsilon_{F_4G_4}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.009	0.199	0.033	0.023	0.026	0.024
notations	$\Delta\epsilon_{G_4H_4}$	$\Delta\epsilon_{H_4I_4}$	$\Delta\epsilon_{I_4J_4}$	$\Delta\epsilon_{J_4K_4}$		
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.011	0.033	-0.009	0.022		

notations	$\Delta\epsilon_{A_5B_5}$	$\Delta\epsilon_{B_5C_5}$	$\Delta\epsilon_{C_5D_5}$	$\Delta\epsilon_{D_5E_5}$	$\Delta\epsilon_{E_5F_5}$	$\Delta\epsilon_{F_5G_5}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.035	0.149	0.028	0.019	0.026	0.010

Tableau II.7.6. Valeurs de déformation ϵ_r correspondant aux segments figures II.7.7.C et II.7.8.C.

II.7.2.3 CONSTATATIONS

Après application de la charge:

- ★ la première absorption entraîne une augmentation de la déformation ϵ_r telle que:
 - ◆ $\epsilon_{rB_4C_4} \approx 1.1\epsilon_{inst}$, dans le cas où elle intervient 5 minutes après application de la charge;
 - ◆ $\epsilon_{rB_5C_5} \approx 0.9\epsilon_{inst}$, dans le cas où elle intervient 45 heures après application de la charge.
- ★ dans le premier essai, l'augmentation de déformation ϵ_r induite par le premier cycle d'humidité (B₄D₄) est telle que $\epsilon_{rB_4D_4} \approx 1.3\epsilon_{inst}$, puis $\epsilon_{rD_4F_4} \approx 0.3\epsilon_{inst}$ après le deuxième cycle (D₄F₄). Les deux cycles d'humidité imposés à partir de $t_{12}(4)$ entraînent une augmentation de la déformation ϵ_r telle que $\epsilon_{rG_4I_4} \approx 0.25\epsilon_{inst}$ puis $\epsilon_{rI_4K_4} \approx 0.25\epsilon_{inst}$.
- ★ dans le deuxième essai, l'augmentation de déformation ϵ_r induite par le premier cycle d'humidité (B₅D₅) est telle que $\epsilon_{rB_5D_5} \approx 1.1\epsilon_{inst}$, puis $\epsilon_{rD_5F_5} \approx 0.3\epsilon_{inst}$ après le deuxième cycle (D₅F₅).

II.7.3 ESSAIS DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT SÈCHES AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE DÉBUTANT APRÈS 7 MINUTES ET 45 HEURES (NIVEAU DE CHARGE DE 35%).

II.7.3.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Le troisième groupe d'essais a été effectué sur 2 éprouvettes initialement stabilisées à une humidité relative atmosphérique de 30%, sélectionnées dans une même série. Les étapes du déroulement des deux essais sont décrites sur le schéma II.7.3. La première étape est similaire dans les 2 cas. La différence au niveau du délai de mise en route des cycles d'humidité relative sous charge est donnée, pour chaque éprouvette, dans le descriptif de la seconde étape.

Première partie de l'essai:

Chaque éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une charge constante et nulle.

- Un niveau constant de 30% d'humidité relative atmosphérique est fixé pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la déformation est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 30% et 75%. Les variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.
- Un niveau constant de 30% d'humidité relative est à nouveau fixé durant la dernière période de 12 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la déformation avant application du programme de chargement.

Deuxième partie de l'essai:

- Une charge correspondant à environ 35% de la contrainte de rupture σ_{R30} est appliquée à chaque éprouvette aux instants respectifs $t_0(6)$ et $t_0(7)$.
- Le fluage à humidité constante - ε_{visc} - est mesuré jusqu'à l'instant $t_1(6)$ - respectivement $t_1(7)$ - pendant la durée $\Delta t_1(6)$ - respectivement $\Delta t_1(7)$.
- Deux cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à chaque éprouvette, selon les figures II.7.12.B et II.7.13.B. La mise en route des cycles d'humidité intervient après $t_1(6) = 7 \text{ minutes}$ pour la première éprouvette et

$t_1(7) = 45$ heures pour la deuxième. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée jusqu'à l'instant $t_2(6)$ - respectivement $t_2(7)$ - pendant la durée $\Delta t_2(6)$ - respectivement $\Delta t_2(7)$.

- A l'instant $t_2(6)$ - respectivement $t_2(7)$, l'éprouvette est totalement déchargée.

L'ensemble des résultats obtenus est donné sur les figures II.7.12. à II.7.16.

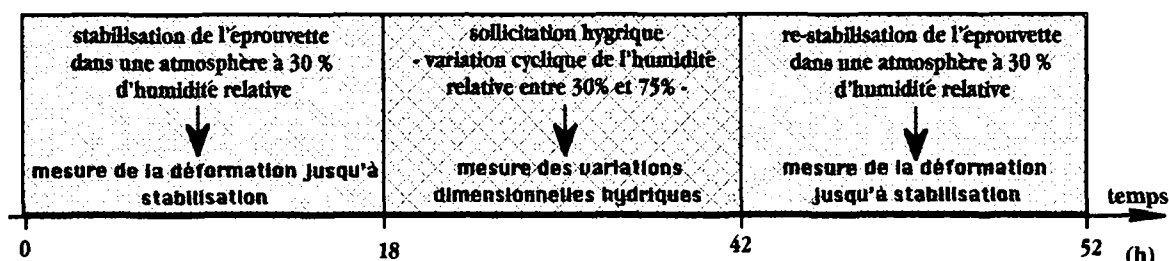
Les figures II.7.12 et II.7.13 sont relatives à chacun des deux essais pris séparément. Sont donnés sur ces figures:

- ❶ les programmes de chargement (II.7.12.A) et (II.7.13.A) et de sollicitation hydrique (II.7.12.B) et (II.7.13.B) imposés respectivement à chaque éprouvette;
- ❷ les résultats des mesures de la déformation ε_{tot} - (II.7.12.C), courbe (6a) et (II.7.13.C), courbe (7a) - ainsi que des variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} correspondantes - (II.7.12.D), courbe (6c) et (II.7.13.D), courbe (7c);
- ❸ le résultat du calcul de la déformation ε_r , définie en (II.6.1), respectivement courbe (6b) et (7b).

Les courbes représentées sur la figure II.7.14 correspondent à la déformation ε_r obtenue lors des deux essais. Ces résultats sont ensuite représentés, comme précédemment, sur un graphique semi-logarithmique, figure II.7.15. Pour permettre la comparaison entre les différentes déformations, à l'endroit où débutent les variations d'humidité (t_1), une translation ($t-t_1$) a été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que ces instants coïncident. Les courbes ainsi obtenues sont données Figure II.7.16.

PREMIERE PARTIE DE L'ESSAI

mesure des variations dimensionnelles



DEUXIEME PARTIE DE L'ESSAI

application d'une sollicitation mécanique

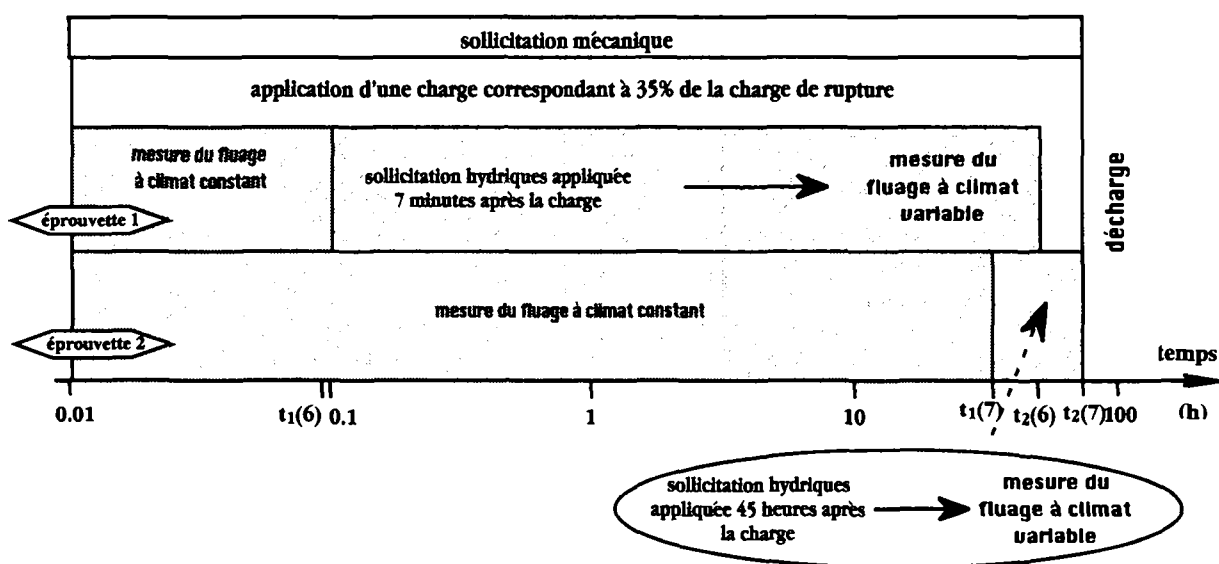


Schéma II.7.3. Étapes de déroulement des essais de fluage-recouvrance avec variations hydriques effectués sur 2 éprouvettes initialement sèches, dont les résultats sont donnés sur les figures II.7.12 à II.7.16.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	$t_0(6)$	$\Delta t_1(6)$	$t_1(6)$	$\Delta t_2(6)$	$t_2(6)$
temps (h)	0	0.1111	0.1111	12.9	13
notations	$t_0(7)$	$\Delta t_1(7)$	$t_1(7)$	$\Delta t_2(7)$	$t_2(7)$
temps (h)	0	45	45	13	58

Tableau II.7.7. Notations en correspondance avec les essais décrits sur le schéma II.7.3.

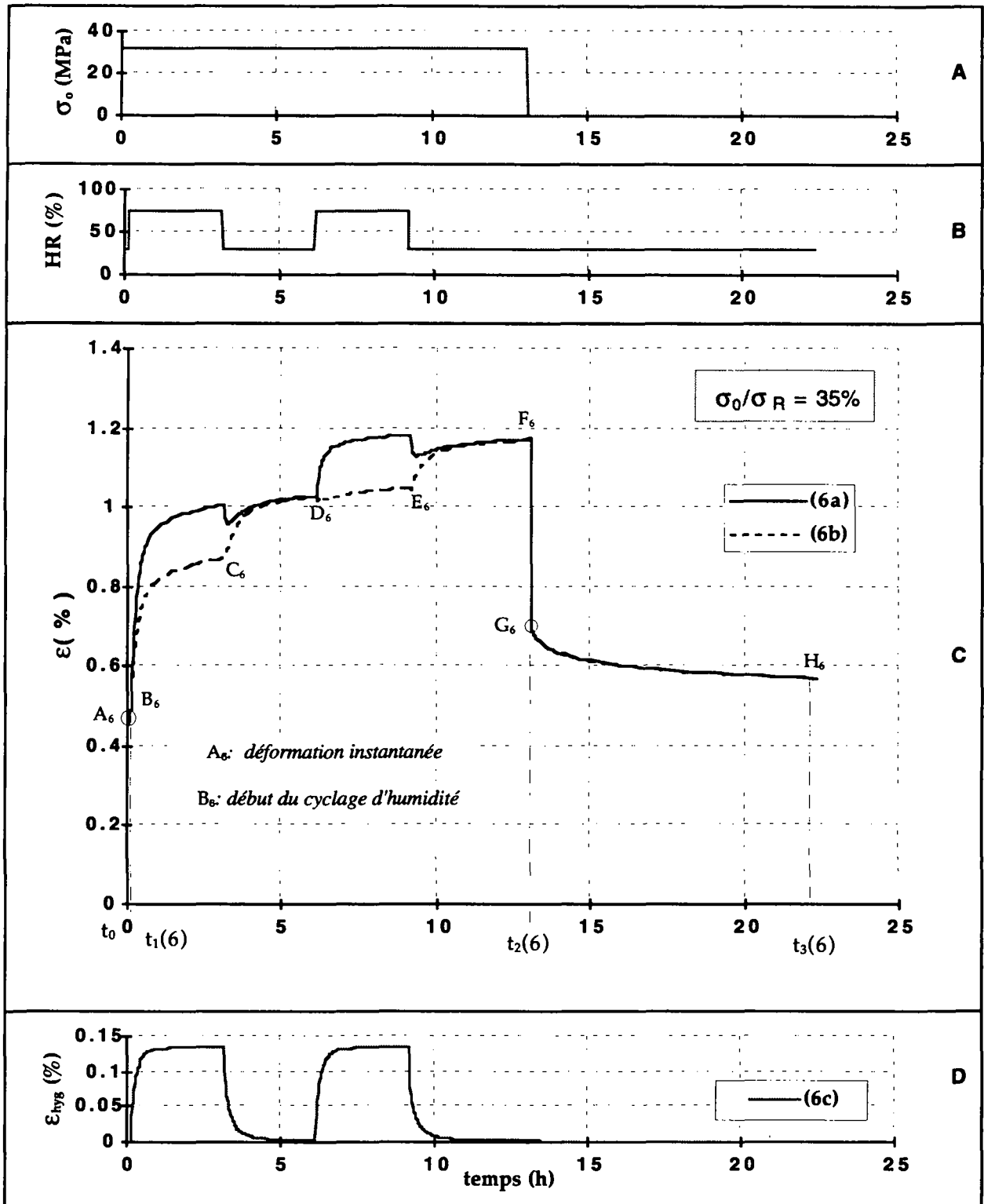


Figure II.7.12. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Premier essai de fluage-recouvrance sur éprouvette initialement sèche. Les variations d'humidité débutent après 7 minutes. Le niveau de force appliquée correspond à environ 22% de la force de rupture. A: programme de chargement; B: programme de sollicitation hydrique; C: déformations ϵ_{tot} (6a) et ϵ_r (6b); D: déformation ϵ_{hyg} : (6c).

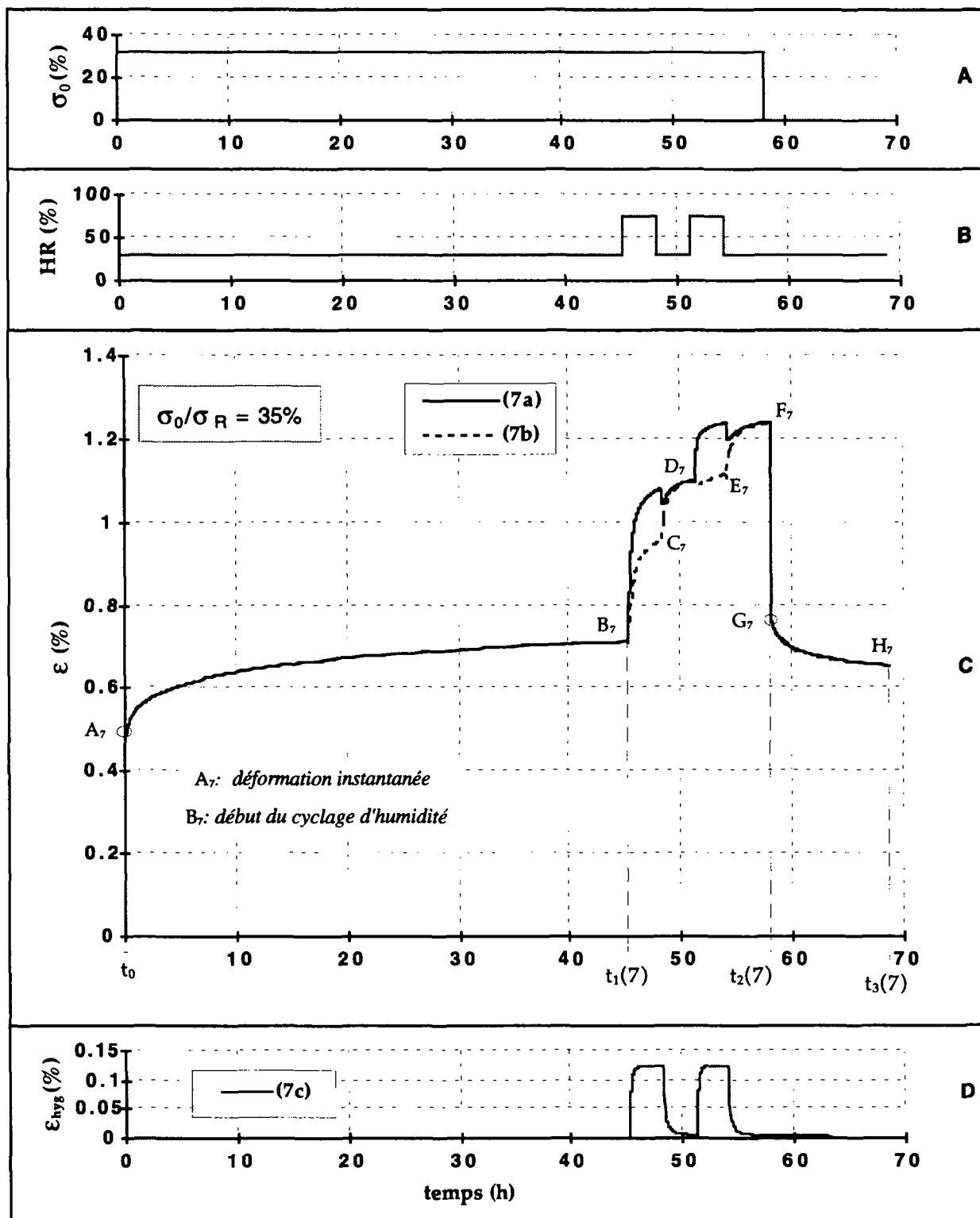


Figure II.7.13. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Deuxième essai de fluage-recouvrance sur éprouvette initialement sèche. Les variations d'humidité débutent après 45 heures. Le niveau de force appliquée correspond à environ 22% de la force de rupture. A: programme de chargement; B: programme de sollicitation hydrique; C: déformations ϵ_{tot} (7a) et ϵ_r (7b); D: déformation ϵ_{hyg} : (7c).

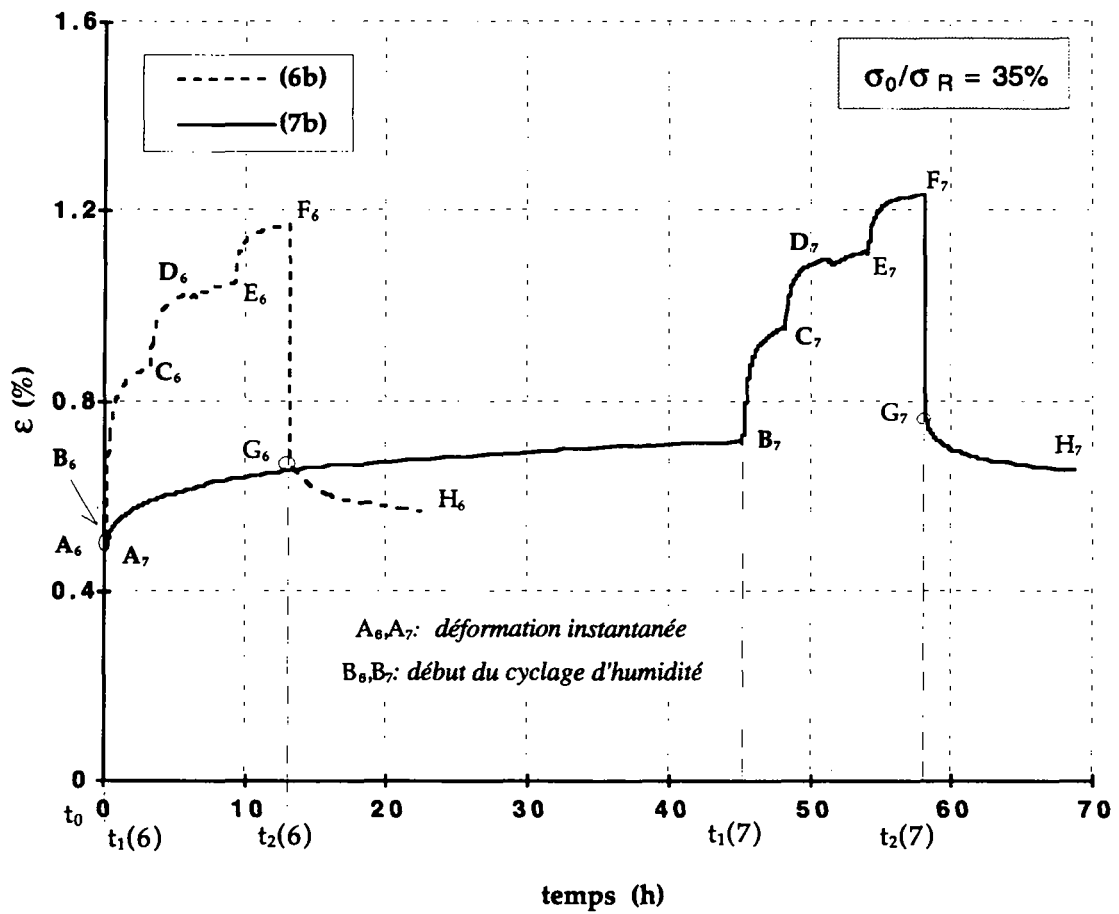


Figure II.7.14. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Comparaison entre les deux essais de fluage-recouvrance avec variations cycliques d'humidité relative réalisés sur des éprouvettes initialement sèches, pour un niveau de force de 35% (échelle de temps linéaire). Le cyclage hydrique débute après 7 minutes (6b) et 45 heures (7b). Les déformations représentées correspondent à ϵ_r .

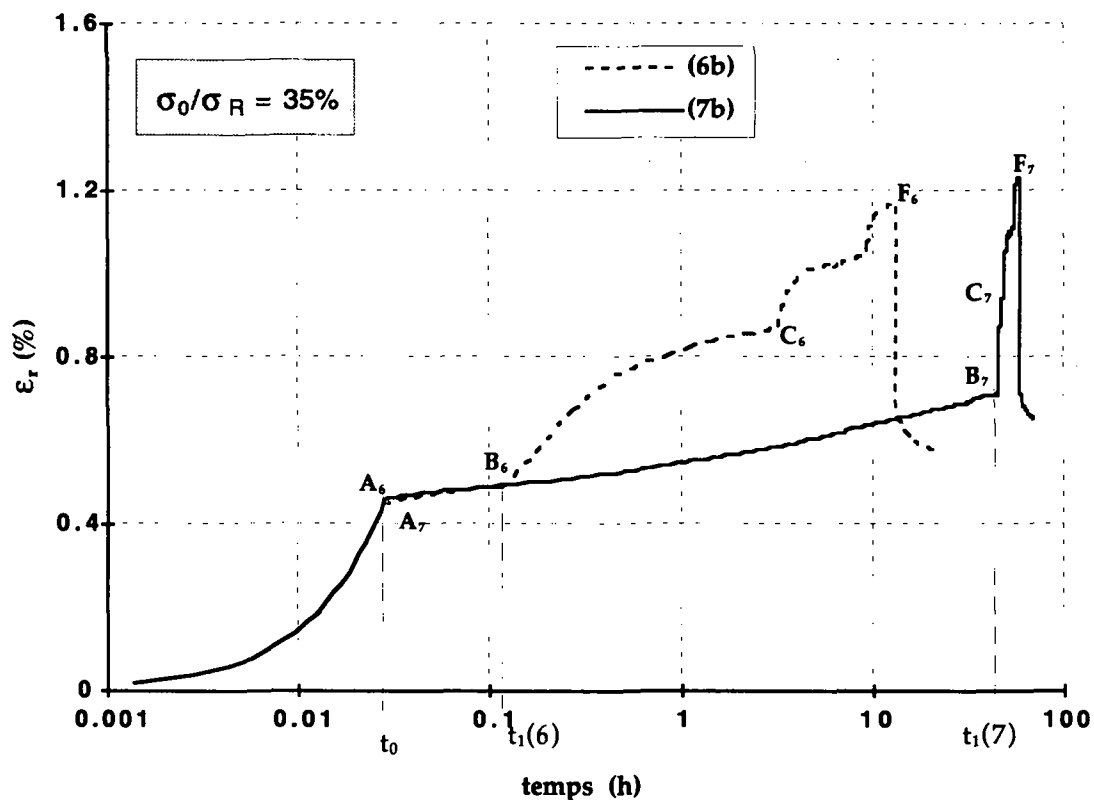


Figure II.7.15. Influence du délai d'application du cyclage d'humidité. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation ϵ_r lors des 2 essais de fluage-recouvrance avec variations d'humidité en fonction de $\log t$.

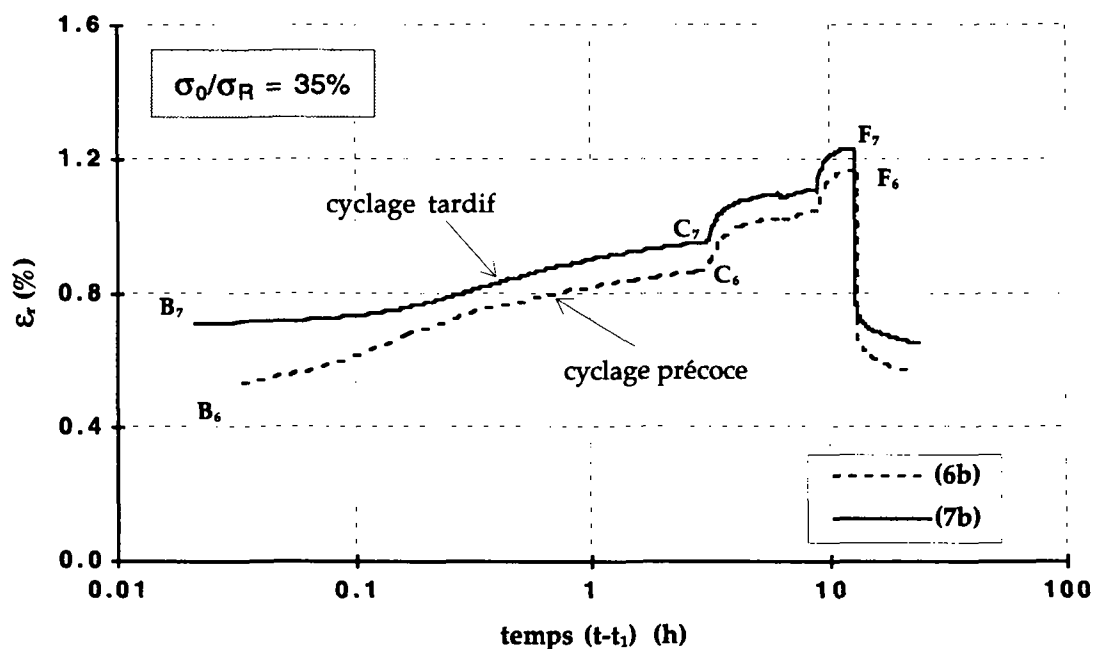


Figure II.7.16. Influence du délai d'application du cyclage d'humidité. Comparaison entre les déformations obtenues à partir du premier changement d'humidité en fonction de $\log (t-t_1)$, t_1 : instant d'application du cyclage d'humidité ($t_1(6) = 7$ minutes et $t_1(7) = 45$ heures).

II.7.3.2 DONNÉES COMPARATIVES

Les tableaux II.7.8 et II.7.9 qui suivent contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ε_r aux points notés A_i à H_i sur les figures II.7.12.C et II.7.13.C, ainsi que les variations de la déformation ε_r dans chacun des segments A_iB_i à G_iH_i .

notations	ε_{A_6}	ε_{B_6}	ε_{C_6}	ε_{D_6}	ε_{E_6}	ε_{F_6}	ε_{G_6}	ε_{H_6}
ε_r (%)	0.452	0.491	0.872	1.027	1.047	1.172	0.707	0.571

notations	ε_{A_7}	ε_{B_7}	ε_{C_7}	ε_{D_7}	ε_{E_7}	ε_{F_7}	ε_{G_7}	ε_{H_7}
ε_r (%)	0.460	0.715	0.951	1.100	1.114	1.235	0.789	0.655

Tableau II.7.8. Valeurs de déformation ε_r correspondant aux points A_i à H_i , figure II.7.14.C.

notations	$\Delta\varepsilon_{A_6B_6}$	$\Delta\varepsilon_{B_6C_6}$	$\Delta\varepsilon_{C_6D_6}$	$\Delta\varepsilon_{D_6E_6}$	$\Delta\varepsilon_{E_6F_6}$	$\Delta\varepsilon_{F_6G_6}$	$\Delta\varepsilon_{G_6H_6}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	0.039	0.381	0.155	0.020	0.125	-0.465	-0.136

notations	$\Delta\varepsilon_{A_7B_7}$	$\Delta\varepsilon_{B_7C_7}$	$\Delta\varepsilon_{C_7D_7}$	$\Delta\varepsilon_{D_7E_7}$	$\Delta\varepsilon_{E_7F_7}$	$\Delta\varepsilon_{F_7G_7}$	$\Delta\varepsilon_{G_7H_7}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	0.255	0.236	0.149	0.014	0.121	-0.446	-0.134

Tableau II.7.9 Valeurs de déformation ε_r correspondant aux segments A_iB_i à G_iH_i , figure II.7.14.C.

II.7.3.3 CONSTATATIONS

Après application de la charge:

- ★ la première absorption entraîne une augmentation de la déformation ε_r , telle que:
 - ◆ $\varepsilon_{rB_6C_6} \approx 0.85 \varepsilon_{inst}$, dans le cas où elle intervient 7 minutes après application de la charge;
 - ◆ $\varepsilon_{rB_7C_7} \approx 0.50 \varepsilon_{inst}$, dans le cas où elle intervient 45 heures après application de la charge.
- ★ dans le premier essai, l'augmentation de déformation ε_r induite par le premier cycle d'humidité (B_6D_6) est telle que $\varepsilon_{rB_6D_6} \approx 1.2 \varepsilon_{inst}$, puis $\varepsilon_{rD_6F_6} \approx 0.32 \varepsilon_{inst}$ après le deuxième cycle (D_6F_6).

- ★ dans le deuxième essai, l'augmentation de déformation ε_r induite par le premier cycle d'humidité (B7D7) est telle que $\varepsilon_{rB7D7} \approx 0.85\varepsilon_{inst}$, puis $\varepsilon_{rD7F7} \approx 0.30\varepsilon_{inst}$ après le deuxième cycle (D7F7).

Après suppression de la charge:

Les valeurs de recouvrance instantanée sont proches des valeurs de déformation instantanée initiale mesurées à la charge, dans chacun des trois cas, comme on peut l'observer en comparant les déformations ε_{A_i} et $|\Delta\varepsilon_{F_iG_i}|$.

II.7.4 ESSAIS DE FLUAGE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT HUMIDES AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE DÉBUTANT APRÈS 20 MINUTES ET 64 HEURES (NIVEAU DE CHARGE DE 20%).

II.7.4.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Le quatrième groupe d'essais a été effectué sur deux éprouvettes initialement humides provenant de la même série de coupe. Les étapes du déroulement des deux essais sont décrites sur le schéma II.7.4. Comme précédemment, la première étape est identique dans les deux cas, seule change la seconde étape, au niveau du délai de mise en route du cyclage hydrique.

Première partie de l'essai:

L'éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une charge constante et nulle.

- Un niveau constant de 75% d'humidité relative atmosphérique est fixé pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la déformation est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 75% et 30%. Les variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.

- Un niveau constant de 75% d'humidité relative est à nouveau fixé durant la dernière période de 12 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la déformation avant application du programme de chargement.

Deuxième partie de l'essai:

- Une charge correspondant à environ 20% de la contrainte de rupture σ_{R75} est appliquée à chaque éprouvette aux instants respectifs $t_0(8)$ et $t_0(9)$.
- Le fluage à humidité constante - ε_{visc} - est mesuré jusqu'à l'instant $t_1(8)$ - respectivement $t_1(9)$ - pendant la durée $\Delta t_1(8)$ - respectivement $\Delta t_1(9)$.
- Trois cycles de variation d'humidité relative entre 75% et 30% sont ensuite imposés à chaque éprouvette, selon les figures II.7.17.B et II.7.19.B. La mise en route des cycles d'humidité intervient après $t_1(8) = 20 \text{ minutes}$ pour la première éprouvette et $t_1(9) = 64 \text{ heures}$ pour la deuxième. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée jusqu'à l'instant $t_2(8)$ - respectivement $t_2(9)$ - pendant la durée $\Delta t_2(8)$ - respectivement $\Delta t_2(9)$.

L'ensemble des résultats obtenus est donné sur les figures II.7.17. à II.7.22.

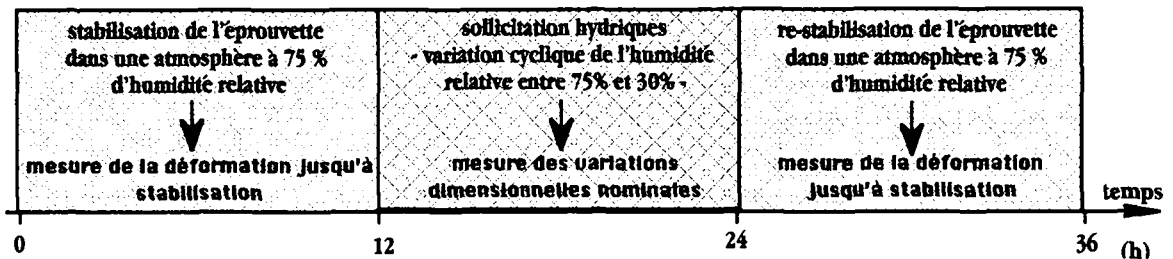
Les figures II.7.17 et II.7.18 sont relatives à chacun des trois essais pris séparément. Sont donnés sur ces figures:

- ❶ les programmes de chargement (II.7.17.A) et (II.7.18.A) et de sollicitation hydrique (II.7.17.B) et (II.7.18.B) imposés respectivement à chaque éprouvette;
- ❷ les résultats des mesures de la déformation ε_{tot} - (II.7.17.C), courbe (8a) et (II.7.18.C), courbe (9a) - ainsi que des variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} correspondantes - (II.7.17.D), courbe (8c) et (II.7.18.D), courbe (9c);
- ❸ le résultat du calcul de la déformation ε_r , définie en (II.6.1), respectivement courbes (8b) et (9b).

Les courbes représentées sur la figure II.7.19 correspondent à la déformation ε_r obtenue lors des trois essais. Ces résultats sont ensuite représentés sur un graphique semi-logarithmique, figure II.7.20. Pour pouvoir effectuer une comparaison entre les différentes déformations, à l'endroit où débutent les variations d'humidité (t_1), une translation ($t-t_1$) a été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que ces instants coïncident. Les courbes ainsi obtenues sont données Figure II.7.21.

PREMIÈRE PARTIE DE L'ESSAI

mesure des variations dimensionnelles



DEUXIÈME PARTIE DE L'ESSAI

application d'une sollicitation mécanique

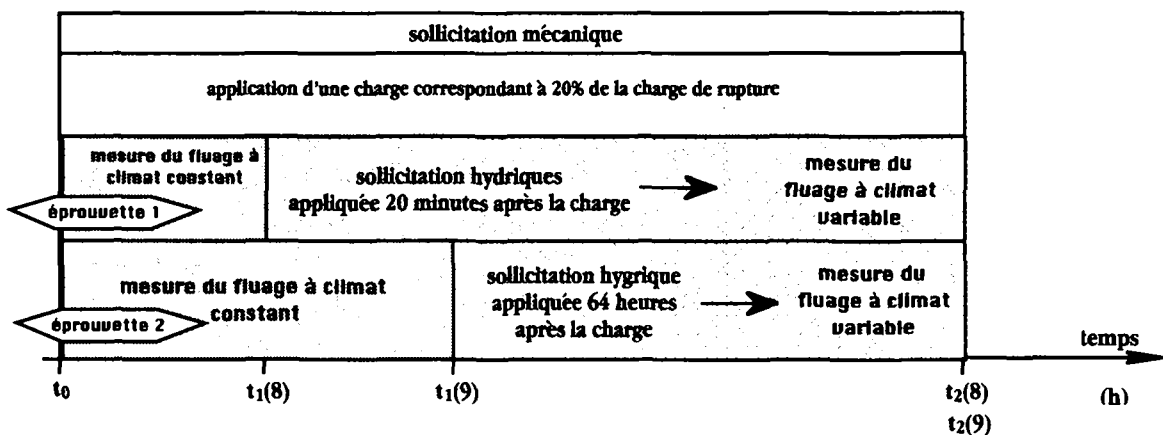


Schéma II.7.4. Étapes de déroulement des essais de fluage-recouvrance avec variations hydriques effectués sur 2 éprouvettes initialement humides, dont les résultats sont donnés sur les figures II.7.17. à II.7.22.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	$t_0(8)$	$\Delta t_1(8)$	$t_1(8)$	$\Delta t_2(8)$	$t_2(8)$
temps (h)	0	0.36	0.36	17	17.36
notations	$t_0(9)$	$\Delta t_1(9)$	$t_1(9)$	$\Delta t_2(9)$	$t_2(9)$
temps (h)	0	64	64	17	81

Tableau II.7.10. Notations en correspondance avec l'essai décrit sur le schéma II.7.4.

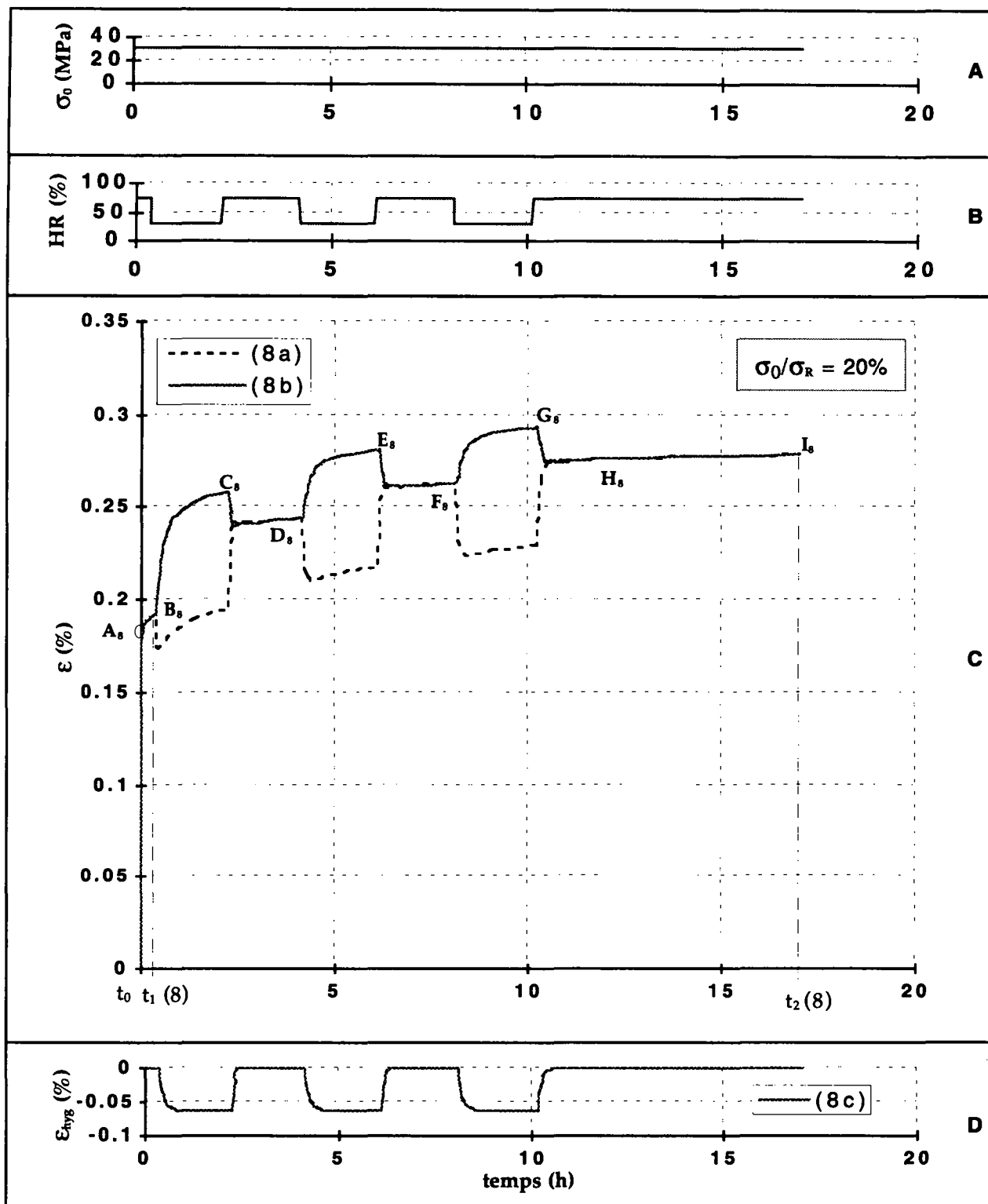


Figure II.7.17. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Premier essai de fluage-recouvrance sur éprouvette initialement humide. Les variations d'humidité débutent après 20 minutes. Le niveau de force appliquée de 20% environ de la force de rupture. **A:** programme de chargement; **B:** programme de sollicitation hydrique; **C:** déformations ϵ_{tot} (8a) et ϵ_r (8b); **D:** déformation ϵ_{hyg} (8c).

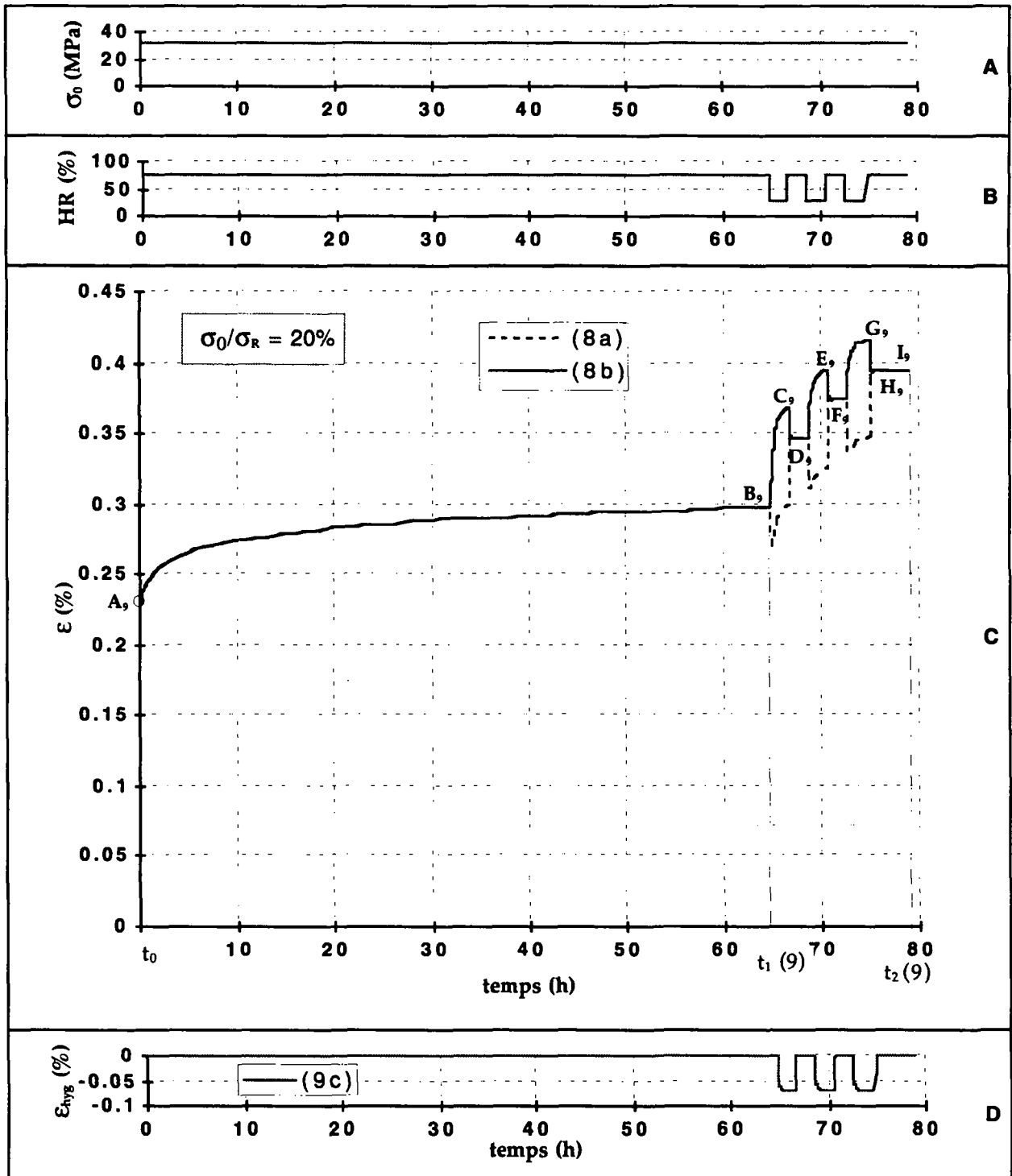


Figure II.7.18. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Deuxième essai de fluage-recouvrance sur éprouvette initialement humide. Les variations d'humidité débutent après 64 heures. Le niveau de force appliquée de 20% environ de la force de rupture. A: programme de chargement; B: programme de sollicitation hydrique; C: déformations ϵ_{tot} (9a) et ϵ_r (9b); D: déformation ϵ_{hyg} (9c).

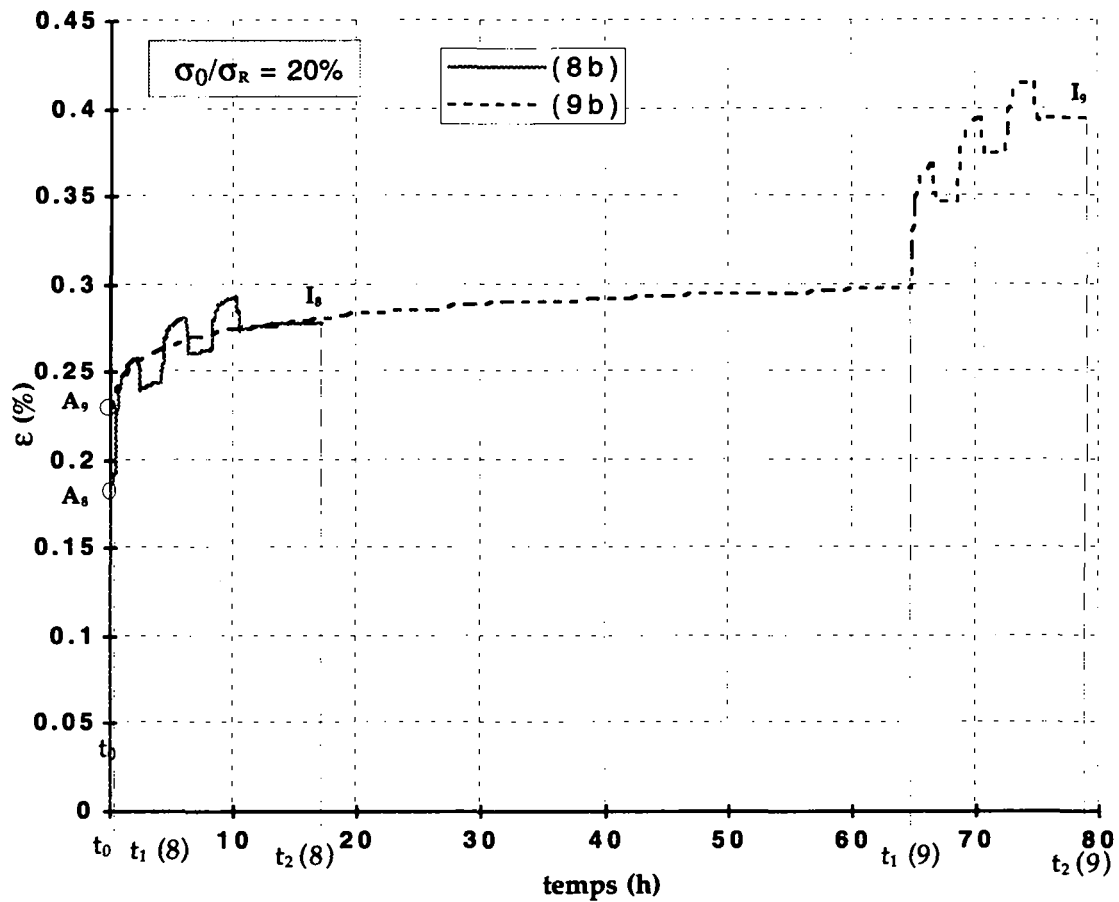


Figure II.7.19. Influence du délai d'application du cyclage hydrique. Comparaison entre les deux essais de fluage-recouvrance avec variations cycliques d'humidité relative réalisés sur des éprouvettes initialement humides, pour un niveau de force de 20% (échelle de temps linéaire). Le cyclage hydrique débute après 20 minutes: (8b) et 64 heures: (9b). Les déformations représentées correspondent à ϵ_r .

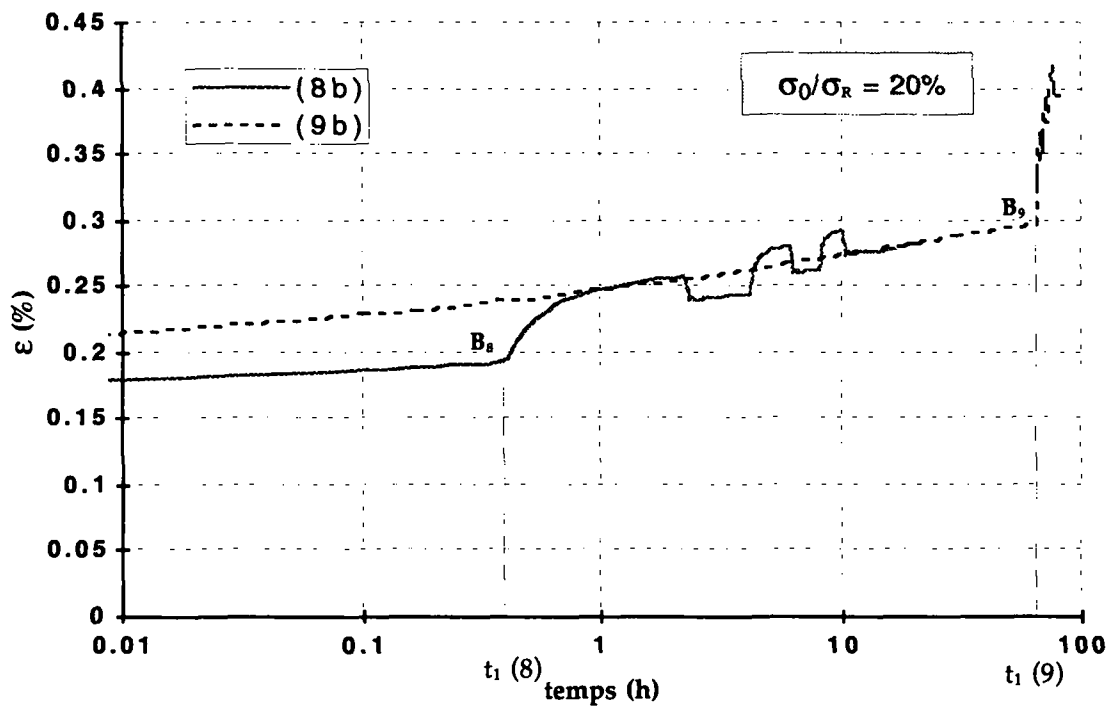


Figure II.7.20. Influence du délai d'application du cyclage d'humidité. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation ϵ_r lors des 2 essais de fluage-recouvrance avec variations d'humidité en fonction de $\log t$.

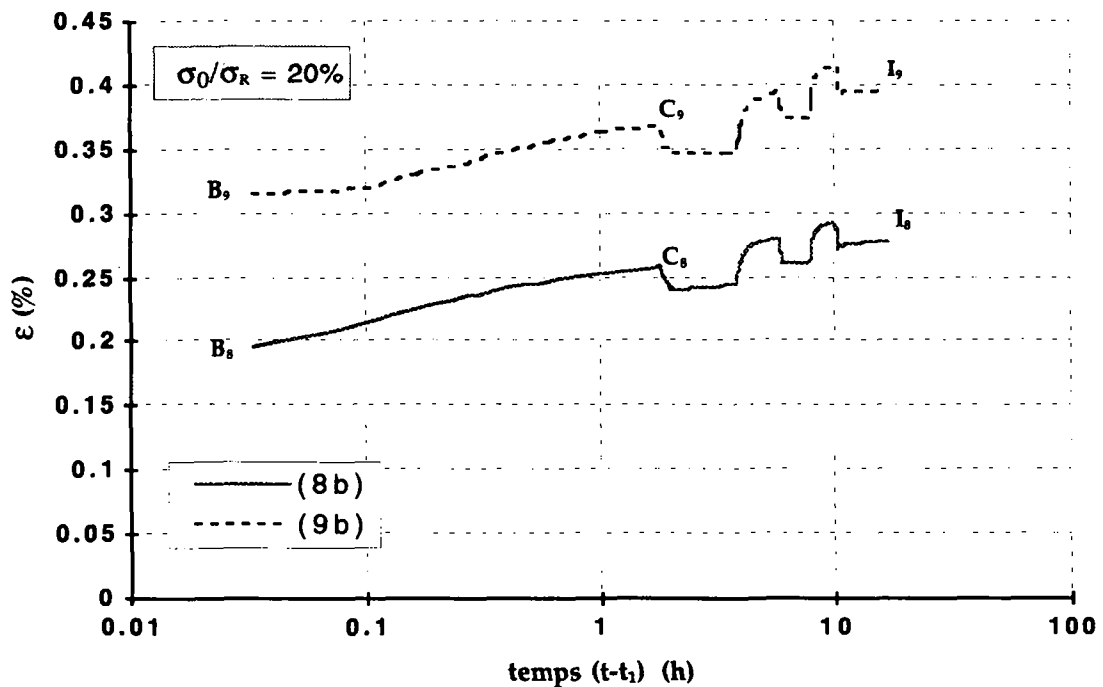


Figure II.7.21 Influence du délai d'application du cyclage d'humidité. Comparaison entre les déformations obtenues à partir du premier changement d'humidité en fonction de $\log (t-t_1)$, t_1 : instant d'application du cyclage d'humidité ($t_1(8) = 20$ minutes et $t_1(9) = 64$ heures).

II.7.4.2 DONNÉES COMPARATIVES

Les valeurs de la déformation ε_r , relatives à la figure II.7.17 sont données dans les tableaux II.6.2 et II.6.3 du paragraphe II.6.1.2.

Les tableaux II.7.11 et II.7.12 contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ε_r , aux points notés A₉ à B₉ sur la figure II.7.18.C, ainsi que les variations de la déformation ε_r , dans chacun des segments A₉B₉ à H₉I₉.

notations	ε_{A_9}	ε_{B_9}	ε_{C_9}	ε_{D_9}	ε_{E_9}	ε_{F_9}	ε_{G_9}	ε_{H_9}	ε_{I_9}
valeur mesurée (%)	0.213	0.298	0.369	0.347	0.395	0.375	0.417	0.395	0.183

Tableau II.7.11. Valeurs de déformation correspondant aux points A₉ à B₉, figure II.7.18.C.

notations	$\Delta\varepsilon_{A_9B_9}$	$\Delta\varepsilon_{B_9C_9}$	$\Delta\varepsilon_{C_9D_9}$	$\Delta\varepsilon_{D_9E_9}$
valeur calculée (%)	0.085	0.071	-0.022	0.048
notations	$\Delta\varepsilon_{E_9F_9}$	$\Delta\varepsilon_{F_9G_9}$	$\Delta\varepsilon_{G_9H_9}$	$\Delta\varepsilon_{H_9I_9}$
valeur calculée (%)	-0.020	0.042	-0.022	-0.212

Tableau II.7.12 Valeurs de déformation correspondant aux segments A₉B₉ à H₉I₉, figure II.7.18.C.

II.7.4.3 CONSTATATIONS

Après application de la charge:

- ★ la première désorption entraîne une augmentation de la déformation ε_r , de:
 - ◆ $\varepsilon_{rB_8C_8} \approx 0.37 \varepsilon_{inst}$, dans le cas où elle intervient 20 minutes après application de la charge;
 - ◆ $\varepsilon_{rB_9C_9} \approx 0.33 \varepsilon_{inst}$, dans le cas où elle intervient 64 heures après application de la charge.
- ★ dans le premier essai, l'augmentation de déformation ε_r , induite par le premier cycle d'humidité (B₈D₈) est telle que $\varepsilon_{rB_8D_8} \approx 0.30 \varepsilon_{inst}$, $\varepsilon_{rD_8F_8} \approx 0.10 \varepsilon_{inst}$ après le deuxième cycle (D₈F₈) et $\varepsilon_{rF_8H_8} \approx 0.08 \varepsilon_{inst}$ après le troisième cycle (F₈H₈).
- ★ dans le deuxième essai, l'augmentation de déformation ε_r , induite par le premier cycle d'humidité (B₉D₉) est telle que $\varepsilon_{rB_9D_9} \approx 0.25 \varepsilon_{inst}$, $\varepsilon_{rD_9F_9} \approx 0.13 \varepsilon_{inst}$ après le deuxième cycle (D₉F₉) et $\varepsilon_{rF_9H_9} \approx 0.10 \varepsilon_{inst}$ après le troisième cycle (F₉H₉).

II.7.5 CONCLUSION

On a pu constater, en ce qui concerne la déformation ε_r , après observation des résultats obtenus sur les 4 séries d'essais, que:

- ★ lorsque la charge est appliquée sur une éprouvette initialement sèche:
 - ◆ la **première absorption** entraîne une augmentation de déformation d'amplitude importante
 - que celle-ci intervienne 60 secondes (B₁C₁) ou 3 heures (B₃C₃) après la mise en charge, pour la figure II.7.5;
 - que celle-ci intervienne 1 minute (B₄C₄) ou 45 heures (B₅C₅) après la mise en charge, pour la figure II.7.10;
 - que celle-ci intervienne 5 minutes (B₆C₆) ou 48 heures (B₇C₇) après la mise en charge, pour la figure II.7.15;
 - ◆ L'**amplitude de l'augmentation de déformation induite par la première absorption diminue légèrement avec l'augmentation de son délai de mise en route**;
 - ◆ lors des changements d'humidité suivants, par contre, ***l'allure globale des courbes obtenues est quasiment similaire***:
 - segments C₁D₁ à E₁F₁, C₂D₂ à E₂F₂, C₃D₃ à E₃F₃ des courbes (1b), (2b) et (3b) de la première série d'essais, figure II.7.6;
 - segments C₄D₄ à E₄F₄ et C₅D₅ à E₅F₅, des courbes (4b) et (5b) de la deuxième série d'essai, figure II.7.11;
 - segments C₆D₆ à E₆F₆ et C₇D₇ à E₇F₇, des courbes (6b) et (7b) de la troisième série d'essai, figure II.7.16;
 - ◆ on peut voir, de plus, sur la figure II.7.7.C, que les deux cycles supplémentaires de variations hydriques appliqués à l'éprouvette entraînent des variations de la déformation (G₄ à K₄) qui semblent être une suite des oscillations qui s'installent dès le cycle D₄F₄. Il n'y a pas d'augmentation importante de la déformation lors de l'absorption G₄H₄.

- ★ lorsque la charge est appliquée sur une éprouvette initialement humide:
 - la première désorption entraîne une augmentation de la déformation dont l'amplitude diminue légèrement avec l'augmentation de son délai de mise en route: B₉C₉ par rapport à B₈C₈, sur la figure II.7.20;
 - **l'augmentation de déformation induite par le premier cycle d'humidité n'est pas d'amplitude beaucoup plus importante que celle induite lors des cycles suivants;**
 - lors des variations d'humidité relative ultérieures, **l'allure globale des courbes obtenues est quasiment similaire:** segments C₈D₈ à H₈I₈ et C₉D₉ à H₉I₉, figure II.7.21.

Dans l'ensemble des résultats obtenus, il apparaît donc que le **délai de mise en route du cyclage hydrique - et donc la période pendant laquelle la contrainte est maintenue à une valeur constante - n'a d'influence sur la déformation ϵ_r qu'au niveau du premier changement d'humidité**, que celui-ci soit une absorption ou une désorption. Cette influence n'est pas significative.

CHAPITRE II.8

CLIMAT VARIABLE ET CHARGEMENTS VARIABLES COMBINÉS : INFLUENCE DES CYCLES D'HUMIDITÉ SUR LA RÉPONSE SOUS CYCLES DE CHARGE

Des essais consistant en des cycles de charge-décharge avec variation d'humidité relative entre deux paliers ont été réalisés pour deux niveaux de charge de 12% et 22% sur des éprouvettes initialement sèches sélectionnées dans une même série de coupe. Le détail des étapes des deux essais ainsi les résultats obtenus sont donnés ci-après.

II.8.1 CYCLES DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT SÈCHES AVEC CYCLES DE VARIATIONS D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR UN NIVEAU DE CHARGE DE 12%.

II.8.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

L'essai comporte trois étapes de charge et décharge avec ou sans variations cycliques d'humidité relative. Elles sont décrites sur le schéma II.8.1. Le détail de ces étapes est donné ci-dessous.

Première partie de l'essai:

L'éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une charge constante et nulle.

- Un niveau constant de 30% d'humidité relative atmosphérique est fixé pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la déformation est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 30% et 75%. Les variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.
- Un niveau constant de 30% d'humidité relative est à nouveau fixé durant la dernière période de 12 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la déformation avant application du programme de chargement.

Deuxième partie de l'essai:

Première étape de charge-décharge:

- A l'instant $t_0(12\%)$ l'éprouvette est chargée à 12% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Le fluage à humidité constante - ϵ_{visc} - est mesuré jusqu'à l'instant $t_1(12\%)$ pendant la durée $\Delta t_1(12\%)$. Six cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants $t_1(12\%)$ et $t_2(12\%)$, selon la figure II.8.1.B. La réponse différée sous climat variable ϵ_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_2(12\%)$.
- A l'instant $t_2(12\%)$, l'éprouvette est totalement déchargée. La recouvrance, pour un niveau d'humidité relative constant de 30%, est mesurée jusqu'à l'instant $t_3(12\%)$ pendant la durée $\Delta t_3(12\%)$.

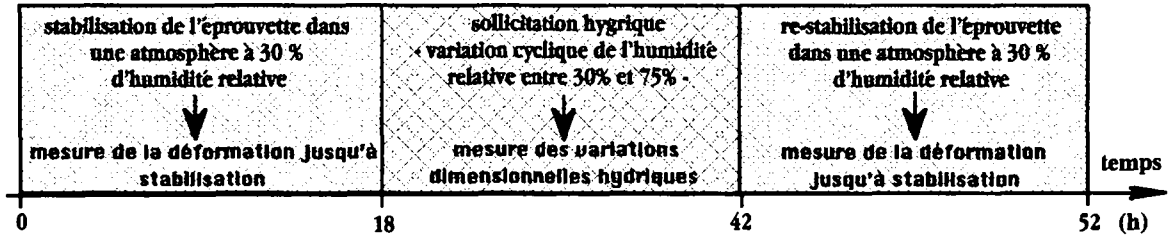
Deuxième étape de charge-décharge:

- A l'instant $t_3(12\%)$, l'éprouvette est à nouveau chargée à 12% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont imposés à l'éprouvette, selon la figure II.8.1.B, entre les instants $t_4(12\%)$ et $t_5(12\%)$, pendant la durée $\Delta t_5(12\%)$.
- A l'instant $t_5(12\%)$, l'éprouvette est totalement déchargée. La recouvrance sans variation d'humidité relative - niveau constant de 30% - est mesurée jusqu'à l'instant $t_6(12\%)$ pendant la durée $\Delta t_6(12\%)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants $t_6(12\%)$ et $t_7(12\%)$, selon la figure II.8.1.B. La recouvrance sous climat variable est mesurée pendant la durée $\Delta t_7(12\%)$.

Troisième étape de charge-décharge:

- A l'instant $t_7(12\%)$, l'éprouvette est chargée pour la dernière fois à 12% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont imposés à l'éprouvette, selon la figure II.8.1.B, entre les instants $t_8(12\%)$ et $t_9(12\%)$, pendant la durée $\Delta t_9(12\%)$.
- A l'instant $t_9(12\%)$, l'éprouvette est totalement déchargée. La recouvrance sans variation d'humidité relative - niveau constant de 30% - est mesurée jusqu'à l'instant $t_{10}(12\%)$ pendant la durée $\Delta t_{10}(12\%)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants $t_{10}(12\%)$ et $t_{11}(12\%)$, selon la figure II.8.1.B. La recouvrance sous climat variable est mesurée pendant la durée $\Delta t_{11}(12\%)$.

PREMIÈRE PARTIE DE L'ESSAI - mesure des variations dimensionnelles



DEUXIÈME PARTIE DE L'ESSAI - application d'une sollicitation mécanique

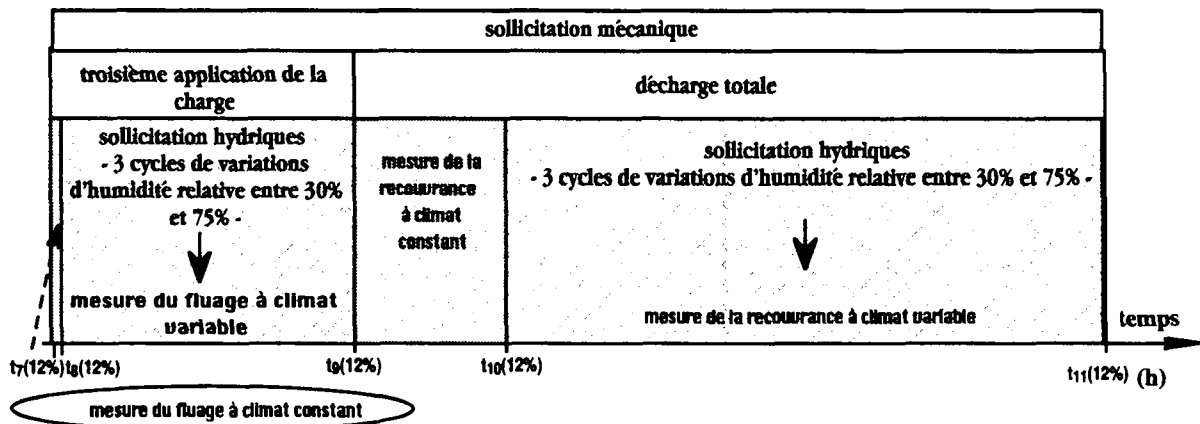
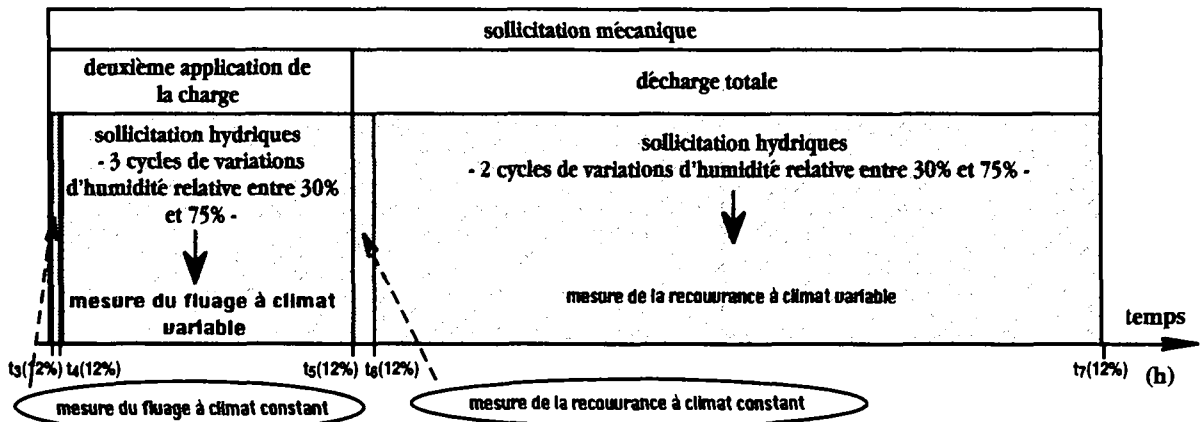
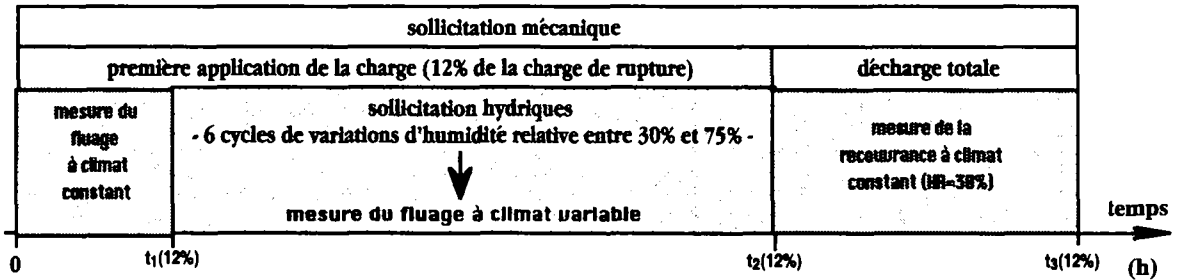


Schéma II.8.1. Étapes de déroulement de l'essai de fluage-recouvrance avec variations hydriques donné sur les figures II.8.1 à II.8.7.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	$t_0(12\%)$	$\Delta t_1(12\%)$	$t_1(12\%)$	$\Delta t_2(12\%)$	$t_2(12\%)$	$\Delta t_3(12\%)$	$t_3(12\%)$
temps (h)	0	21	21	95	116	49	165
notations	$t_3(12\%)$	$\Delta t_4(12\%)$	$t_4(12\%)$	$\Delta t_5(12\%)$	$t_5(12\%)$	$\Delta t_6(12\%)$	$t_6(12\%)$
temps (h)	165	0.083	165.083	46.917	212	25	237
notations	$t_6(12\%)$	$\Delta t_7(12\%)$	$t_7(12\%)$	$\Delta t_8(12\%)$	$t_8(12\%)$	$\Delta t_9(12\%)$	$t_9(12\%)$
temps (h)	237	97	334	0.083	334.083	45.917	380
notations	$t_9(12\%)$	$\Delta t_{10}(12\%)$	$t_{10}(12\%)$	$\Delta t_{11}(12\%)$	$t_{11}(12\%)$		
temps (h)	380	1.5	381.5	52.5	434		

Tableau II.8.1 Notations en correspondance avec l'essai décrit sur le schéma II.8.1.

L'ensemble des résultats obtenus est donné sur les figures II.8.1 à II.8.7.

La figure II.8.1 est relative à la totalité de l'essai. Sont représentés sur ce graphe:

- ❶ les programmes de chargement (II.8.1.A) et de sollicitation hydrique (II.8.1.B), imposés respectivement à chaque éprouvette;
- ❷ les résultats des mesures de la déformation ε_{tot} - (II.8.1.C), courbe (12%a) - ainsi que des variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} correspondantes - (II.8.1.D), courbe (12%c);
- ❸ le résultat du calcul de la déformation ε_r , définie en (II.6.1), courbe (12%b).

Sur la figure II.8.2 est représentée la déformation ε_r correspondant aux trois parties de charge, pour les trois premiers cycles hydriques. Pour pouvoir effectuer une comparaison entre ces déformations, à l'endroit t_i où débutent les variations d'humidité une translation $(t - t_i)$ a été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que ces instants coïncident:

- ◆ une translation $(t - t_1(12\%))$ a été réalisée sur la première partie de charge, entre les points B₁ et M₁;
- ◆ une translation $(t - t_4(12\%))$ a été réalisée sur la deuxième partie de charge, entre les points P₁ et U₁;
- ◆ une translation $(t - t_8(12\%))$ a été réalisée sur la troisième partie de charge, entre les points AD₁ et AI₁.

Sur les figures II.8.3 et II.8.4 sont représentées les déformations $\varepsilon_r - \varepsilon_{ri}$ - où ε_{ri} correspond respectivement à ε_{B_1} , ε_{P_1} et ε_{AD_1} - en fonction de $(t - t_i)$ puis $\log(t - t_i)$.

Les figures II.8.5 à II.8.7 ont été tracées pour effectuer une comparaison entre les résultats obtenus dans les deux parties de décharge avec variation d'humidité. Sur la figure II.8.5, une translation $(t - t_i)$ a été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que les instants où débutent les variations d'humidité coïncident:

- ◆ une translation $(t - t_6(12\%))$ a été réalisée sur la première partie de charge, entre les points W_1 et AC_1 ;
- ◆ une translation $(t - t_{10}(12\%))$ a été réalisée sur la première partie de charge, entre les points AK_1 et AQ_1 ;

Sur les figures II.8.6 et II.8.7 sont représentées les déformations $\varepsilon_r - \varepsilon_{ri}$ - où ε_{ri} correspond respectivement à ε_{W_1} et ε_{AK_1} - en fonction de $(t - t_i)$ puis $\log(t - t_i)$.

II.8.1.2 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX TROIS PARTIES DE CHARGE

Les tableaux II.8.2 et II.8.3 contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ε_r aux points notés B_1 à G_1 , P_1 à U_1 et AD_1 à AI_1 sur la figure II.8.1.C, ainsi que les variations de la déformation ε_r dans chacun des segments $B_1B'_1$ à F_1G_1 , $P_1P'_1$ à T_1U_1 et $AD_1AD'_1$ à AH_1AI_1 .

notations	ε_{B_1}	$\varepsilon_{B'_1}$	ε_{C_1}	ε_{D_1}	ε_{E_1}	ε_{F_1}	ε_{G_1}
ε_r (%)	0.135	0.206	0.218	0.229	0.243	0.245	0.259

notations	ε_{P_1}	$\varepsilon_{P'_1}$	ε_{Q_1}	ε_{R_1}	ε_{S_1}	ε_{T_1}	ε_{U_1}
ε_r (%)	0.265	0.295	0.308	0.303	0.315	0.313	0.320

notations	ε_{AD_1}	$\varepsilon_{AD'_1}$	ε_{AE_1}	ε_{AF_1}	ε_{AG_1}	ε_{AH_1}	ε_{AI_1}
ε_r (%)	0.237	0.297	0.310	0.307	0.322	0.316	0.326

Tableau II.8.2. Valeurs de déformation ε_r correspondant aux points B_1 à M_1 , P_1 à U_1 et AD_1 à AI_1 , figure II.8.1.C.

notations	$\Delta\varepsilon_{B_1B'_1}$	$\Delta\varepsilon_{B'_1C_1}$	$\Delta\varepsilon_{C_1D_1}$	$\Delta\varepsilon_{D_1E_1}$	$\Delta\varepsilon_{E_1F_1}$	$\Delta\varepsilon_{F_1G_1}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	0.071	0.012	0.011	0.014	0.002	0.015

notations	$\Delta\varepsilon_{P_1P'_1}$	$\Delta\varepsilon_{P'_1Q_1}$	$\Delta\varepsilon_{Q_1R_1}$	$\Delta\varepsilon_{R_1S_1}$	$\Delta\varepsilon_{S_1T_1}$	$\Delta\varepsilon_{T_1U_1}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	0.030	0.013	-0.005	0.012	-0.002	0.007

notations	$\Delta\varepsilon_{AD_1AD'_1}$	$\Delta\varepsilon_{AD'_1AE_1}$	$\Delta\varepsilon_{AE_1AF_1}$	$\Delta\varepsilon_{AF_1AG_1}$	$\Delta\varepsilon_{AG_1AH_1}$	$\Delta\varepsilon_{AH_1AI_1}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	0.060	0.013	-0.003	0.015	-0.005	0.010

Tableau II.8.3. Valeurs de déformation ε_r correspondant aux segments $B_1B'_1$ à F_1G_1 , $P_1P'_1$ à T_1U_1 ET $AD_1AD'_1$ à AH_1AI_1 , figure II.8.1.C.

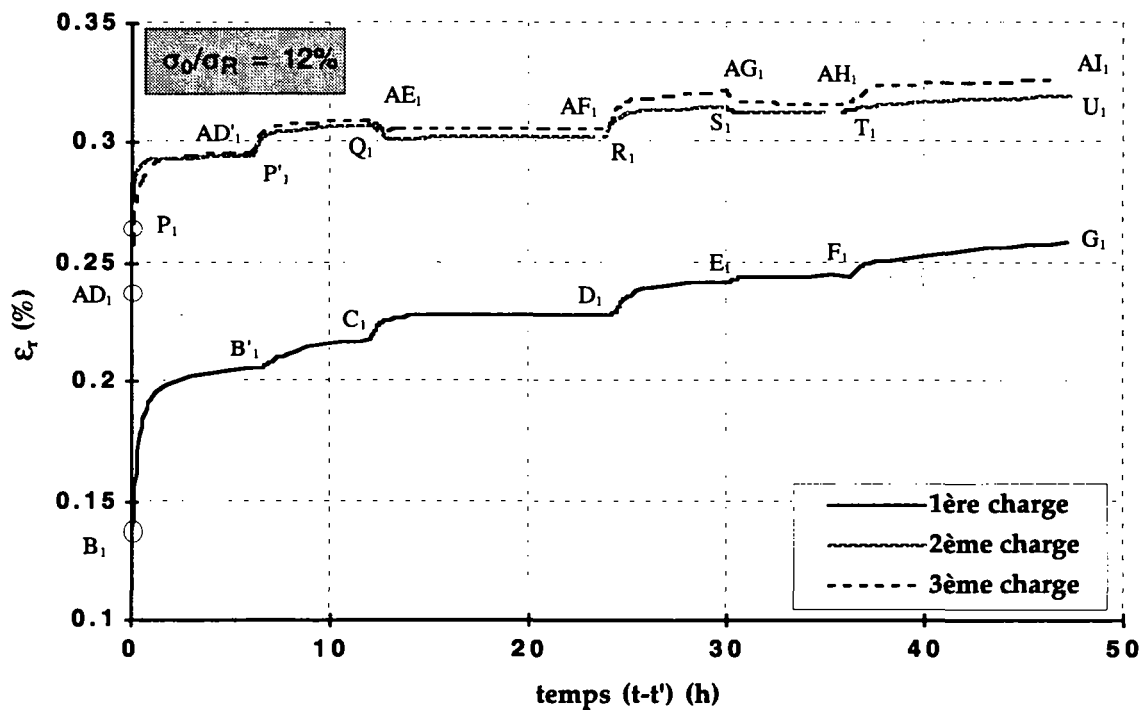


Figure II.8.2. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation ε_r lors des trois charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_i)$ ($t_1 = t_1(12\%)$, $t_2 = t_4(12\%)$ et $t_3 = t_8(12\%)$).

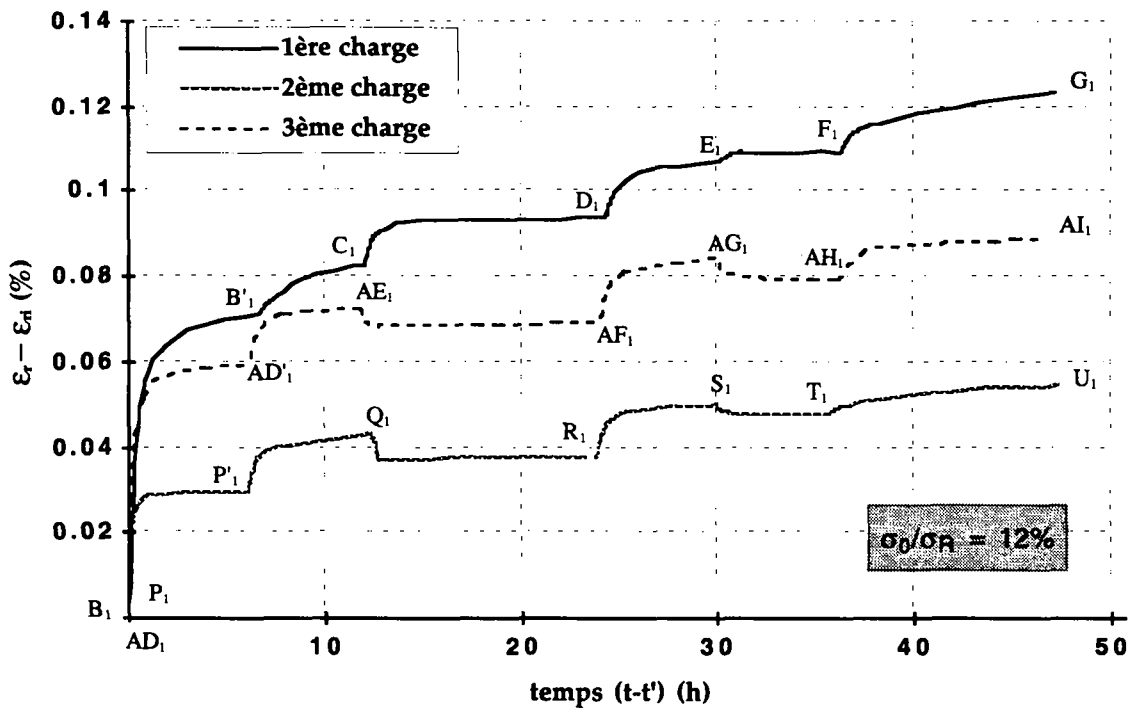


Figure II.8.3. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_{ri}$ lors des trois charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_i)$ ($\epsilon_{r1} = \epsilon_{B_1}$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{P_1}$ et $\epsilon_{r3} = \epsilon_{AD_1}$).

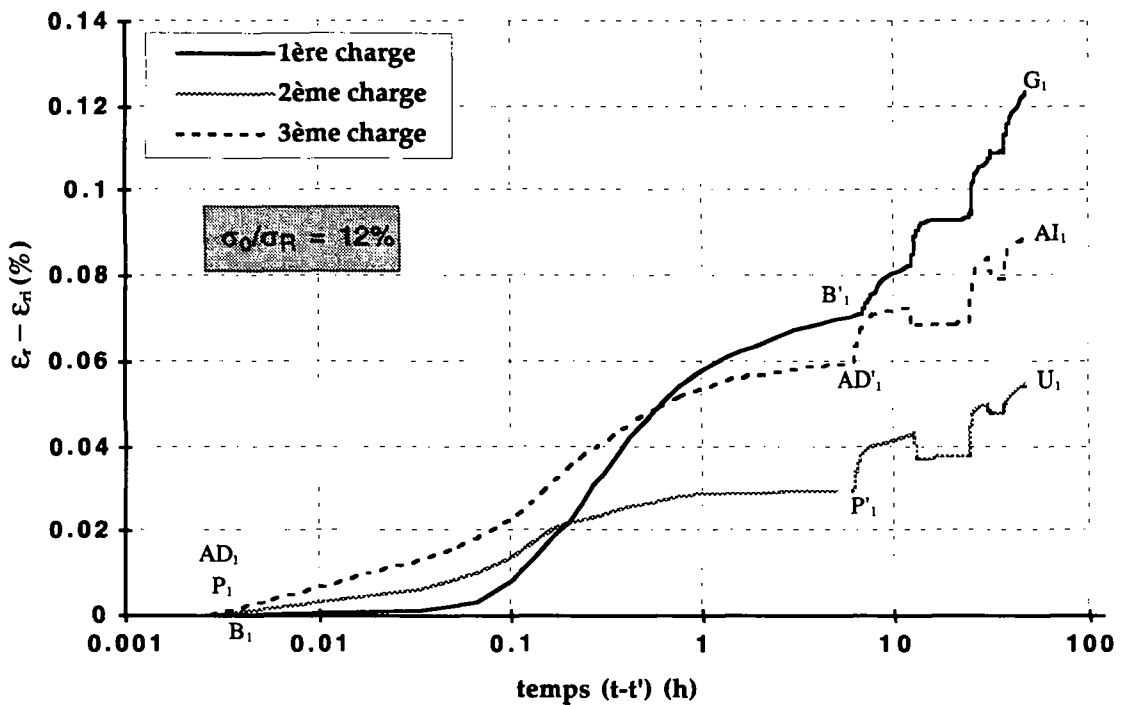


Figure II.8.4. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_{ri}$ lors des trois charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log(t - t_i)$

On observe, en ce qui concerne la déformation ε_r , que:

si l'on compare les deux premiers cycles de charge (B_1G_1 et P_1U_1):

- ★ la *première absorption* qui intervient après la première charge ($B_1B'_1$) est celle qui entraîne la *plus grande augmentation de la déformation* ε_r . Elle est telle que: $\Delta\varepsilon_{rB_1B'_1} \approx 0.62\varepsilon_{inst}$.
 - ◆ les absorption suivantes (C_1D_1) et (E_1F_1) entraînent une augmentation de la déformation ε_r , par petits paliers, puis une diminution après le quatrième cycle (I_1J_1) - représenté sur le graphe II.8.1.
 - ◆ les désorptions entraînent dans tous les cas une augmentation de la déformation ε_r : (B'_1C_1), (D_1E_1) et (F_1G_1).
- ★ la *première absorption* qui intervient après la deuxième charge ($P_1P'_1$) - la sollicitation mécanique ayant été modifiée (décharge totale) mais non suivie de variations cycliques de l'humidité relative - entraîne une augmentation de la déformation d'amplitude *moins importante* que celle observée lors de la première charge. Elle est dans ce cas telle que: $\Delta\varepsilon_{rP_1P'_1} \approx 0.26\varepsilon_{inst} \approx 0.42\Delta\varepsilon_{rB_1B'_1}$.
 - ◆ les absorption suivantes (Q_1R_1) et (S_1T_1) entraînent, dans tous les cas, une diminution de la déformation ε_r .
 - ◆ les désorptions entraînent dans tous les cas une augmentation de la déformation ε_r : (P'_1Q_1), (R_1S_1) et (T_1U_1).
- ★ on peut remarquer, en comparant l'ensemble des réponses relatives à la 1ère et à la 2ème charge, que la vitesse de déformation est plus importante dans le premier cas.

si l'on considère le dernier cycle de charge (AD_1AI_1):

- ★ la *première absorption* qui intervient après la troisième charge ($AD_1AD'_1$) - la sollicitation mécanique ayant été modifiée (décharge totale) puis suivie de variations cycliques de l'humidité relative - entraîne à nouveau une *augmentation de la déformation* ε_r , d'amplitude *importante, comparable à celle observée lors de la première charge*. Elle est telle que: $\Delta\varepsilon_{rAD_1AD'_1} \approx 0.52\varepsilon_{inst} \approx 0.85\Delta\varepsilon_{rB_1B'_1} \approx 2\Delta\varepsilon_{rP_1P'_1}$.
 - ◆ les absorption suivantes (AE_1AF_1) et (AG_1AH_1) entraînent, dans tous les cas, une diminution de la déformation ε_r .
 - ◆ les désorptions entraînent dans tous les cas une augmentation de la déformation ε_r : (AD'_1AE_1), (AF_1AG_1) et (AH_1AI_1).
- ★ on peut remarquer, en comparant les résultats relatifs à la 2ème et à la 3ème charge, que mis à part au niveau du premier changement d'humidité, l'allure globale des réponses obtenues

est quasiment similaire. Il apparaît, en effet, que les oscillations de la déformation ε_r , induites par les cyclages hydriques, à partir du deuxième changement d'humidité relative, prennent une allure répétitive (P'_1U_1 et AD'_1AI_1).

II.8.1.3 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX DEUX PARTIES DE DÉCHARGE AVEC VARIATIONS HYDRIQUES

Les tableaux II.8.4 et II.8.5 contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ε_r aux points notés W_1 à AC_1 et AK_1 à AQ_1 sur la figure II.8.1.C, ainsi que les variations de la déformation ε_r dans chacun des segments $W_1W'_1$ à AB_1AC_1 et $AK_1AK'_1$ à AP_1AQ_1 .

notations	ε_{W_1}	$\varepsilon_{W'_1}$	ε_{X_1}	ε_{Y_1}	ε_{Z_1}	ε_{AA_1}	ε_{AB_1}	ε_{AC_1}
ε_r (%)	0.181	0.136	0.139	0.123	0.129	0.122	0.124	0.124

notations	ε_{AK_1}	$\varepsilon_{AK'_1}$	ε_{AL_1}	ε_{AM_1}	ε_{AN_1}	ε_{AO_1}	ε_{AP_1}	ε_{AQ_1}
ε_r (%)	0.201	0.147	0.145	0.129	0.136	0.129	0.136	0.134

Tableau II.8.4. Valeurs de déformation correspondant aux points W_1 à AC_1 et AK_1 à AQ_1 , figure II.8.1.C.

notations	$\Delta\varepsilon_{W_1W'_1}$	$\Delta\varepsilon_{W'_1X_1}$	$\Delta\varepsilon_{X_1Y_1}$	$\Delta\varepsilon_{Y_1Z_1}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	-0.044	0.002	-0.016	0.006
notations	$\Delta\varepsilon_{Z_1AA_1}$	$\Delta\varepsilon_{AA_1AB_1}$	$\Delta\varepsilon_{AB_1AC_1}$	
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	-0.007	0.002	0.000	

notations	$\Delta\varepsilon_{AK_1AK'_1}$	$\Delta\varepsilon_{AK'_1AL_1}$	$\Delta\varepsilon_{AL_1AM_1}$	$\Delta\varepsilon_{AM_1AN_1}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	-0.053	-0.003	-0.016	0.007
notations	$\Delta\varepsilon_{AN_1AO_1}$	$\Delta\varepsilon_{AO_1AP_1}$	$\Delta\varepsilon_{AP_1AQ_1}$	
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	-0.007	0.007	0.002	

Tableau II.8.5. Valeurs de déformation correspondant aux points $W_1W'_1$ à AB_1AC_1 et $AK_1AK'_1$ à AP_1AQ_1 , figure II.8.1.C.

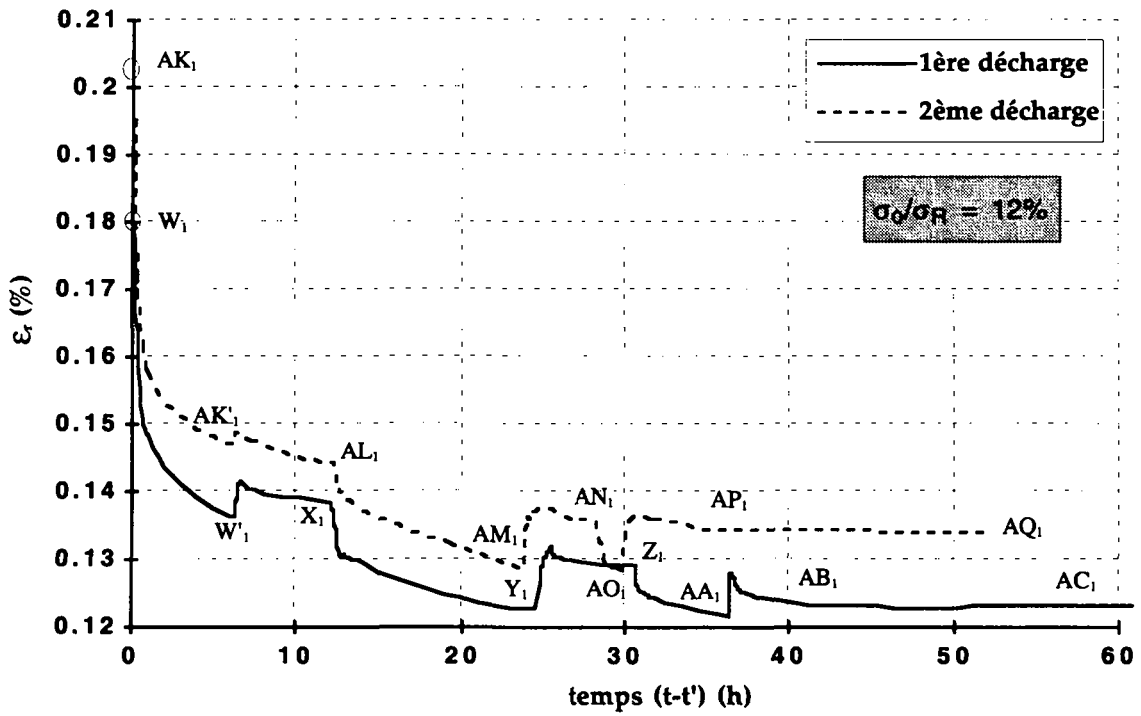


Figure II.8.5. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation ϵ_r lors des deux décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t-t_i)$ ($t_1 = t_6(12\%)$ et $t_2 = t_{10}(12\%)$).

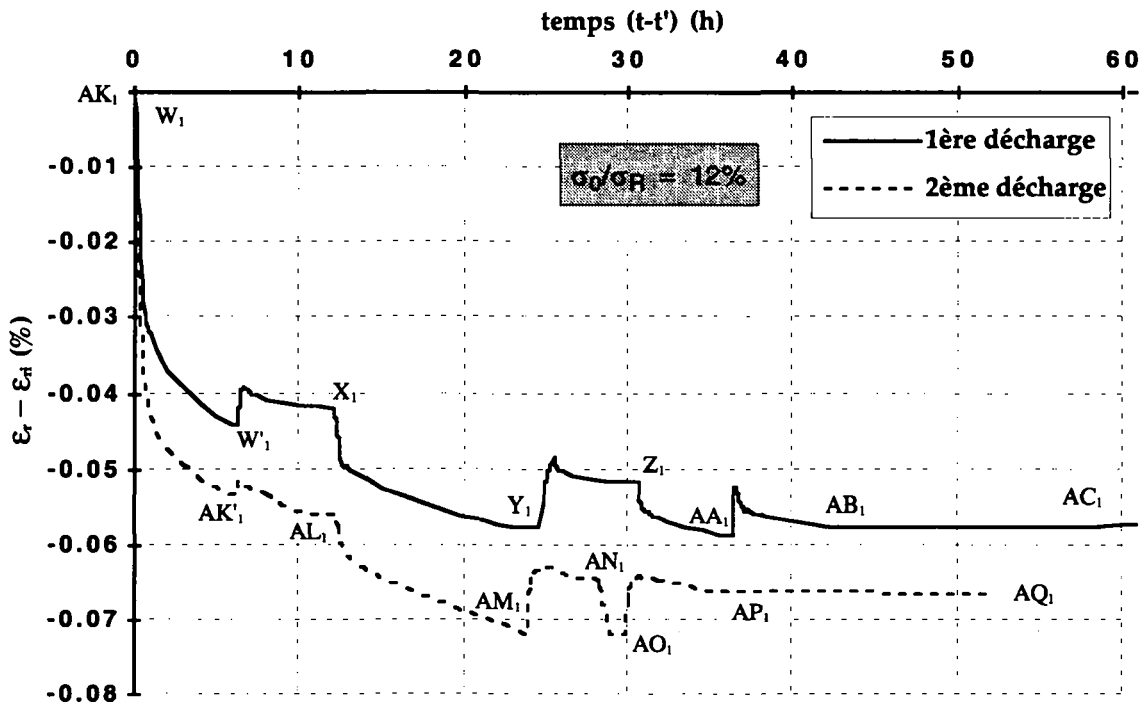


Figure II.8.6. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_{ri}$ lors des deux décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t-t_i)$ ($\epsilon_{r1} = \epsilon_{W_1}$ et $\epsilon_{r2} = \epsilon_{AK_1}$).

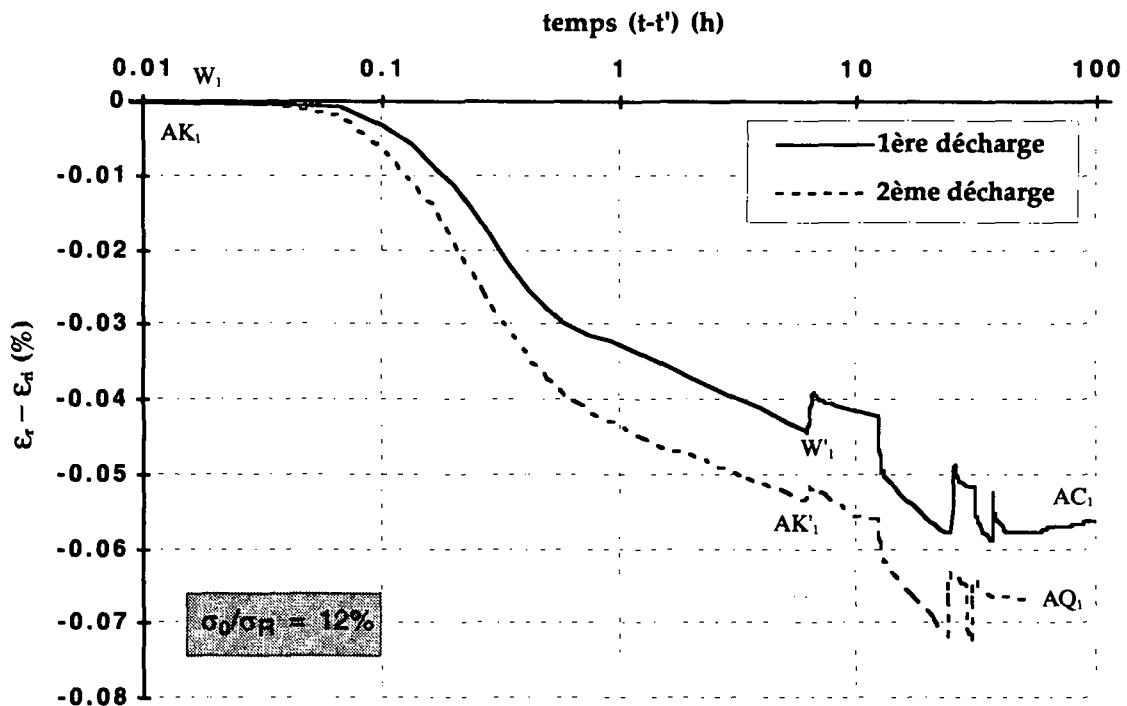


Figure II.8.7. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_{ri}$ lors des deux décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log(t - t_i)$.

On observe, en ce qui concerne la déformation ϵ_r , que:

- ★ la *première absorption*, qui intervient après suppression de la charge, est, dans les deux cas, celle qui entraîne la *plus grande diminution de la déformation* (augmentation de la recouvrance):
 - ◆ Au point W_1 , après la première décharge, l'amplitude de la déformation est d'environ 1.58 fois la déformation ϵ_{inst} . Elle diminue à 1.20 fois ϵ_{inst} après la première absorption ($W_1W'_1$). Donc $\Delta\epsilon_{rW_1W'_1} \approx -0.38 \epsilon_{inst}$
 - ◆ Au point AK_1 , après le deuxième décharge, l'amplitude de la déformation est d'environ 1.75 fois ϵ_{inst} . Elle diminue à 1.28 fois ϵ_{inst} après la première absorption ($AK_1AK'_1$). Donc $\Delta\epsilon_{rAK_1AK'_1} \approx -0.47 \epsilon_{inst} \approx 1.23 \Delta\epsilon_{rW_1W'_1}$
- ★ les absorptions suivantes entraînent, dans tous les cas, une nouvelle *diminution* de la déformation: (X_1Y_1) et (Z_1AA_1) après la première décharge ainsi que (AL_1AM_1) et (AN_1AO_1) lors de la deuxième.

- ★ les désorptions entraînent, dans tous les cas, une *ré-augmentation* de la déformation: (W'_1X_1), (Y_1Z_1) et (AA_1AB_1) lors la première décharge ainsi que (AK'_1AL_1), (AM_1AN_1) et (AO_1AP_1) lors de la deuxième.
- ★ une *déformation permanente* ε_p est mise en évidence après décharge totale avec variations hydriques. Une comparaison entre les points AC_1 et AQ_1 semble montrer que, une fois ε_p atteinte, la déformation mesurée lors de la répétition d'un cycle de charge et décharge avec variations d'humidité entre les mêmes paliers est réversible. En effet, au point AC_1 , la recouvrance mesurée est d'environ 1.09 fois ε_{inst} . Elle est d'environ 1.17 fois ε_{inst} au point AQ_1 . La déformation permanente mesurée à l'issue des cycles de charge-décharge avec variations hydriques est donc supérieure à la déformation instantanée.

II.8.2 CYCLES DE FLUAGE-RECOUVRANCE EN TRACTION SUR ÉPROUVETTES INITIALEMENT SÈCHES AVEC CYCLES DE VARIATIONS D'HUMIDITÉ RELATIVE, POUR UN NIVEAU DE CHARGE DE 22%.

II.8.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

L'essai réalisé comporte trois étapes de charge et décharge avec ou sans variation cyclique d'humidité relative. Elles sont décrites sur le schéma II.8.2. Le détail de ces étapes est donné ci-dessous. Le programme de sollicitation mécanique est similaire - au niveau de la durée des créneaux appliqués - à celui de l'essai II.8.1.

Première partie de l'essai:

L'éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une charge constante et nulle.

- Un niveau constant de 30% d'humidité relative est fixé pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la déformation est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 30% et 75%. Les variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.
- Un niveau constant de 30% d'humidité relative est à nouveau fixé durant la dernière période de 12 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la déformation avant application du programme de chargement.

Deuxième partie de l'essai:

Première étape de charge-décharge:

- A l'instant $t_0(22\%)$ l'éprouvette est chargée à 22% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Le fluage à humidité constante - ϵ_{visc} - est mesuré jusqu'à l'instant $t_1(22\%)$ pendant la durée $\Delta t_1(22\%)$. Six cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants $t_1(22\%)$ et $t_2(22\%)$, selon la figure II.8.8.B. La réponse différée sous climat variable ϵ_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_2(22\%)$.
- A l'instant $t_2(22\%)$, l'éprouvette est totalement déchargée. La recouvrance, pour un niveau d'humidité relative constant de 30%, est mesurée jusqu'à l'instant $t_3(22\%)$ pendant la durée $\Delta t_3(22\%)$.

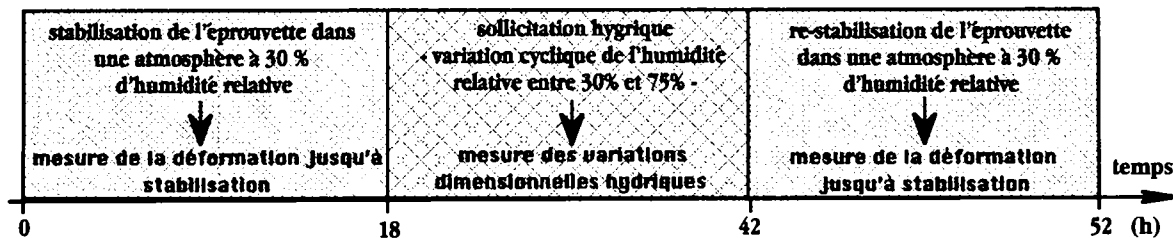
Deuxième étape de charge-décharge:

- A l'instant $t_3(22\%)$, l'éprouvette est à nouveau chargée à 22% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont imposés à l'éprouvette, selon la figure II.8.8.B, entre les instants $t_4(22\%)$ et $t_5(22\%)$, pendant la durée $\Delta t_5(22\%)$.
- A l'instant $t_5(22\%)$, l'éprouvette est totalement déchargée. La recouvrance sans variation d'humidité relative - niveau constant de 30% - est mesurée jusqu'à l'instant $t_6(22\%)$ pendant la durée $\Delta t_6(22\%)$. Deux cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants $t_6(22\%)$ et $t_7(22\%)$, selon la figure II.8.8.B. La recouvrance sous climat variable est mesurée pendant la durée $\Delta t_7(22\%)$.

Troisième étape de charge-décharge:

- A l'instant $t_7(22\%)$, l'éprouvette est chargée pour la dernière fois à 22% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont imposés à l'éprouvette, selon la figure II.8.8.B, entre les instants $t_8(22\%)$ et $t_9(22\%)$, pendant la durée $\Delta t_9(22\%)$.
- A l'instant $t_9(22\%)$, l'éprouvette est totalement déchargée. La recouvrance sans variation d'humidité relative - niveau constant de 30% - est mesurée jusqu'à l'instant $t_{10}(22\%)$ pendant la durée $\Delta t_{10}(22\%)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants $t_{10}(22\%)$ et $t_{11}(22\%)$, selon la figure II.8.8.B. La recouvrance sous climat variable est mesurée pendant la durée $\Delta t_{11}(22\%)$.

PREMIÈRE PARTIE DE L'ESSAI - mesure des variations dimensionnelles



DEUXIÈME PARTIE DE L'ESSAI - application d'une sollicitation mécanique

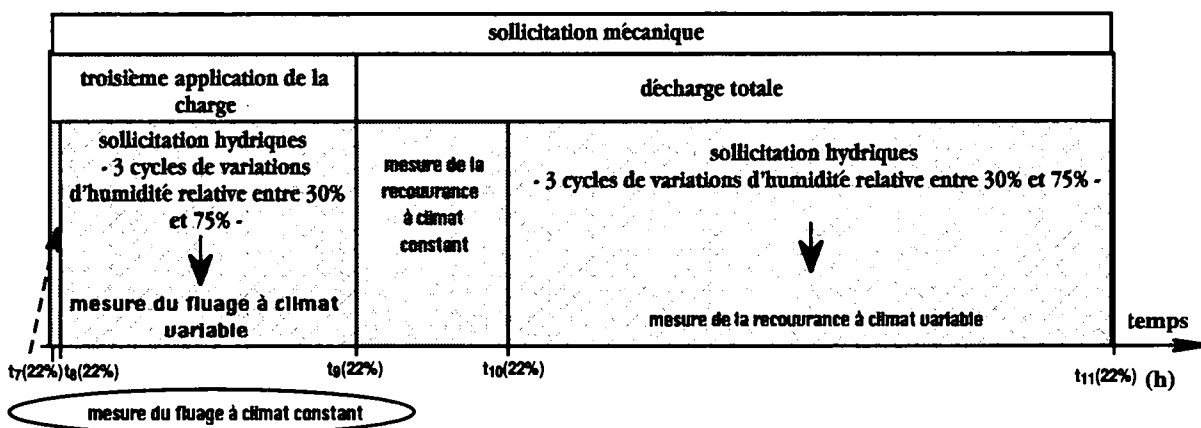
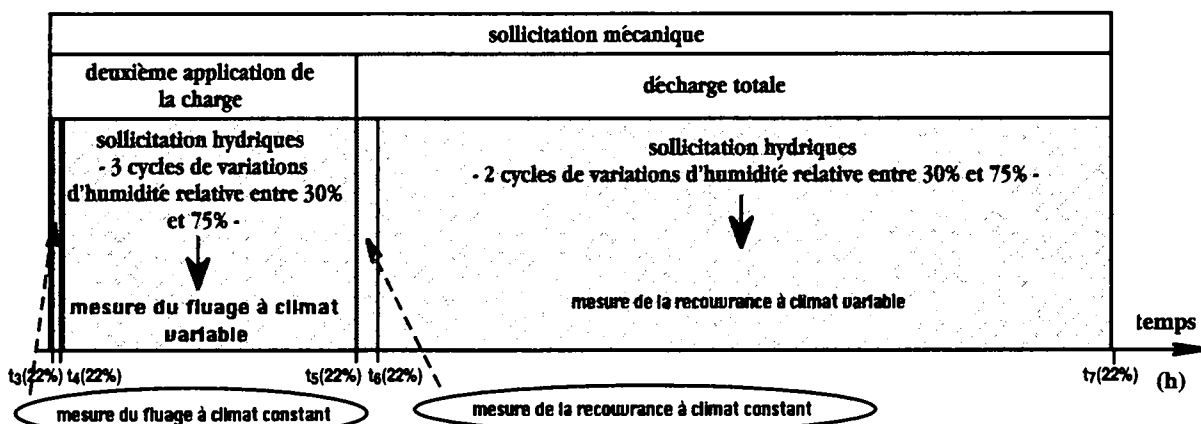
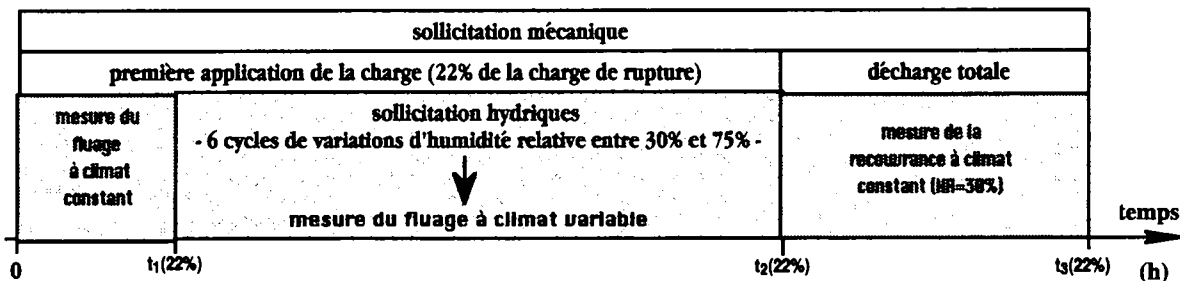


Schéma II.8.2. Étapes de déroulement de l'essai de fluage-recouvrance avec variations hydriques donné sur les figures II.8.8 à II.8.14.

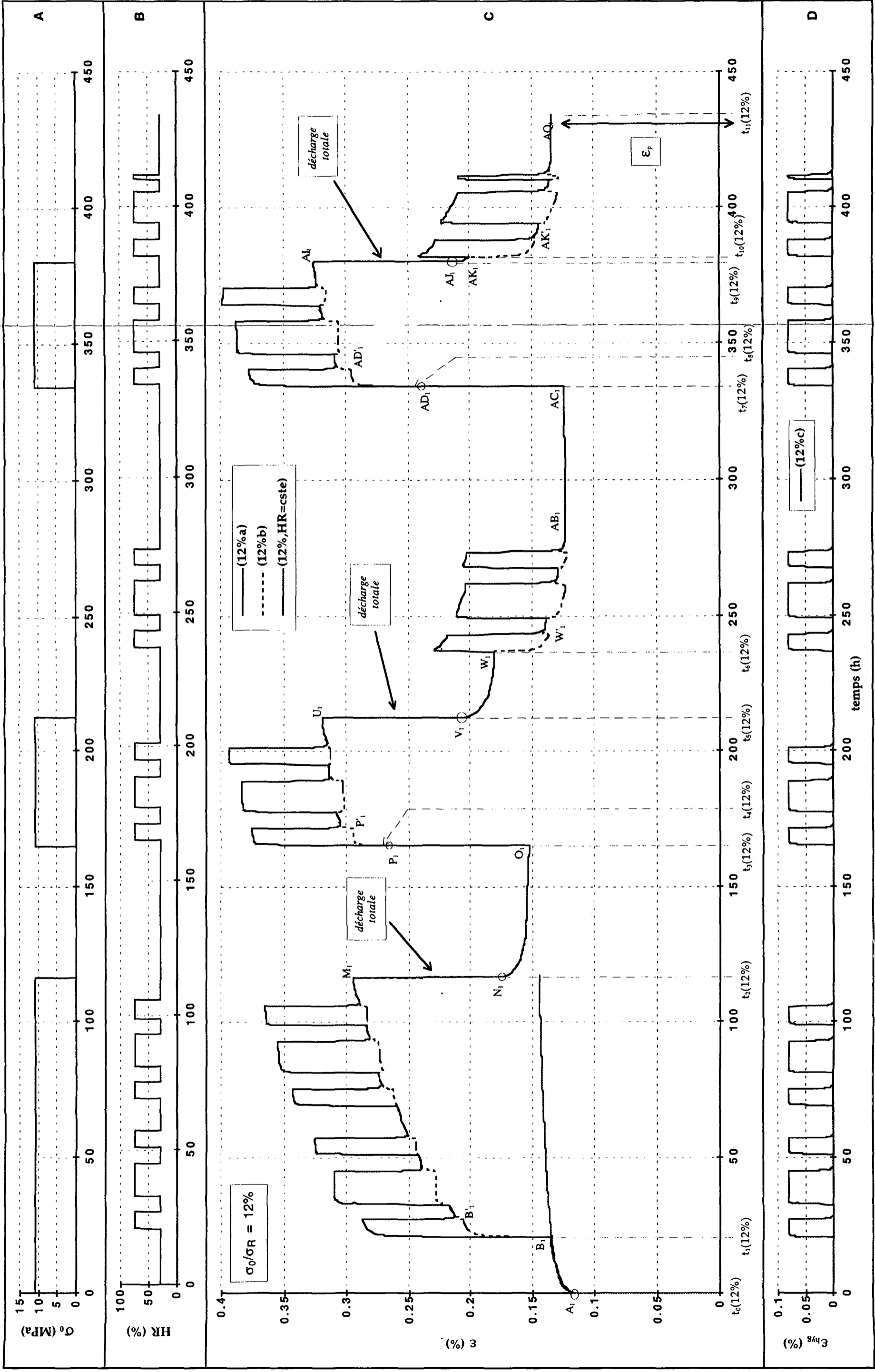


Figure II.8.1. Cycles de fluage-recouvrance avec variations d'humidité. Le niveau de force appliquée correspond à environ 12% de la force de rupture. A: programme de chargement; B: programme de sollicitation hygrique; C: déformations ϵ_{tot} (12a) et ϵ_r (12b); D: déformation ϵ_{hyg} (12c).

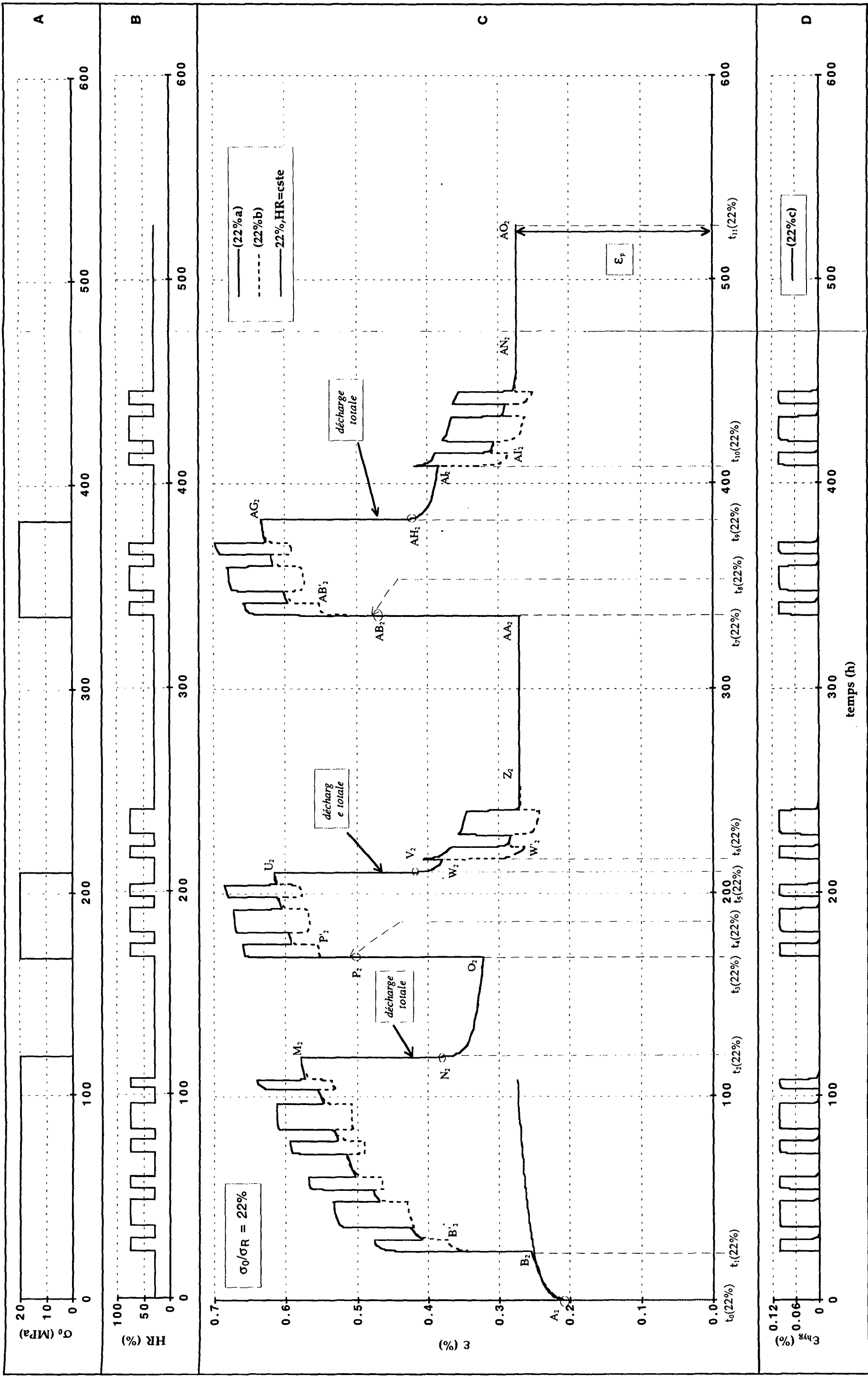


Figure II.8.7. Cycles de fluage-recouvrance avec variations d'humidité. Le niveau de force appliquée correspond à environ 22% de la force de rupture. **A**: programme de charge; **B**: programme de sollicitation hygrique; **C**: déformations ϵ_{tot} (22a) et ϵ_r (22b); **D**: déformation ϵ_{hyg} : (22c).

avec les notations suivantes:

notations	$t_0(22\%)$	$\Delta t_1(22\%)$	$t_1(22\%)$	$\Delta t_2(22\%)$	$t_2(22\%)$	$\Delta t_3(22\%)$	$t_3(22\%)$
temps (h)	0	24	24	95	119	49	168
notations	$t_3(22\%)$	$\Delta t_4(22\%)$	$t_4(22\%)$	$\Delta t_5(22\%)$	$t_5(22\%)$	$\Delta t_6(22\%)$	$t_6(22\%)$
temps (h)	168	0.083	168.083	41.917	210	6.25	216.25
notations	$t_6(22\%)$	$\Delta t_7(22\%)$	$t_7(22\%)$	$\Delta t_8(22\%)$	$t_8(22\%)$	$\Delta t_9(22\%)$	$t_9(22\%)$
temps (h)	216.25	119.75	336	0.083	336.083	46.917	383
notations	$t_9(22\%)$	$\Delta t_{10}(22\%)$	$t_{10}(22\%)$	$\Delta t_{11}(22\%)$	$t_{11}(22\%)$		
temps (h)	383	25.75	408.75	117.75	526.5		

Tableau II.8.6 Notations en correspondance avec les essais décrits sur le schéma II.8.1.

L'ensemble des résultats obtenus est donné sur les figures II.8.8 à II.8.14.

- ❶ les programmes de chargement (II.8.8.A) et de sollicitation hydrique (II.8.8.B), imposés respectivement à chaque éprouvette;
- ❷ les résultats des mesures de la déformation ε_{tot} - (II.8.8.C), courbe (22%a) - ainsi que des variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} correspondantes - (II.8.8.D), courbe (22%c);
- ❸ le résultat du calcul de la déformation ε_r , définie en (II.6.1), courbe (22%b).

Sur la figure II.8.9 est représentée la déformation ε_r correspondant aux trois parties de charge. Une comparaison est effectuée entre ces déformations, à l'endroit t_i où débutent les variations d'humidité. Une translation $(t - t_i)$ a été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que ces instants coïncident:

- une translation $(t - t_1(22\%))$ a été réalisée sur la première partie de charge, entre les points B₂ et M₂;
- une translation $(t - t_4(22\%))$ a été réalisée sur la deuxième partie de charge, entre les points P₂ et U₂;
- une translation $(t - t_8(22\%))$ a été réalisée sur la troisième partie de charge, entre les points AB₂ et AG₂.

Sur les figures II.8.10 et II.8.11 sont représentées les déformations $\varepsilon_r - \varepsilon_{ri}$ - où ε_{ri} correspond respectivement à ε_{B_2} , ε_{P_2} et ε_{AB_2} - en fonction de $(t - t_i)$ puis $\log(t - t_i)$.

Sur la figure II.8.12 est représentée la déformation ε_r , correspondant aux deux parties de décharge avec variation d'humidité. De même que précédemment, une translation $(t - t_i)$ a été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que les instants où débutent les variations d'humidité coïncident:

- une translation $(t - t_6(22\%))$ a été réalisée sur la première partie de charge, entre les points W_2 et AA_2 ;
- une translation $(t - t_{10}(22\%))$ a été réalisée sur la première partie de charge, entre les points AI_2 et AO_2 ;

Sur les figures II.8.13 et II.8.14 sont représentées les déformations $\varepsilon_r - \varepsilon_{ri}$ - où ε_{ri} correspond respectivement à ε_{W_2} et ε_{AI_2} - en fonction de $(t - t_i)$ puis $\log(t - t_i)$.

II.8.2.2 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX TROIS PARTIES DE CHARGE

Les tableaux II.8.7 et II.8.8 contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ε_r , aux points notés B_2 à G_2 , P_2 à U_2 et AB_2 à AG_2 sur la figure II.8.8.C, ainsi que les variations de la déformation ε_r , dans chacun des segments $B_2B'_2$ à F_2G_2 , $P_2P'_2$ à T_2U_2 et $AB_2AB'_2$ à AF_2AG_2 .

notations	ε_{B_2}	$\varepsilon_{B'_2}$	ε_{C_2}	ε_{D_2}	ε_{E_2}	ε_{F_2}	ε_{G_2}
ε_r (%)	0.255	0.373	0.426	0.431	0.478	0.466	0.515

notations	ε_{P_2}	$\varepsilon_{P'_2}$	ε_{Q_2}	ε_{R_2}	ε_{S_2}	ε_{T_2}	ε_{U_2}
ε_r (%)	0.522	0.556	0.597	0.569	0.610	0.582	0.618

notations	ε_{AB_2}	$\varepsilon_{AB'_2}$	ε_{AC_2}	ε_{AD_2}	ε_{AE_2}	ε_{AF_2}	ε_{AG_2}
ε_r (%)	0.469	0.555	0.605	0.579	0.621	0.594	0.634

Tableau II.8.7. Valeurs de déformation correspondant aux points B_2 à G_2 , P_2 à U_2 et AB_2 à AG_2 , figure II.8.8.C.

notations	$\Delta\epsilon_{B_2B'_2}$	$\Delta\epsilon_{B'_2C_2}$	$\Delta\epsilon_{C_2D_2}$	$\Delta\epsilon_{D_2E_2}$	$\Delta\epsilon_{E_2F_2}$	$\Delta\epsilon_{F_2G_2}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.118	0.053	0.005	0.047	-0.013	0.050

notations	$\Delta\epsilon_{P_2P'_2}$	$\Delta\epsilon_{P'_2Q_2}$	$\Delta\epsilon_{Q_2R_2}$	$\Delta\epsilon_{R_2S_2}$	$\Delta\epsilon_{S_2T_2}$	$\Delta\epsilon_{T_2U_2}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.034	0.040	-0.027	0.041	-0.028	0.036

notations	$\Delta\epsilon_{AB_2AB'_2}$	$\Delta\epsilon_{AB'_2AC_2}$	$\Delta\epsilon_{AC_2AD_2}$	$\Delta\epsilon_{AD_2AE_2}$	$\Delta\epsilon_{AE_2AF_2}$	$\Delta\epsilon_{AF_2AG_2}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.086	0.050	-0.026	0.042	-0.027	0.040

Tableau II.8.8. Valeurs de déformation correspondant aux segments $B_2B'_2$ à F_2G_2 , $P_2P'_2$ à T_2U_2 ET $AB_2AB'_2$ à AF_2AG_2 , figure II.8.8.C.

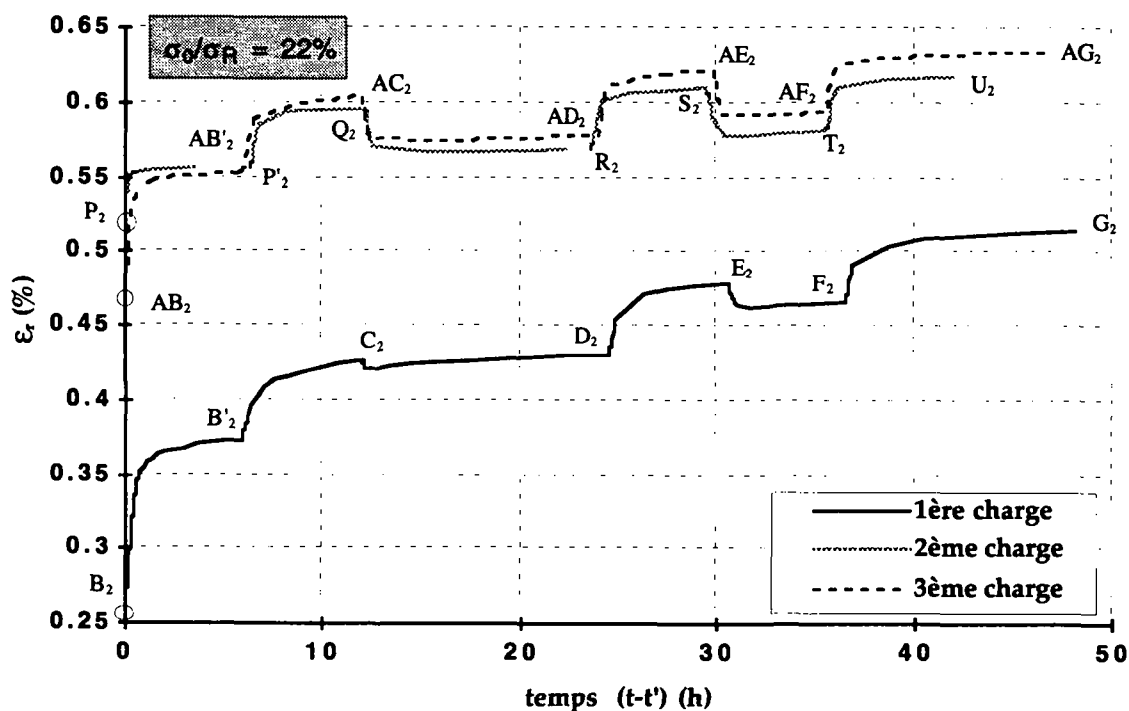


Figure II.8.9. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation ϵ_r , lors des trois charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_i)$ ($t_1 = t_1(22\%)$, $t_2 = t_4(22\%)$ et $t_3 = t_8(22\%)$).

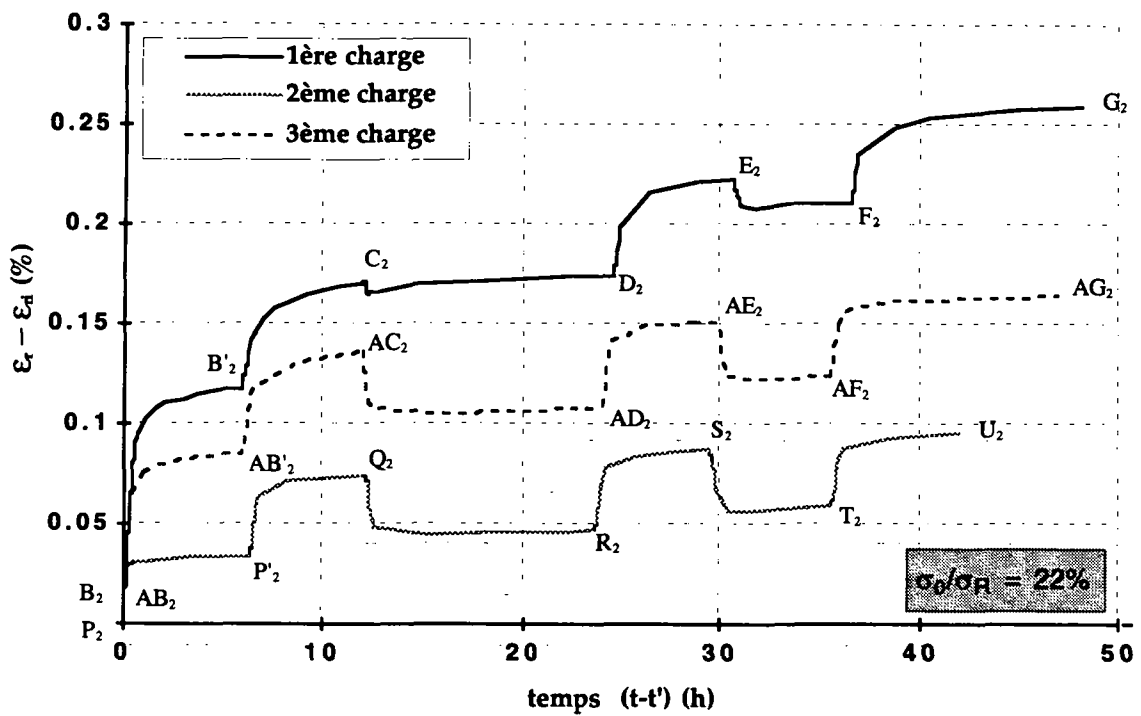


Figure II.8.10. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_d$ lors des trois charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_i)$ ($\epsilon_{r1} = \epsilon_{B_2}$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{P_2}$ et $\epsilon_{r3} = \epsilon_{AB_2}$).

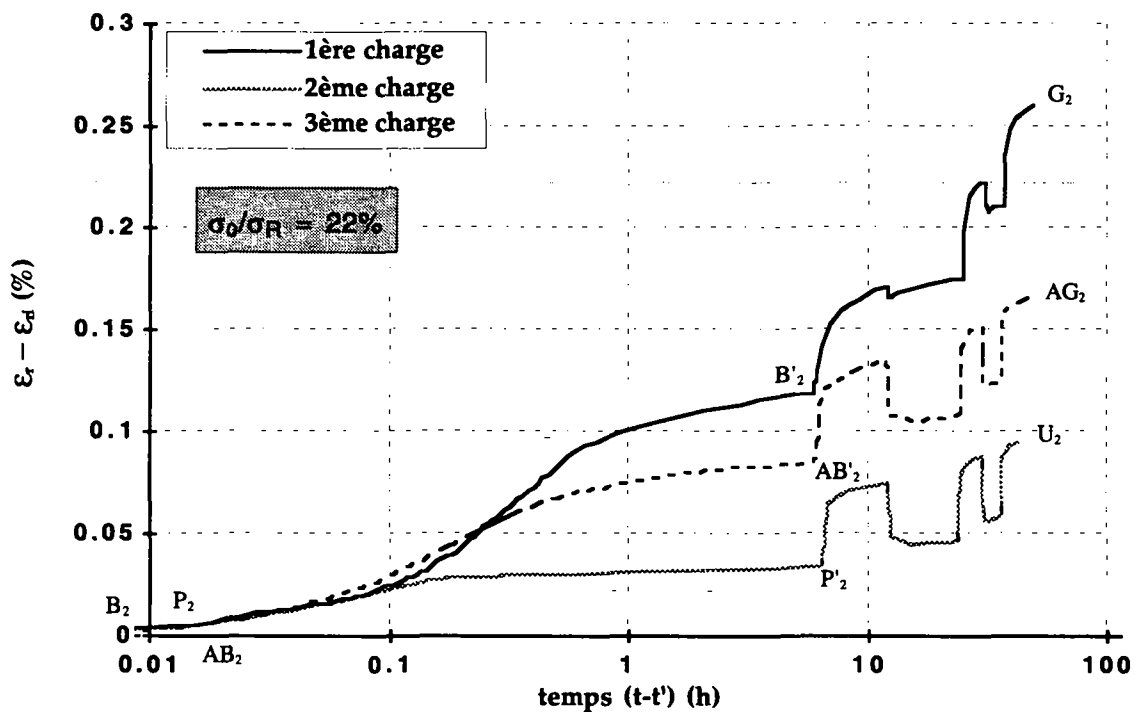


Figure II.8.11. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_d$ lors des trois charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log(t - t_i)$.

On observe, en ce qui concerne la déformation ε_r , que:

si l'on compare les deux premiers cycles de charge (B_2G_2 et P_2U_2):

- ★ la *première absorption* qui intervient après la première charge ($B_2B'_2$) est celle qui entraîne la *plus grande augmentation de la déformation* ε_r . Elle est telle que $\Delta\varepsilon_{rB_2B'_2} \approx 0.60\varepsilon_{inst}$.
 - les absorptions suivantes (C_2D_2) et (E_2F_2) entraînent une diminution de la déformation, dans tous les cas;
 - les désorptions entraînent dans tous les cas une augmentation de la déformation ε_r : (B'_2C_2), (D_2E_2) et (F_2G_2).
- ★ la *première absorption* qui intervient après la deuxième charge ($P_2P'_2$) - la sollicitation mécanique ayant été modifiée (décharge totale) mais non suivie de variations cycliques de l'humidité relative - entraîne une augmentation de la déformation d'amplitude *moins importante* que celle observée lors de la première charge. Elle est dans ce cas telle que $\Delta\varepsilon_{rP_2P'_2} \approx 0.17\varepsilon_{inst} \approx 0.28\Delta\varepsilon_{rB_2B'_2}$.
 - ◆ les absorption suivantes (Q_2R_2) et (S_2T_2) entraînent, dans tous les cas, une diminution de la déformation ε_r .
 - ◆ les désorptions entraînent dans tous les cas une augmentation de la déformation ε_r : (P'_2Q_2), (R_2S_2) et (T_2U_2).
- ★ on peut remarquer, comme précédemment, en comparant l'ensemble des réponses relatives à la 1ère et à la 2ème charge, que la vitesse de déformation est plus importante dans le premier cas.

si l'on considère le dernier cycle de charge (AB_2AG_2):

- ★ la *première absorption* qui intervient après la troisième charge ($AB_2AB'_2$) - la sollicitation mécanique ayant été modifiée (décharge totale) puis suivie de variations cycliques de l'humidité relative - entraîne à nouveau une *augmentation de la déformation* ε_r d'amplitude *importante, comparable à celle observée lors de la première charge*. Elle est telle que: $\Delta\varepsilon_{rAB_2AB'_2} \approx 0.44\varepsilon_{inst} \approx 0.73\Delta\varepsilon_{rB_2B'_2} \approx 2.6\Delta\varepsilon_{rP_2P'_2}$
 - ◆ les absorption suivantes (AC_2AD_2) et (AE_2AF_2) entraînent, dans tous les cas, une diminution de la déformation ε_r .
 - ◆ les désorptions entraînent dans tous les cas une augmentation de la déformation ε_r : (AB'_2AC_2), (AD_2AE_2) et (AF_2AG_2).

- ★ on peut remarquer, en comparant les résultats relatifs à la 2ème et à la 3ème charge, que mis à part au niveau du premier changement d'humidité, l'allure globale des réponses obtenues est quasiment similaire. Les oscillations de la déformation ϵ_r , induites à partir du deuxième changement d'humidité relative prennent une allure répétitive (P'_2U_2 et AB'_2AG_2).

II.8.2.3 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX DEUX PARTIES DE DÉCHARGE AVEC VARIATION HYDRIQUE

Les tableaux II.8.9 et II.8.10 contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ϵ_r , aux points notés W_2 à AA_2 et AI_2 à AO_2 sur la figure II.8.8.C, ainsi que les variations de la déformation ϵ_r dans chacun des segments $W_2W'_2$ à Z_2AA_2 et $AI_2AI'_2$ à AN_2AO_2 .

notations	ϵ_{W_2}	$\epsilon_{W'_2}$	ϵ_{X_2}	ϵ_{Y_2}	ϵ_{Z_2}	ϵ_{AA_2}
ϵ_r (%)	0.383	0.263	0.283	0.242	0.270	0.270

notations	ϵ_{AI_2}	$\epsilon_{AI'_2}$	ϵ_{AJ_2}	ϵ_{AK_2}	ϵ_{AL_2}	ϵ_{AM_2}	ϵ_{AN_2}	ϵ_{AO_2}
ϵ_r (%)	0.385	0.285	0.307	0.263	0.290	0.252	0.277	0.275

Tableau II.8.9. Valeurs de déformation ϵ_r , correspondant aux points W_2 à Z_2 et AI_2 à AO_2 , figure II.8.8.C.

notations	$\Delta\epsilon_{W_2W'_2}$	$\Delta\epsilon_{W'_2X_2}$	$\Delta\epsilon_{X_2Y_2}$	$\Delta\epsilon_{Y_2Z_2}$	$\Delta\epsilon_{Z_2AA_2}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	-0.120	0.020	-0.041	0.028	0

notations	$\Delta\epsilon_{AI_2AI'_2}$	$\Delta\epsilon_{AI_2AJ_2}$	$\Delta\epsilon_{AJ_2AK_2}$	$\Delta\epsilon_{AK_2AL_2}$	$\Delta\epsilon_{AL_2AM_2}$
$\Delta\epsilon_r$ (%)	-0.100	0.022	-0.044	0.027	-0.038
notations	$\Delta\epsilon_{AM_2AN_2}$	$\Delta\epsilon_{AN_2AO_2}$			
$\Delta\epsilon_r$ (%)	0.024	-0.001			

Tableau II.8.10. Valeurs de déformation ϵ_r , correspondant aux points $W_2W'_2$ à Z_2AA_2 et $AI_2AI'_2$ à AN_2AO_2 , figure II.8.8.C.

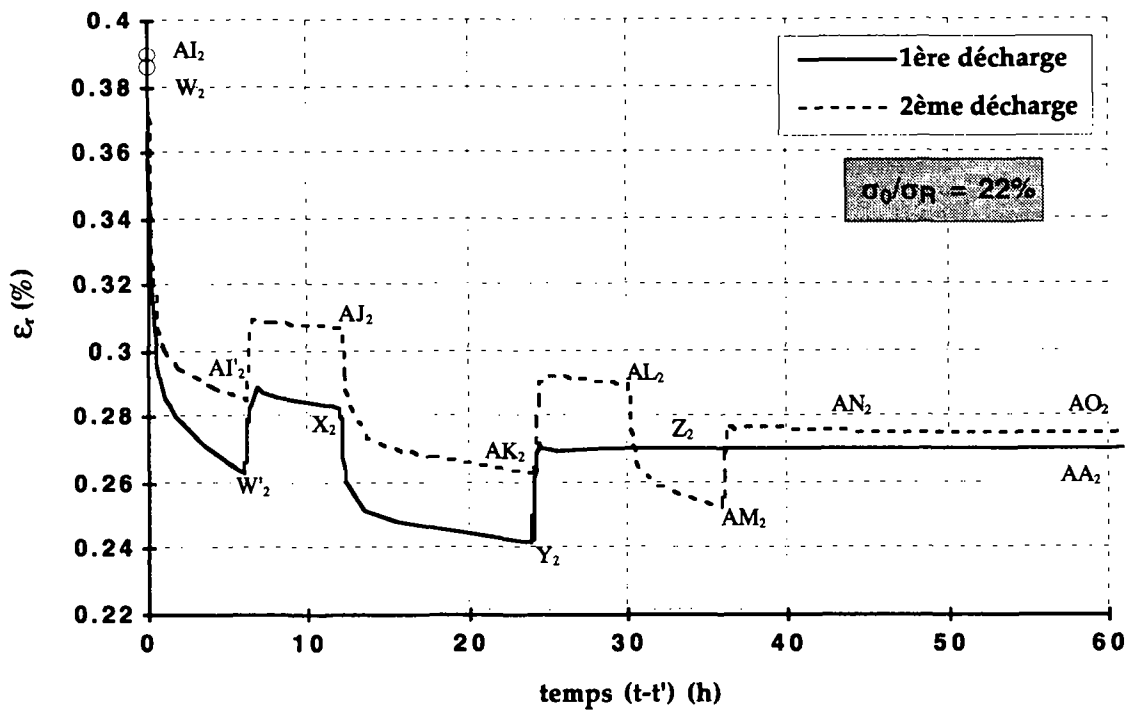


Figure II.8.12. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation ϵ_r lors des deux décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t-t_i)$ ($t_1 = t_6(22\%)$ et $t_2 = t_{10}(22\%)$).

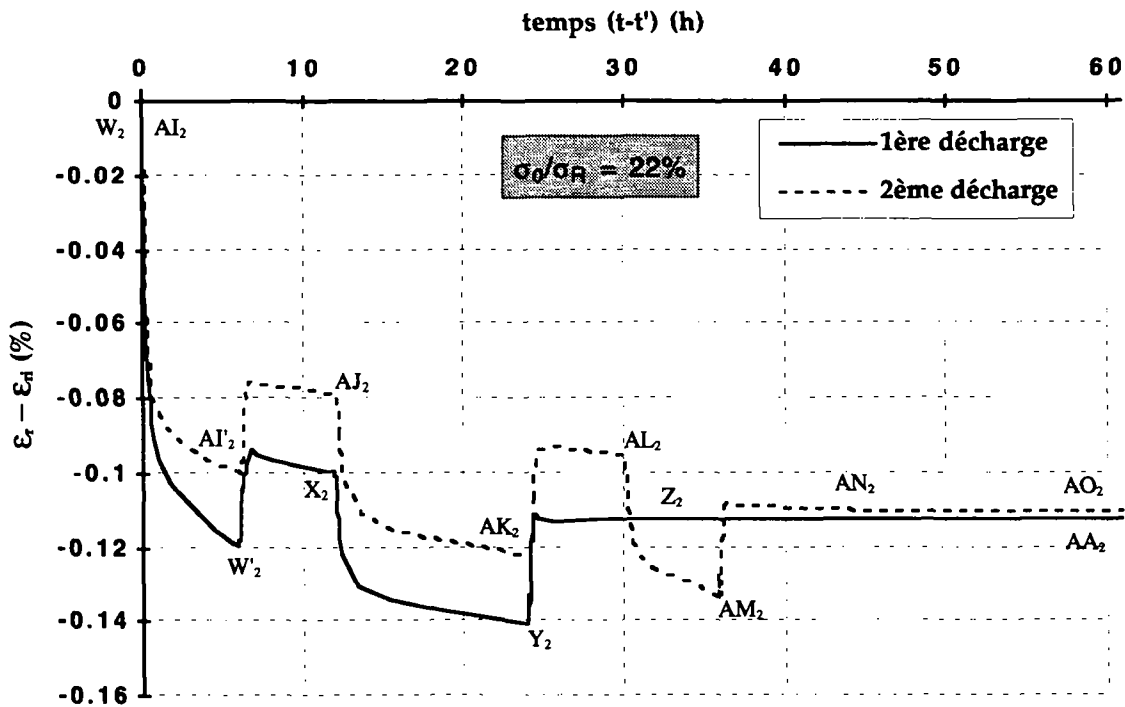


Figure II.8.13. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_{ri}$ lors des deux décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t-t_i)$ ($\epsilon_{r1} = \epsilon_{W_2}$ et $\epsilon_{r3} = \epsilon_{AI_2}$).

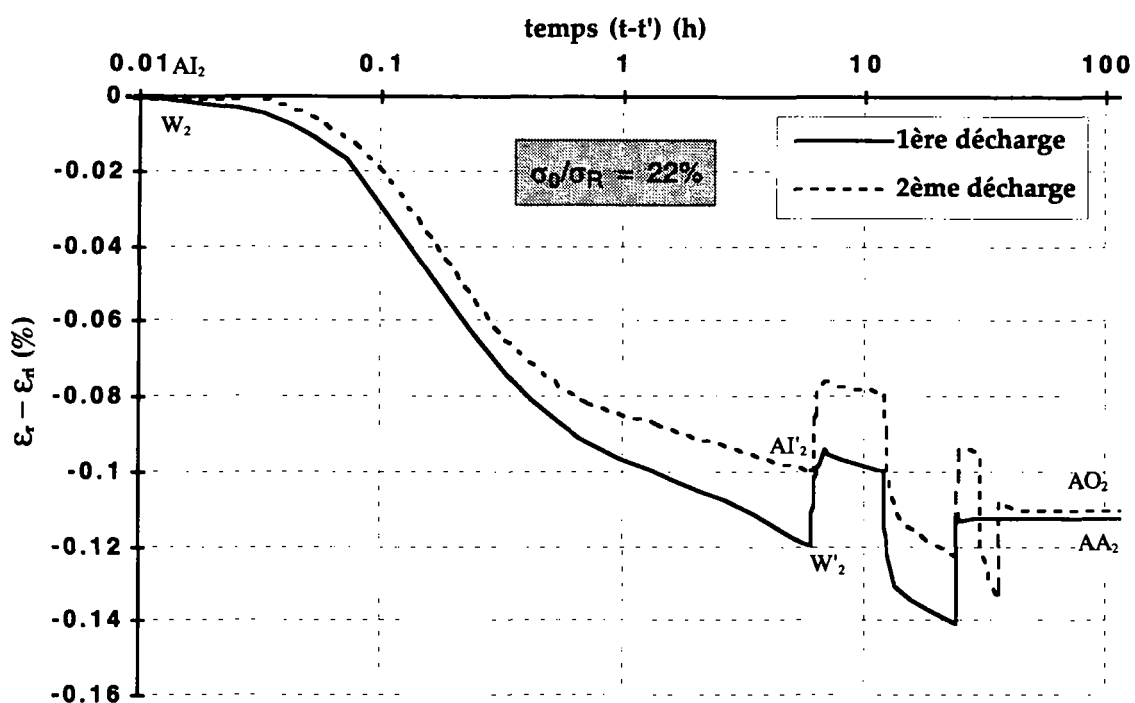


Figure II.8.14. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\varepsilon_r - \varepsilon_i$ lors des deux décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log(t - t_i)$.

On observe, en ce qui concerne la déformation ε_r , que:

★ la *première absorption*, qui intervient après suppression de la charge, est, dans les deux cas, celle qui entraîne la *plus grande diminution de la déformation* (augmentation de la recouvrance):

- ◆ Au point W_2 , après la première décharge, l'amplitude de la déformation est d'environ 1.95 fois la déformation ε_{inst} . Elle diminue à 1.34 fois ε_{inst} après la première absorption ($W_2W'_2$). Donc $\Delta\varepsilon_{rW_2W'_2} \approx -0.61\varepsilon_{inst}$.
- ◆ Au point AI_2 , après le deuxième décharge, l'amplitude de la déformation est d'environ 1.96 fois ε_{inst} . Elle diminue à 1.45 fois ε_{inst} après la première absorption ($AK_2AK'_2$). Donc $\Delta\varepsilon_{rAI_2AI'_2} \approx -0.51\varepsilon_{inst} \approx 0.84\Delta\varepsilon_{rW_2W'_2}$.

- ★ les absorptions suivantes entraînent, dans tous les cas, une *diminution* de la déformation: (X₂Y₂) après la première décharge ainsi que (AJ₂AK₂) et (AL₂AM₂) lors de la deuxième.
- ★ les désorptions entraînent, dans tous les cas, une *augmentation* de la déformation: (W'₂X₂), (Y₂Z₂) lors de la première décharge ainsi que (AI'₂AJ₂), (AK₂AL₂) et (AM₂AN₂) lors de la deuxième.
- ★ une *déformation permanente* ε_p est mise en évidence après décharge totale avec variations hydriques. Une comparaison entre les points AA₂ et AO₂ semble montrer que, comme précédemment, une fois ε_p atteinte, la déformation mesurée lors de la répétition d'un cycle de charge et décharge avec variations d'humidité entre les mêmes paliers est réversible. En effet, au point AA₂, la recouvrance mesurée est d'environ 1.37 fois ε_{inst} . Elle est d'environ 1.40 fois ε_{inst} au point AO₂.

II.8.3 COMPARAISON DES DEUX ESSAIS

Pour permettre une comparaison des deux essais, dans les parties successives de charge, la déformation par unité de contrainte $\Gamma(t)$ a été calculée. Elle est définie selon (II.8.1).

$$\Gamma(t) = \frac{\varepsilon_r(t)}{\sigma_0} \quad (\text{II.8.1})$$

avec σ_0 : contrainte appliquée lors de la charge.

L'analyse des résultats dans les diverses parties est donnée ci-dessous.

II.8.3.1 PREMIÈRE PARTIE DE CHARGE

Sur les figures II.8.15 à II.8.17 sont représentées les déformations rapportées à l'unité de contrainte Γ , relatives aux deux essais, pour la première partie de charge.

Une translation $(t - t_1^i)$ a été effectuée sur l'axe des temps de manière à ce que les instants t_1^i où débute le cyclage hydrique coïncident. Ces instants correspondent respectivement à $t_1(12\%)$ et $t_1(22\%)$. La figure II.8.15 représente Γ en fonction du temps $(t - t_1^i)$.

Une translation $(\Gamma - \Gamma_i)$ a été effectuée ensuite sur l'axe des ordonnées, de manière à ce que les Γ_i correspondant à l'instant où débute le cyclage coïncident. Ces déformations par unité de contrainte correspondent respectivement à Γ_{B_1} et Γ_{B_2} . La quantité $(\Gamma - \Gamma_i)$ est représentée en

fonction du temps $(t - t_j^i)$ en échelle linéaire sur la figure II.8.16 et en échelle logarithmique sur la figure II.8.17.

Les tableaux II.8.11 et II.8.12 contiennent l'ensemble des valeurs de Γ aux points notés B₁ à M₁, figure II.8.1.C et B₂ à M₂, figure II.8.8.C ainsi que les variations de Γ dans chacun des segments B₁B'₁ à L₁M₁ et B₂B'₂ à L₂M₂.

notations	Γ_{B_1}	$\Gamma_{B'_1}$	Γ_{C_1}	Γ_{D_1}	Γ_{E_1}	Γ_{F_1}	Γ_{G_1}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	1.23	1.88	1.98	2.08	2.21	2.22	2.36
notations	Γ_{H_1}	Γ_{I_1}	Γ_{J_1}	Γ_{K_1}	Γ_{L_1}	Γ_{M_1}	
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	2.39	2.49	2.50	2.59	2.58	2.68	

notations	Γ_{B_2}	$\Gamma_{B'_2}$	Γ_{C_2}	Γ_{D_2}	Γ_{E_2}	Γ_{F_2}	Γ_{G_2}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	1.28	1.87	2.13	2.16	2.39	2.33	2.58
notations	Γ_{H_2}	Γ_{I_2}	Γ_{J_2}	Γ_{K_2}	Γ_{L_2}	Γ_{M_2}	
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	2.46	2.66	2.55	2.78	2.69	2.90	

Tableau II.8.11. Valeurs de Γ correspondant aux points B₁ à M₁, figure II.8.1.C et B₂ à M₂, figure II.8.8.C.

notations	$\Delta\Gamma_{B_1B'_1}$	$\Delta\Gamma_{B'_1C_1}$	$\Delta\Gamma_{C_1D_1}$	$\Delta\Gamma_{D_1E_1}$	$\Delta\Gamma_{E_1F_1}$	$\Delta\Gamma_{F_1G_1}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	0.65	0.11	0.10	0.13	0.02	0.13
notations	$\Delta\Gamma_{G_1H_1}$	$\Delta\Gamma_{H_1I_1}$	$\Delta\Gamma_{I_1J_1}$	$\Delta\Gamma_{J_1K_1}$	$\Delta\Gamma_{K_1L_1}$	$\Delta\Gamma_{L_1M_1}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	0.03	0.11	0.00	0.09	0.00	0.10

notations	$\Delta\Gamma_{B_2B'_2}$	$\Delta\Gamma_{B'_2C_2}$	$\Delta\Gamma_{C_2D_2}$	$\Delta\Gamma_{D_2E_2}$	$\Delta\Gamma_{E_2F_2}$	$\Delta\Gamma_{F_2G_2}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	0.59	0.27	0.02	0.24	-0.06	0.25
notations	$\Delta\Gamma_{G_2H_2}$	$\Delta\Gamma_{H_2I_2}$	$\Delta\Gamma_{I_2J_2}$	$\Delta\Gamma_{J_2K_2}$	$\Delta\Gamma_{K_2L_2}$	$\Delta\Gamma_{L_2M_2}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.12	0.21	-0.12	0.24	-0.10	0.22

Tableau II.8.12. Valeurs de Γ correspondant aux points segments B₁B'₁ à L₁M₁ et B₂B'₂ à L₂M₂.

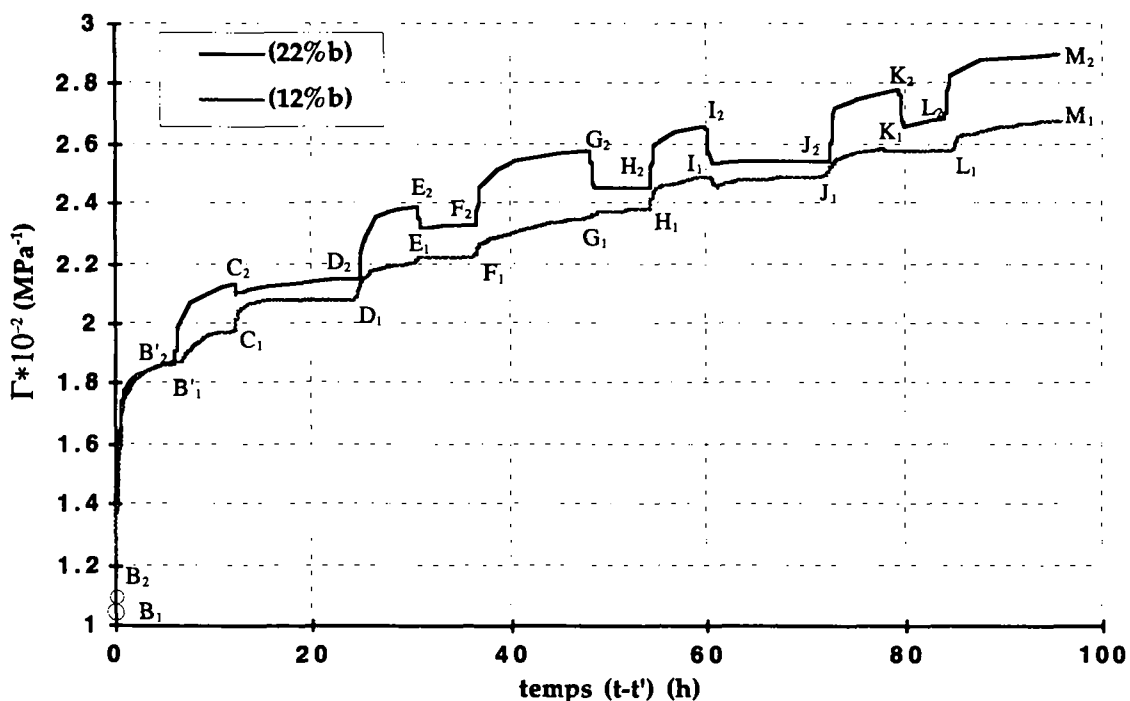


Figure II.8.15. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation par unité de contrainte Γ lors des deux premières charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_i^1)$ ($t_i^1 = t_1(12\%)$ et $t_i^2 = t_1(22\%)$).

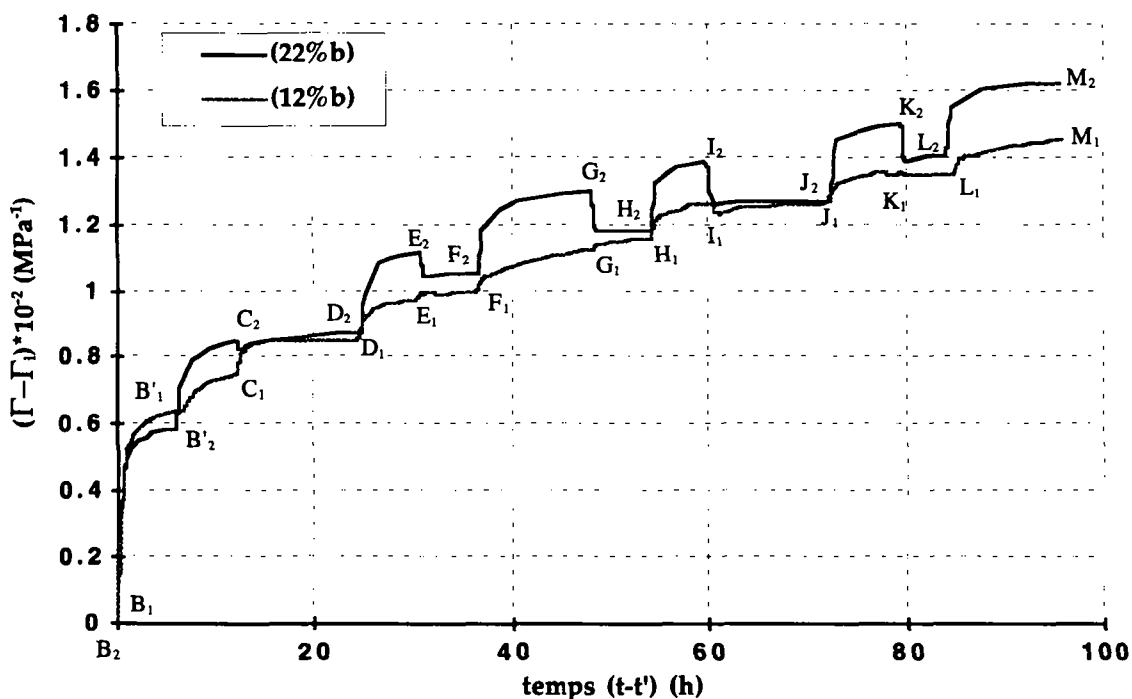


Figure II.8.16. Comparaison entre les résultats obtenus pour $(\Gamma - \Gamma_i)$ lors des deux premières charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_i^i)$ ($\Gamma_1 = \Gamma_{B_1}$ et $\Gamma_2 = \Gamma_{B_2}$).

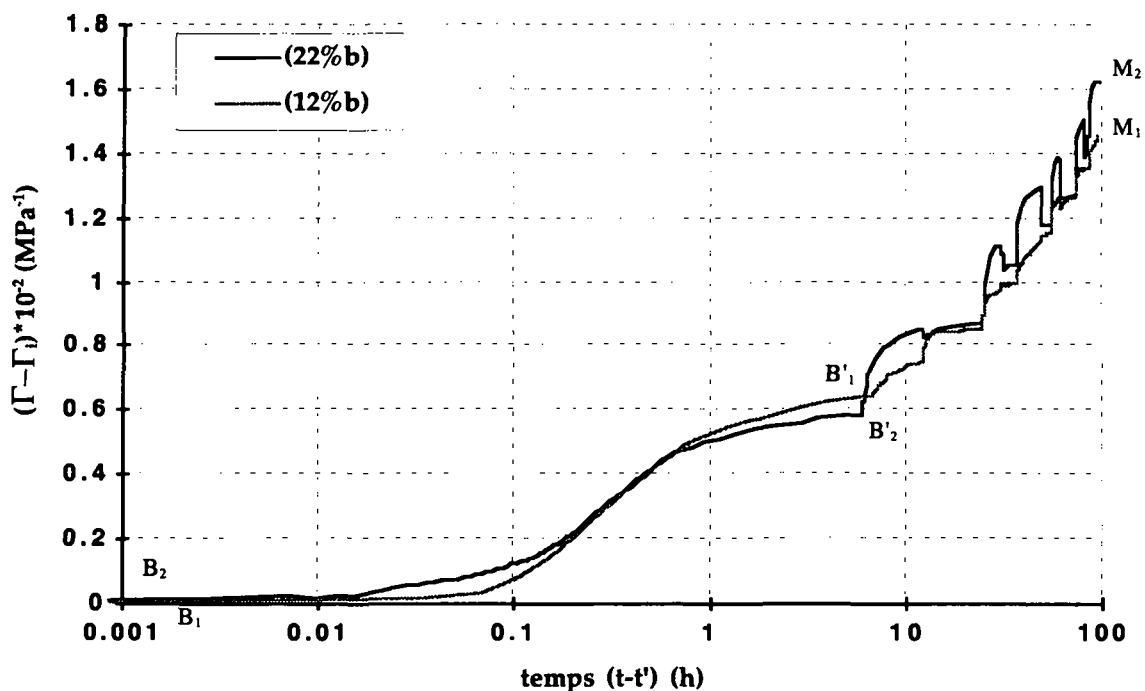


Figure II.8.17. Comparaison entre les résultats obtenus pour la $(\Gamma - \Gamma_i)$ lors des deux premières charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log(t - t_i)$.

On observe, en ce qui concerne la déformation par unité de contrainte Γ , que:

- ★ les valeurs de Γ calculées entre B₁ et B'₁, respectivement B₂ et B'₂ - correspondant à la réponse obtenue lors de la première absorption après application de la charge - sont d'amplitude très proches. En effet, $\Delta\Gamma_{B_2B'_2} = 0.91\Delta\Gamma_{B_1B'_1}$. Cela signifierait que l'augmentation de la déformation ε_r , engendrée lors de la première absorption semble être proportionnelle au niveau de charge appliquée.
- ★ lors des changements d'humidité suivants, on constate que:
 - ◆ pour le niveau de charge le plus bas (12%), les absorptions entraînent d'abord une augmentation de Γ par petits paliers: (C₁D₁), (E₁F₁) et (G₁H₁). Ce n'est qu'à partir du 5ème cycle hydrique qu'une diminution de Γ (I₁J₁), au début de la phase d'absorption.
 - ◆ pour le niveau de charge plus élevé (22%), par contre, l'absorption entraîne dans tous les cas une diminution de Γ .
 - ◆ dans les deux essais - pour les deux niveaux de charge considérés - les désorptions entraînent, dans tous les cas, une augmentation de Γ .

- ◆ l'effet des cycles hydriques est plus marqué pour le niveau de charge élevé. Les oscillations de la déformation par unité de contrainte induites par les cyclages hydriques sont d'amplitude plus élevées.
- ★ Il semble donc que l'allure répétitive de la réponse obtenue, comme remarquée dans les paragraphes II.8.1.2 et II.8.2.2, se dessine après plusieurs cycles de variation d'humidité relative, ceci dépendant du niveau de sollicitation appliqué.
- ★ l'augmentation de la vitesse de déformation ε_r , engendrée par des variations cycliques d'humidité relative, de même période et de même amplitude, semble être comparable, que le niveau de charge appliquée soit de 12% ou 22%.

II.8.3.2 DEUXIÈME PARTIE DE CHARGE

Sur les figures II.8.18 à II.8.20 sont représentées les déformation par unité de contraintes Γ , relatives aux deux essais, pour la deuxième partie de charge.

Comme précédemment, une translation $(t - t_4^i)$ a été effectuée sur l'axe des temps de manière à ce que les instants t_4^i où débute le cyclage hydrique coïncident. Ces instants correspondent respectivement à $t_4(12\%)$ et $t_4(22\%)$. La figure II.8.18 représente la déformation par unité de contrainte Γ en fonction du temps $(t - t_4^i)$. Une translation $(\Gamma - \Gamma_i)$ a été effectuée ensuite sur l'axe des ordonnées, de manière à ce que les Γ_i à l'instant où débute le cyclage coïncident. Ces déformation par unité de contraintes correspondent respectivement à Γ_{B_1} et Γ_{B_2} . La déformation par unité de contrainte $(\Gamma - \Gamma_i)$ est représentée en fonction du temps $(t - t_4^i)$ en échelle linéaire sur la figure II.8.19 et en échelle logarithmique sur la figure II.8.20.

Les tableaux II.8.31 et II.8.32 contiennent l'ensemble des valeurs de Γ aux points notés P₁ à U₁, figure II.8.24.C et P₂ à U₂, figure II.8.29.C ainsi que les variations de Γ dans chacun des segments P₁P'₁ à T₁U₁ et P₂P'₂ à T₂U₂.

notations	Γ_{P_1}	$\Gamma_{P'_1}$	Γ_{Q_1}	Γ_{R_1}	Γ_{S_1}	Γ_{T_1}	Γ_{U_1}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	2.41	2.68	2.80	2.75	2.86	2.84	2.91

notations	Γ_{P_2}	$\Gamma_{P'_2}$	Γ_{Q_2}	Γ_{R_2}	Γ_{S_2}	Γ_{T_2}	Γ_{U_2}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	2.61	2.78	2.98	2.85	3.05	2.91	3.09

Tableau II.8.31. Valeurs de Γ correspondant aux points P₁ à U₁, figure II.8.24.C et P₂ à U₂, figure II.8.29.C.

notations	$\Delta\Gamma_{P_1P'_1}$	$\Delta\Gamma_{P'_1Q_1}$	$\Delta\Gamma_{Q_1R_1}$	$\Delta\Gamma_{R_1S_1}$	$\Delta\Gamma_{S_1T_1}$	$\Delta\Gamma_{T_1U_1}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	0.27	0.12	-0.05	0.11	-0.02	0.06

notations	$\Delta\Gamma_{P_2P'_2}$	$\Delta\Gamma_{P'_2Q_2}$	$\Delta\Gamma_{Q_2R_2}$	$\Delta\Gamma_{R_2S_2}$	$\Delta\Gamma_{S_2T_2}$	$\Delta\Gamma_{T_2U_2}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	0.17	0.20	-0.14	0.20	-0.14	0.18

Tableau II.8.32. Valeurs de Γ correspondant aux segments $P_1P'_1$ à T_1U_1 et $P_2P'_2$ à T_2U_2 .

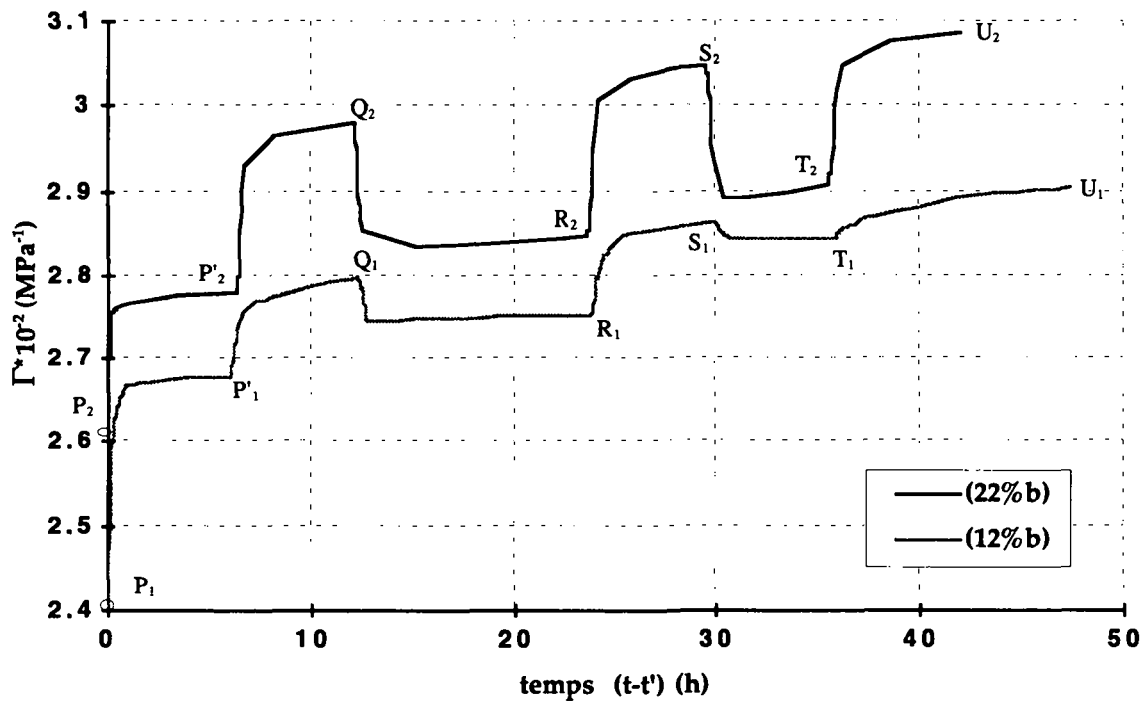


Figure II.8.18. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation par unité de contrainte Γ lors des deuxièmes charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t-t_4^i)$ ($t_4^1 = t_4(12\%)$ et $t_4^2 = t_4(22\%)$).

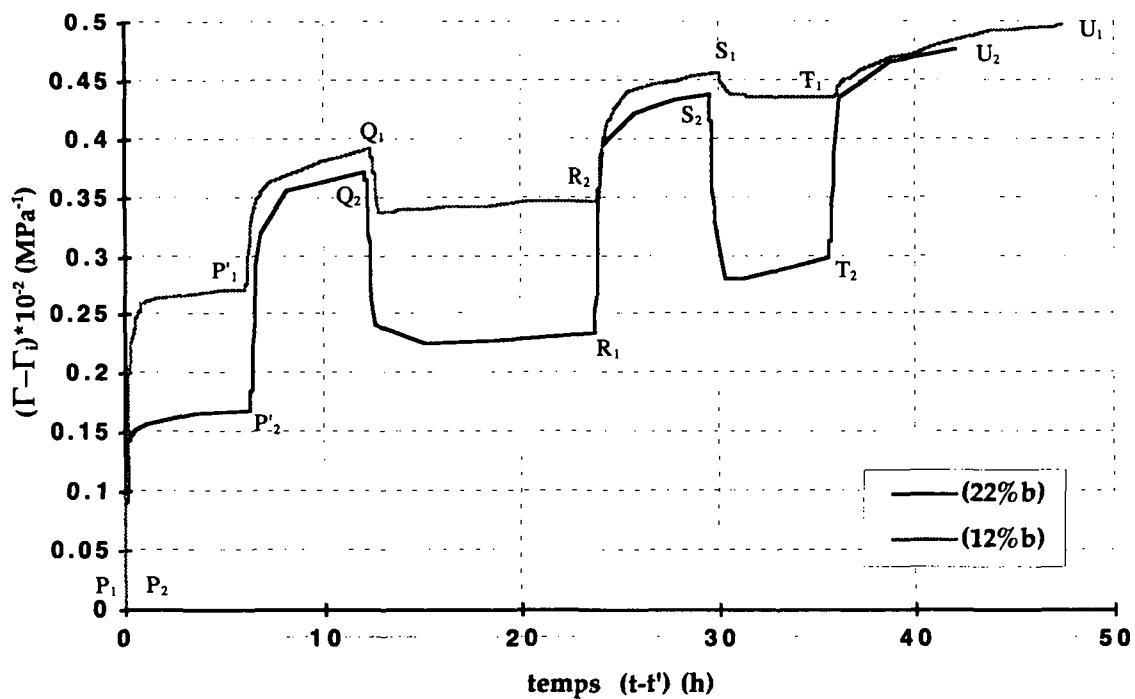


Figure II.8.19. Comparaison entre les résultats obtenus pour $(\Gamma - \Gamma_i)$ lors des deuxièmes charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_4^i)$ ($\Gamma_1 = \Gamma_{P_1}$ et $\Gamma_2 = \Gamma_{P_2}$).

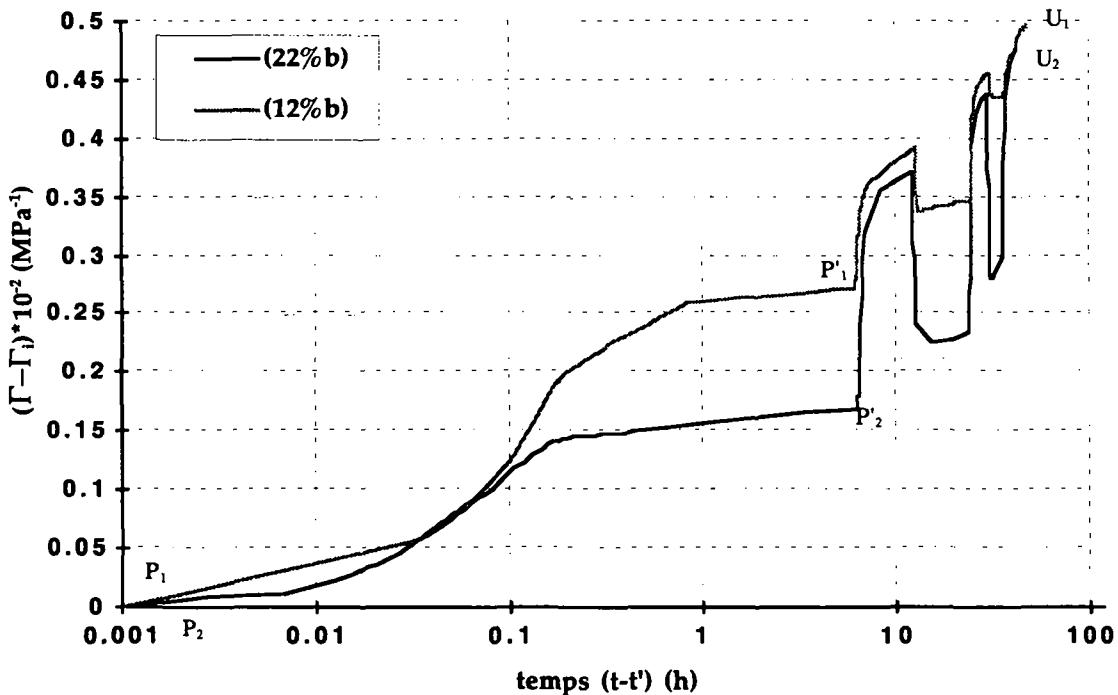


Figure II.8.20. Comparaison entre les résultats obtenus pour $(\Gamma - \Gamma_i)$ lors des deuxièmes charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log(t - t_4^i)$.

On observe, en ce qui concerne la déformation par unité de contrainte Γ , que:

- ★ lors de la première absorption, les amplitudes $\Delta\Gamma_{P_1P'_1}$ et $\Delta\Gamma_{P_2P'_2}$, relatives aux deux niveaux de charge, ne sont pas comparables. En effet, $\Delta\Gamma_{P_1P'_1} \approx 0.63 \Delta\Gamma_{P_2P'_2}$. L'augmentation de Γ est donc plus importante dans le cas où le niveau de contrainte est le plus faible (12%).
- ★ lors des changements d'humidité suivants, on constate que:
 - ◆ une absorption entraîne, dans tous les cas, une diminution de Γ ;
 - ◆ une désorption entraîne, dans tous les cas, une augmentation Γ .

Il semblerait que le matériau ait conservé une mémoire des variations cycliques hydriques précédentes, imposées durant la première charge. En effet, on peut observer que, dès le deuxième changement d'humidité que:

- ◆ l'augmentation de Γ engendrée lors d'une désorption est d'amplitude très proche de celle mesurée lors de la dernière désorption, durant la charge précédente ($\Delta\Gamma_{L_1M_1} = 0.10 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1} \approx \Delta\Gamma_{P'_1Q_1}$ e t $\Delta\Gamma_{L_2M_2} = 0.22 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1} \approx \Delta\Gamma_{P'_2Q_2}$);
- ◆ la diminution de déformation engendrée lors d'une absorption est d'amplitude légèrement plus élevée que celle mesurée lors de la dernière absorption, durant la charge précédente.

L'allure des oscillations de déformation engendrées par les cycles hydriques, lors de la deuxième charge, semblent donc être, comme précédemment, répétitive.

L'histoire de la teneur en eau pourrait également être à l'origine de l'observation effectuée lors de la première absorption, puisque nous avons vu au paragraphe II.8.3.1 qu'une différence existait entre les deux niveaux de charge en ce qui concernait le nombre de cycles hydriques à effectuer avant d'obtenir une allure répétitive de la déformation par unité de contrainte. Le programme de chargement est, quant à lui parfaitement similaire pour les deux essais, de même que l'instant de mise en route des cycles hydriques après la deuxième charge ($\Delta t_4(12\%) = \Delta t_4(22\%) = 5 \text{ minutes}$).

- ★ on peut remarquer à nouveau une similarité entre la vitesse de déformation ε_r , pour les deux niveaux de charge.

II.8.3.3 PREMIÈRE PARTIE DE DÉCHARGE AVEC VARIATION HYDRIQUE

Sur les figures II.8.21 à II.8.23 sont représentées les déformations rapportées à l'unité de contrainte Γ , relatives aux deux essais, pour la première partie de décharge avec variations hydriques. Une translation $(t - t_6^i)$ a été effectuée sur l'axe des temps de manière à ce que les instants t_6^i où débute le cyclage hydrique coïncident. Ces instants correspondent respectivement à $t_6(12\%)$ et $t_6(22\%)$. La figure II.8.21 représente Γ en fonction du temps $(t - t_6^i)$. Une translation $(\Gamma - \Gamma_i)$ a été effectuée ensuite sur l'axe des ordonnées, de manière à ce que les Γ_i correspondant à l'instant où débute le cyclage coïncident. Ces déformations par unité de contrainte correspondent respectivement à Γ_{W_1} et Γ_{W_2} . La quantité $(\Gamma - \Gamma_i)$ est représentée en fonction du temps $(t - t_6^i)$ en échelle linéaire sur la figure II.8.22 et en échelle logarithmique sur la figure II.8.23.

Les tableaux II.8.33 et II.8.34 contiennent l'ensemble des valeurs de Γ aux points notés W_1 à AC_1 , figure II.8.24.C et W_2 à AA_2 , figure II.8.29.C ainsi que les variations de Γ dans chacun des segments $W_1W'_1$ à AB_1AC_1 et $W_2W'_2$ à Z_2AA_2 .

notations	Γ_{W_1}	$\Gamma_{W'_1}$	Γ_{X_1}	Γ_{Y_1}	Γ_{Z_1}	Γ_{AA_1}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	1.64	1.24	1.26	1.12	1.17	1.11
notations	Γ_{AB_1}	Γ_{AC_1}				
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	1.13	1.13				

notations	Γ_{W_2}	$\Gamma_{W'_2}$	Γ_{X_2}	Γ_{Y_2}	Γ_{Z_2}	Γ_{AA_2}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	1.91	1.32	1.41	1.21	1.35	1.35

Tableau II.8.33 Valeurs de Γ correspondant aux points W_1 à AC_1 , figure II.8.24.C et W_2 à AA_2 , figure II.8.29.C.

notations	$\Delta\Gamma_{W_1W'_1}$	$\Delta\Gamma_{W'_1X_1}$	$\Delta\Gamma_{X_1Y_1}$	$\Delta\Gamma_{Y_1Z_1}$	$\Delta\Gamma_{Z_1AA_1}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.40	0.02	-0.14	0.06	-0.07
notations	$\Delta\Gamma_{AA_1AB_1}$	$\Delta\Gamma_{AB_1AC_1}$			
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	0.02	0.00			

notations	$\Delta\Gamma_{W_2W'_2}$	$\Delta\Gamma_{W'_2X_2}$	$\Delta\Gamma_{X_2Y_2}$	$\Delta\Gamma_{Y_2Z_2}$	$\Delta\Gamma_{Z_2AA_2}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.60	0.10	-0.20	0.14	0.00

Tableau II.8.34. Valeurs de Γ correspondant aux segments $W_1W'_1$ à AB_1AC_1 et $W_2W'_2$ à Z_2AA_2 .

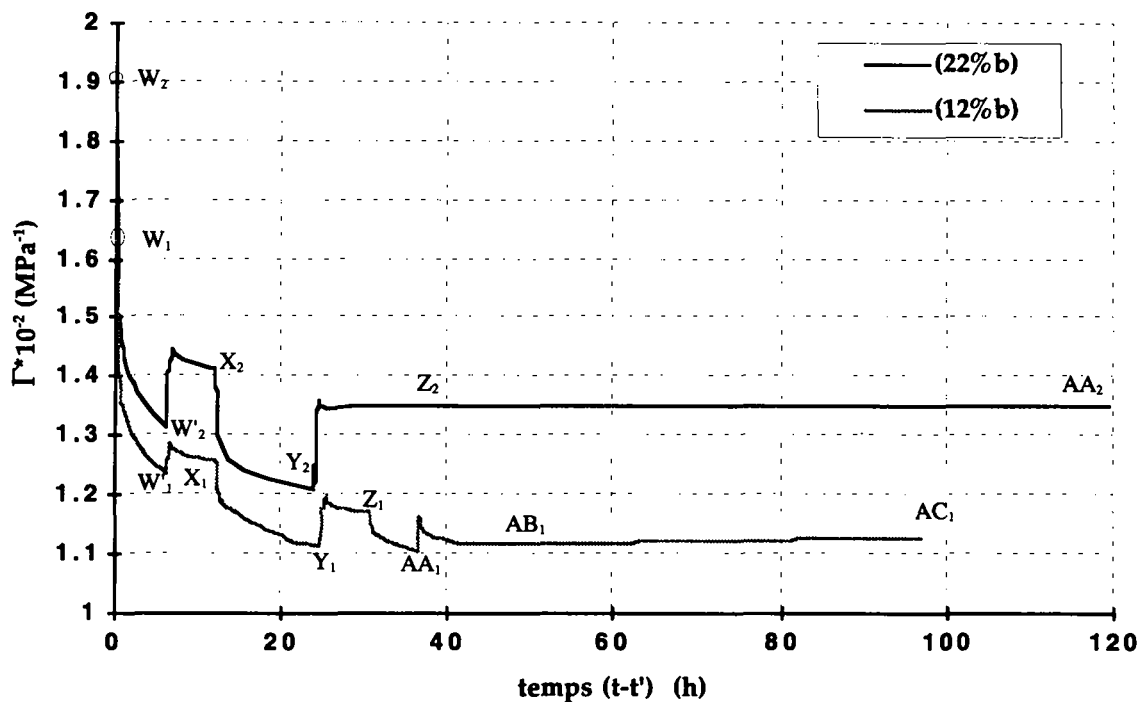


Figure II.8.21 Comparaison entre les résultats obtenus pour Γ lors des deux premières décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_6^i)$ ($t_6^1 = t_6(12\%)$ et $t_6^2 = t_6(22\%)$).

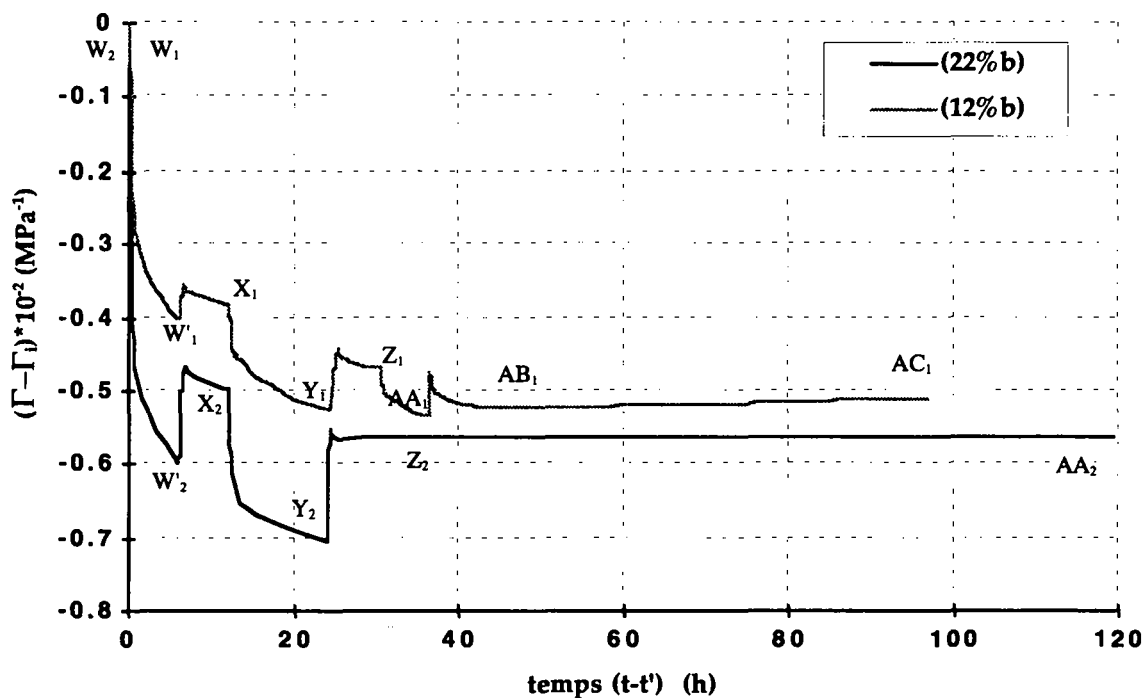


Figure II.8.22. Comparaison entre les résultats obtenus pour $(\Gamma - \Gamma_i)$ lors des deux premières décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_6^i)$ ($\Gamma_1 = \Gamma_{W_1}$ et $\Gamma_2 = \Gamma_{W_2}$).

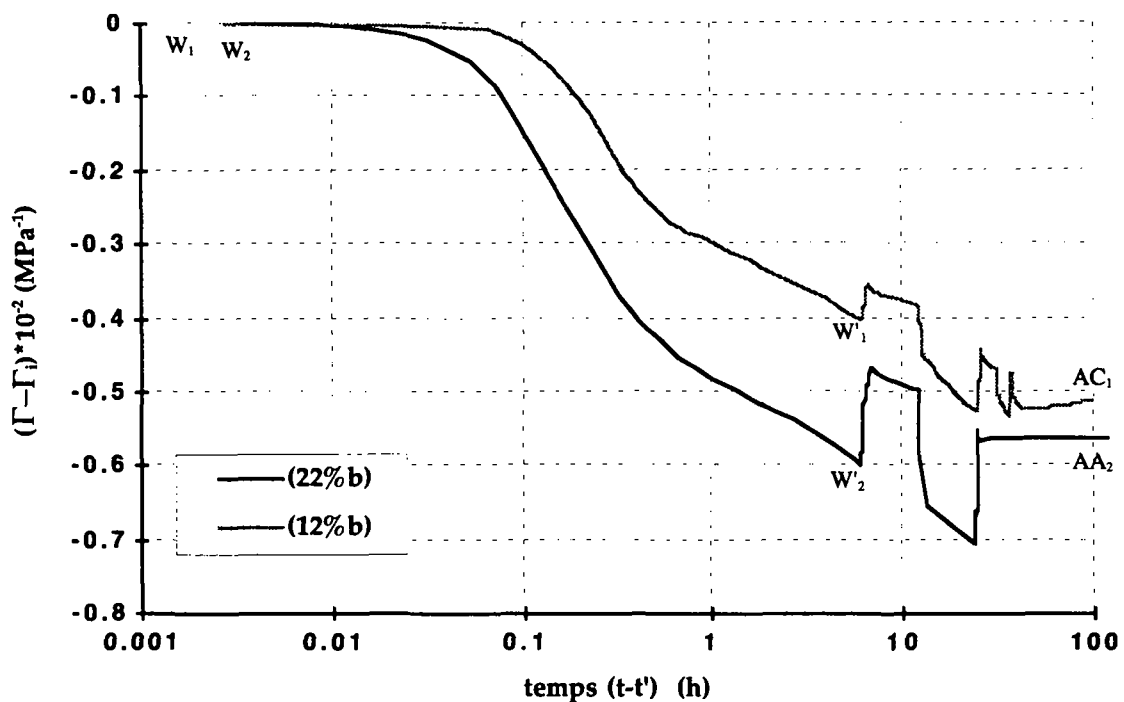


Figure II.8.23 Comparaison entre les résultats obtenus pour $(\Gamma - \Gamma_i)$ lors des deux premières charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log(t - t_0^i)$.

On constate, en ce qui concerne la déformation par unité de contrainte Γ , que:

- ★ lors de la première absorption, les valeurs de Γ calculées dans chacun des segments $W_1W'_1$ et $W_2W'_2$ sont telles que: $\Delta\Gamma_{W_2W'_2} \approx 0.67 \Delta\Gamma_{W_1W'_1}$. L'amplitude de la déformation par unité de contrainte diminue de manière plus importante dans le cas où le niveau de charge appliquée est de 22%. Une partie de cette différence pourrait être liée au fait que le délai de mise en route des cycles hydriques soit différent pour les deux essais - $\Delta t_0(12\%) = 6h15$; $\Delta t_0(22\%) = 24h$, voir chapitre II.7.
- ★ lors des changements d'humidité relative suivants, on retrouve des oscillations de Γ d'amplitude importante avec:
 - ◆ une nouvelle diminution de Γ lors des absorptions;
 - ◆ une ré-augmentation de Γ lors des désorptions.

II.8.3.4 TROISIÈME PARTIE DE CHARGE

Sur les figures II.8.24 à II.8.26 sont représentées les déformations rapportées à l'unité de contrainte Γ , relatives aux deux essais, pour la troisième partie de charge.

Une translation $(t - t_8^i)$ a été effectuée sur l'axe des temps de manière à ce que les instants t_8^i où débute le cyclage hydrique coïncident. Ces instants correspondent respectivement à $t_8(12\%)$ et $t_8(22\%)$. La figure II.8.24 représente Γ en fonction du temps $(t - t_8^i)$.

Une translation $(\Gamma - \Gamma_i)$ a été effectuée ensuite sur l'axe des ordonnées, de manière à ce que les Γ_i correspondant à l'instant où débute le cyclage coïncident. Ces déformations par unité de contrainte correspondent respectivement à Γ_{AD_1} et Γ_{AB_2} . La quantité $(\Gamma - \Gamma_i)$ est représentée en fonction du temps $(t - t_8^i)$ en échelle linéaire sur la figure II.8.25 et en échelle logarithmique sur la figure II.8.26.

Les tableaux II.8.35 et II.8.36 contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation par unité de contrainte aux points notés AD_1 à AI_1 , figure II.8.24.C et AB_2 à AG_2 , figure II.8.29.C ainsi que les variations de Γ dans chacun des segments $AD_1AD'_1$ à AH_1AI_1 et $AB_2AB'_2$ à AF_2AG_2 .

notations	Γ_{AD_1}	$\Gamma_{AD'_1}$	Γ_{AE_1}	Γ_{AF_1}	Γ_{AG_1}	Γ_{AH_1}	Γ_{AI_1}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	2.16	2.70	2.81	2.79	2.92	2.88	2.97

notations	Γ_{AB_2}	$\Gamma_{AB'_2}$	Γ_{AC_2}	Γ_{AD_2}	Γ_{AE_2}	Γ_{AF_2}	Γ_{AG_2}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	2.35	2.77	3.03	2.89	3.11	2.97	3.17

Tableau II.8.34 Valeurs de Γ correspondant aux points AD_1 à AI_1 , figure II.8.24.C et AB_2 à AG_2 , figure II.8.29.C.

notations	$\Delta\Gamma_{AD_1AD'_1}$	$\Delta\Gamma_{AD'_1AE_1}$	$\Delta\Gamma_{AE_1AF_1}$	$\Delta\Gamma_{AF_1AG_1}$	$\Delta\Gamma_{AG_1AH_1}$	$\Delta\Gamma_{AH_1AI_1}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	0.54	0.12	-0.03	0.13	-0.05	0.09

notations	$\Delta\Gamma_{AB_2AB'_2}$	$\Delta\Gamma_{AB'_2AC_2}$	$\Delta\Gamma_{AC_2AD_2}$	$\Delta\Gamma_{AD_2AE_2}$	$\Delta\Gamma_{AE_2AF_2}$	$\Delta\Gamma_{AF_2AG_2}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	0.43	0.25	-0.13	0.21	-0.14	0.20

Tableau II.8.36. Valeurs de Γ correspondant aux segments $AD_1AD'_1$ à AH_1AI_1 et $AB_2AB'_2$ à AF_2AG_2 .

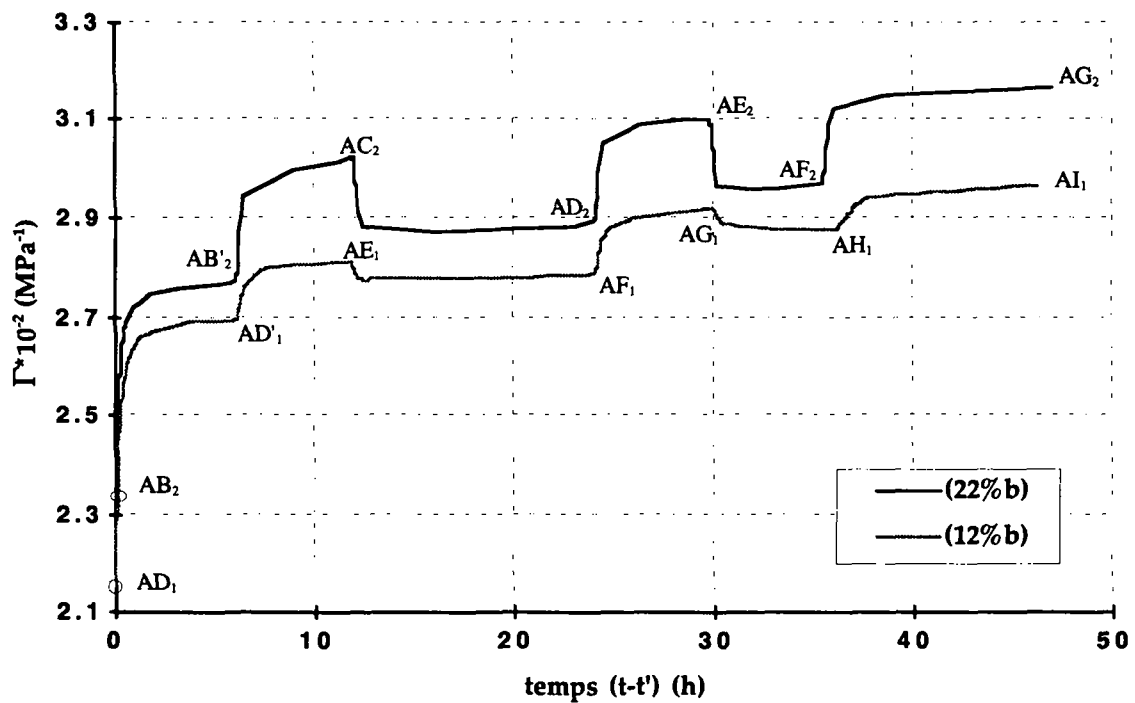


Figure II.8.24. Comparaison entre les résultats obtenus pour Γ lors des troisièmes charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_8^i)$ ($t_8^1 = t_8(12\%)$ et $t_8^2 = t_8(22\%)$).

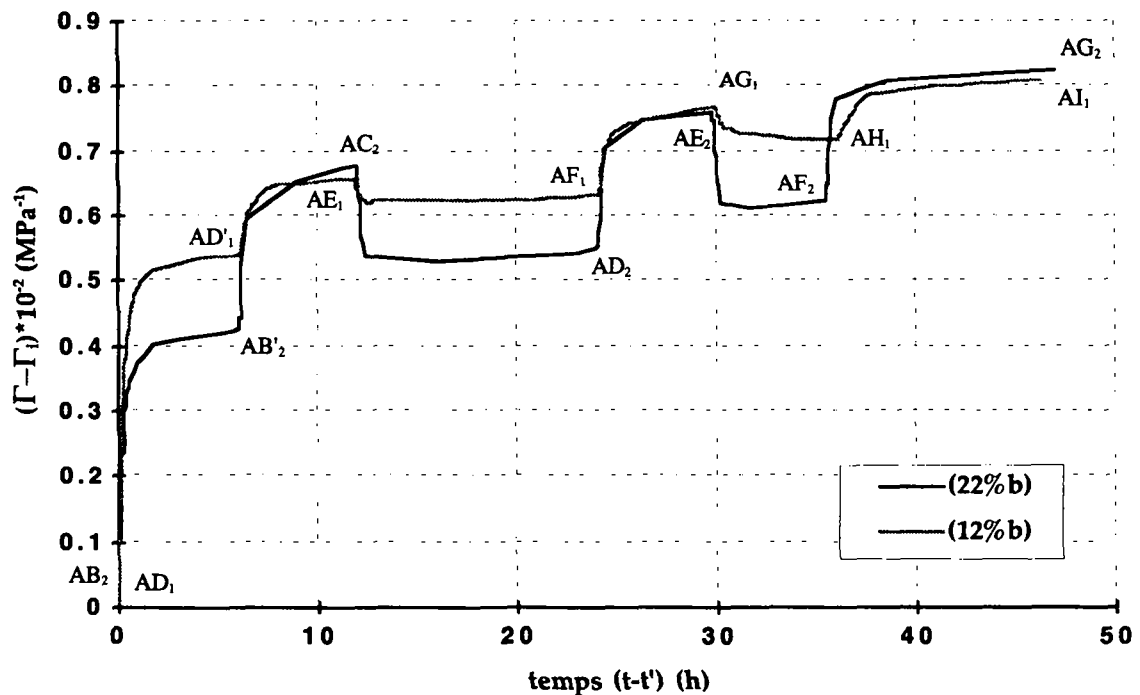


Figure II.8.25. Comparaison entre les résultats obtenus pour $(\Gamma - \Gamma_i)$ lors des troisièmes charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_8^i)$ ($\Gamma_1 = \Gamma_{AD_1}$ et $\Gamma_2 = \Gamma_{AB_2}$).

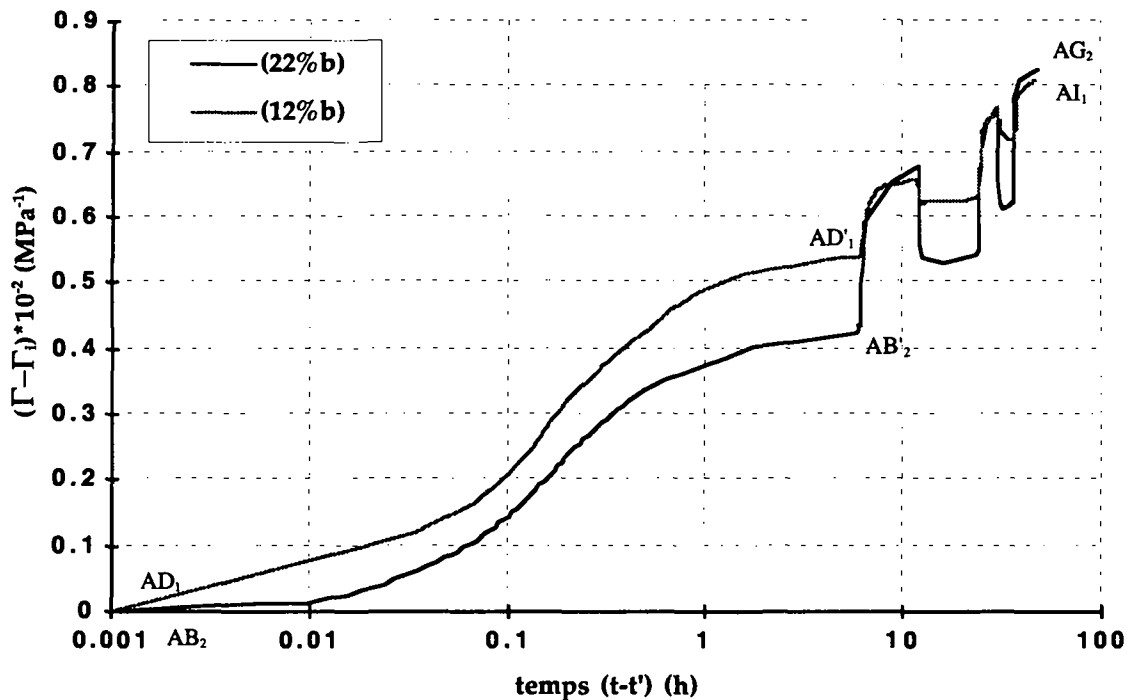


Figure II.8.26. Comparaison entre les résultats obtenus pour $(\Gamma - \Gamma_i)$ lors des troisièmes charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log(t - t_8^i)$.

On observe, en ce qui concerne la déformation par unité de contrainte Γ , que:

- ★ lors de la première absorption, les amplitudes de Γ relativement aux deux niveaux de charge sont telles que $\Delta\Gamma_{AD_1,AD'_1} = 0.80 \Delta\Gamma_{AB_2,AB'_2}$. Cette différence ne peut s'expliquer de manière rigoureuse puisque les variations hydriques imposées lors des décharges précédentes ne sont pas similaires, au niveau des instants de mise en route et du nombre de cycles.
- ★ lors des changements d'humidité suivants, on retrouve les remarques données au paragraphe II.8.3.3 en ce qui concerne l'amplitude et l'allure des oscillations de Γ engendrées lors d'une absorption ou d'une désorption.
- ★ la vitesse de déformation ε , engendrée par des variations cycliques d'humidité relative semble être comparable, que le niveau de charge appliquée soit de 12% ou 22%.

II.8.3.5 TROISIÈME PARTIE DE DÉCHARGE AVEC VARIATION HYDRIQUE

Sur les figures II.8.27 à II.8.29 sont représentées les déformations rapportées à l'unité de contrainte Γ , relatives aux deux essais, pour la deuxième partie de décharge avec variations hydriques.

Une translation $(t - t_{10}^i)$ a été effectuée sur l'axe des temps de manière à ce que les instants t_{10}^i où débute le cyclage hydrique coïncident. Ces instants correspondent respectivement à $t_{10}(12\%)$ et $t_{10}(22\%)$. La figure II.8.27 représente Γ en fonction du temps $(t - t_{10}^i)$.

Une translation $(\Gamma - \Gamma_i)$ a été effectuée ensuite sur l'axe des ordonnées, de manière à ce que les Γ_i correspondant à l'instant où débute le cyclage coïncident. Ces déformations par unité de contrainte correspondent respectivement à Γ_{B_1} et Γ_{B_2} . La quantité $(\Gamma - \Gamma_i)$ est représentée en fonction du temps $(t - t_{10}^i)$ en échelle linéaire sur la figure II.8.28 et en échelle logarithmique sur la figure II.8.29.

Les tableaux II.8.37 et II.8.38 contiennent l'ensemble des valeurs de Γ aux points notés AK_1 à AQ_1 , figure II.8.24.C et AI_2 à AO_2 , figure II.8.29.C ainsi que les variations de la déformation par unité de contrainte dans chacun des segments $AK_1AK'_1$ à AP_1AQ_1 et $AI_2AI'_2$ à AN_2AO_2 .

notations	Γ_{AK_1}	$\Gamma_{AK'_1}$	Γ_{AL_1}	Γ_{AM_1}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	1.82	1.34	1.31	1.17
notations	Γ_{AN_1}	Γ_{AO_1}	Γ_{AP_1}	Γ_{AQ_1}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	1.24	1.17	1.23	1.22

notations	Γ_{AI_2}	$\Gamma_{AI'_2}$	Γ_{AJ_2}	Γ_{AK_2}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	1.93	1.43	1.54	1.32
notations	Γ_{AL_2}	Γ_{AM_2}	Γ_{AN_2}	Γ_{AO_2}
$\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	1.45	1.26	1.38	1.38

Tableau II.8.34 Valeurs de Γ correspondant aux points AK_1 à AQ_1 , figure II.8.24.C et AI_2 à AO_2 , figure II.8.29.C.

notations	$\Delta\Gamma_{AK_1AK'_1}$	$\Delta\Gamma_{AK'_1AL_1}$	$\Delta\Gamma_{AL_1AM_1}$	$\Delta\Gamma_{AM_1AN_1}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.48	-0.03	-0.14	0.06
notations	$\Delta\Gamma_{AN_1AO_1}$	$\Delta\Gamma_{AO_1AP_1}$	$\Delta\Gamma_{AP_1AQ_1}$	
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.07	0.06	-0.01	

notations	$\Delta\Gamma_{AI_2AI'_2}$	$\Delta\Gamma_{AI'_2AJ_2}$	$\Delta\Gamma_{AJ_2AK_2}$	$\Delta\Gamma_{AK_2AL_2}$
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.50	0.11	-0.22	0.13
notations	$\Delta\Gamma_{AL_2AM_2}$	$\Delta\Gamma_{AM_2AN_2}$	$\Delta\Gamma_{AN_2AO_2}$	
$\Delta\Gamma \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.19	0.12	-0.01	

Tableau II.8.36. Valeurs de Γ correspondant aux segments $AK_1AK'_1$ à AP_1AQ_1 et $AI_2AI'_2$ à AN_2AO_2 .

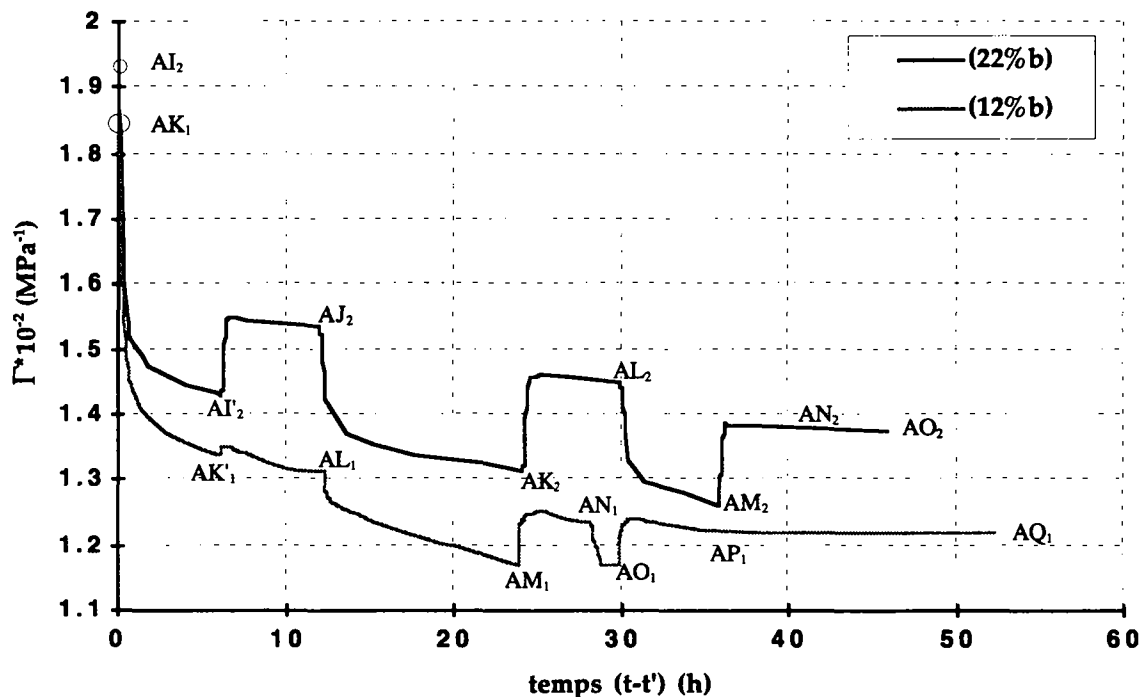


Figure II.8.27. Comparaison entre les résultats obtenus pour Γ lors des troisièmes décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t_{10}^i)$ ($t_{10}^1 = t_{10}(12\%)$ et $t_{10}^2 = t_{10}(22\%)$).

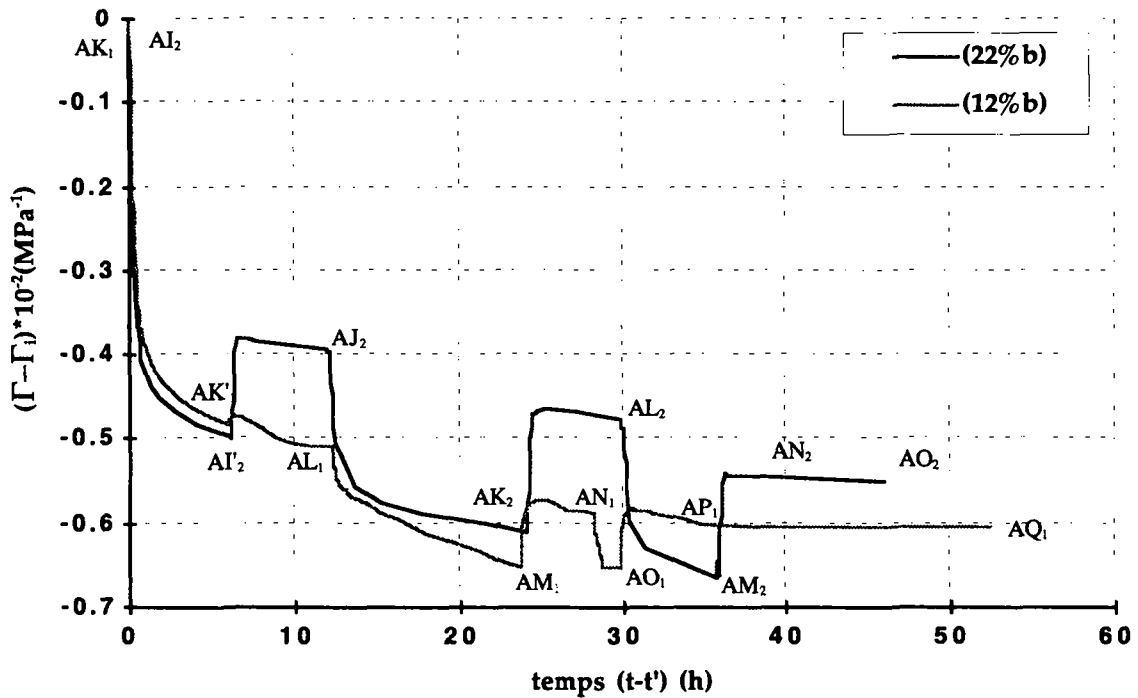


Figure II.8.28. Comparaison entre les résultats obtenus pour $(\Gamma - \Gamma_i)$ lors des troisièmes décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $(t - t'_{10})$ ($\Gamma_1 = \Gamma_{AK_1}$ et $\Gamma_2 = \Gamma_{AI_2}$).

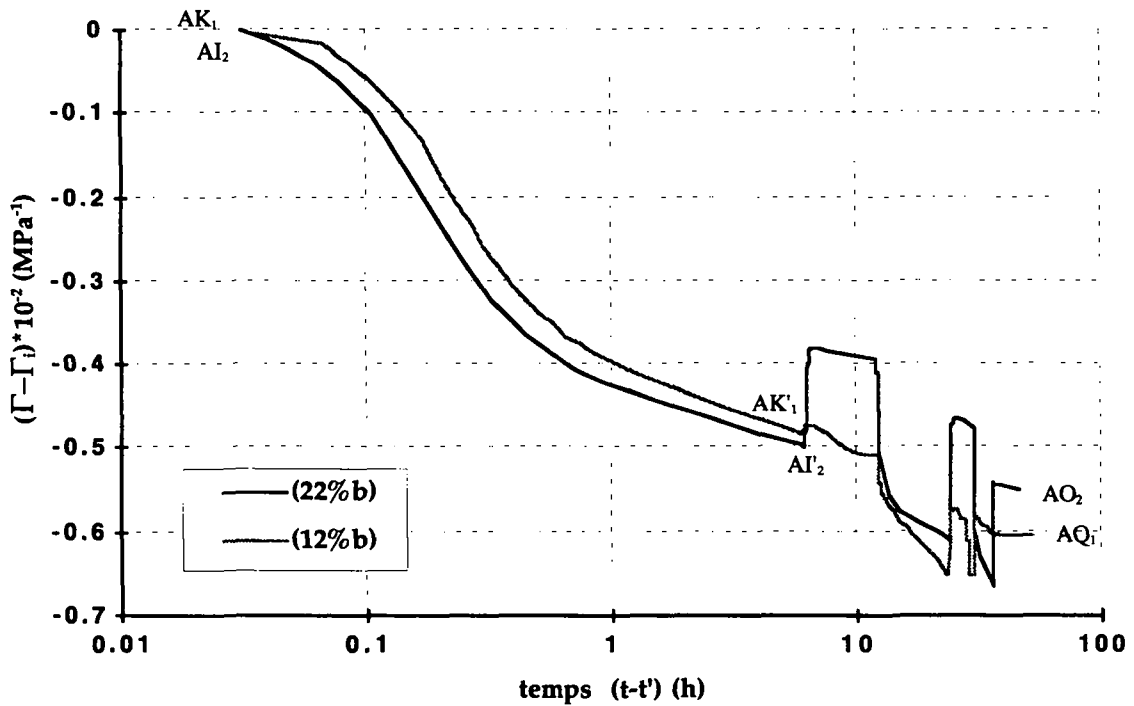


Figure II.8.29. Comparaison entre les résultats obtenus pour $(\Gamma - \Gamma_i)$ lors des troisièmes décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log(t - t'_{10})$.

On constate, en ce qui concerne la déformation par unité de contrainte Γ , que:

- ★ lors de la première absorption, les valeurs de Γ calculées dans chacun des segments $AK_1AK'_1$ et $AI_2AI'_2$ sont telles que: $\Delta\Gamma_{AK_1AK'_1} \approx 0.96 \Delta\Gamma_{AI_2AI'_2}$. Il ne serait cependant pas correct de faire une constatation sur ce résultat, puisque, non seulement l'histoire de la teneur en eau n'est pas la même dans les deux cas, mais le délai de mise en route des cycles hydriques est également différent. En effet, $\Delta t_{10}(12\%) = 25h45$; $\Delta t_{10}(22\%) = 1h30$.
- ★ lors des changements d'humidité relatifs suivants, on retrouve des oscillations de déformation par unité de contrainte d'amplitude importante avec:
 - ◆ une nouvelle diminution de Γ lors des absorptions;
 - ◆ une ré-augmentation de Γ lors des désorptions.

II.8.4 CONCLUSION

Ces essais nous ont permis de mettre en évidence deux points importants:

- ★ le premier est relatif au **premier changement d'humidité** qui intervient après application de la charge ou de la décharge. Il apparaît en effet que:
 - ◆ l'amplitude de la déformation ε_r engendrée lors du *premier changement hydrique, intervenant après la première charge* - (B1B'1) et (B2B'2) - est *importante* (environ 0.6 fois ε_{inst}) et proportionnelle au niveau de contrainte appliqué.
 - ◆ Si le chargement varie - éprouvette déchargée - sans être accompagné de variations cycliques de l'humidité relative, puis que l'éprouvette est à nouveau maintenue à un niveau de charge similaire - deuxième charge - *l'amplitude de la déformation ε_r , induite par le premier changement d'humidité n'est plus d'amplitude aussi importante* (environ 0.25 fois ε_{inst}).
 - ◆ Si le chargement varie puis est suivi de variations cycliques de l'humidité, *le premier changement d'humidité engendre à nouveau une augmentation* de la déformation ε_r , dans le sens de la charge appliquée, *d'amplitude importante*.
- ★ le deuxième est relatif à l'observation d'une **allure répétitive des oscillations de la déformation** lors des absorptions et désorptions prenant place après quelques cyclages hydriques.

Les essais du chapitre qui suit ont été réalisés en portant un intérêt particulier à l'observation du premier changement d'humidité intervenant après toute modification de charge.

CHAPITRE II.9

INFLUENCE DES CYCLES D'HUMIDITÉ SUR LA RÉPONSE SOUS DÉCHARGES PARTIELLES

Deux essais consistant en des charges suivies de décharges partielles ont été réalisés sur deux éprouvettes provenant d'une même série de coupe. Le niveau de contrainte appliquée correspondait à environ 30% de la contrainte de rupture. Les deux essais diffèrent quant aux incréments successifs de décharges partielles considérés. En effet, dans le premier essai, les 4 décharges partielles considérées sont de même amplitude. Dans le second, elles sont d'amplitude croissante.

II.9.1 INFLUENCE DES CYCLES D'HUMIDITÉ SUR LA RÉPONSE SOUS DÉCHARGES PARTIELLES DE MÊME AMPLITUDE.

II.9.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

L'essai comporte deux étapes de charge et décharge avec variations cycliques d'humidité relative. La première de ces étapes fait intervenir 4 décharges partielles de même amplitude, la deuxième est un cycle de charge suivi d'une décharge totale. Ces étapes sont décrites sur le schéma II.9.1. Leur détail est donné ci-dessous.

Première partie de l'essai:

Chaque éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une charge constante et nulle.

- Un niveau constant de 30% d'humidité relative atmosphérique est fixé pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la déformation est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 30% et 75%. Les variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.
- Un niveau constant de 30% d'humidité relative est à nouveau fixé durant la dernière période de 12 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la déformation avant application du programme de chargement.

Deuxième partie de l'essai:

Première étape de charge-décharge:

- A l'instant $t_0(DI)$ l'éprouvette est chargée à 30% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Le fluage à humidité constante - ε_{visc} - est mesuré jusqu'à l'instant $t_1(DI)$ pendant la durée $\Delta t_1(DI)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants $t_1(DI)$ et $t_2(DI)$, selon la figure II.9.1.B. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_2(DI)$.
- A partir de l'instant $t_2(DI)$, l'éprouvette subit quatre décharges partielles de même amplitude, telles que:

$$\sigma_p^n = \frac{\sigma_0}{4} \quad n = 1, 4 \quad (II.9.1)$$

avec σ_0 : contrainte appliquée

Une première décharge partielle d'amplitude $\sigma_0/4$ est appliquée à l'instant $t_2(DI)$. La déformation sans variation d'humidité relative est mesurée jusqu'à l'instant $t_3(DI)$ pendant la durée $\Delta t_3(DI)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont appliqués entre les instants $t_3(DI)$ et $t_4(DI)$, selon la figure II.9.1.B. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_4(DI)$.

Une deuxième décharge partielle d'amplitude $\sigma_0/4$ est appliquée à l'instant $t_4(DI)$. La déformation sans variation d'humidité relative est mesurée jusqu'à l'instant $t_5(DI)$ pendant la durée $\Delta t_5(DI)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont appliqués entre les instants $t_5(DI)$ et $t_6(DI)$, selon la figure II.9.1.B. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_6(DI)$.

Une troisième décharge partielle d'amplitude $\sigma_0/4$ est appliquée à l'instant $t_6(DI)$. La déformation sans variation d'humidité relative est mesurée jusqu'à l'instant $t_7(DI)$ pendant la durée $\Delta t_7(DI)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont appliqués entre les instants $t_7(DI)$ et $t_8(DI)$, selon la figure II.9.1.B. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_8(DI)$.

Une deuxième décharge partielle d'amplitude $\sigma_0/4$ est appliquée à l'instant $t_8(DI)$. La déformation sans variation d'humidité relative est mesurée jusqu'à l'instant $t_9(DI)$ pendant la durée $\Delta t_9(DI)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont appliqués entre les instants $t_9(DI)$ et $t_{10}(DI)$, selon la figure II.9.1.B. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_{10}(DI)$.

Deuxième étape de charge-décharge:

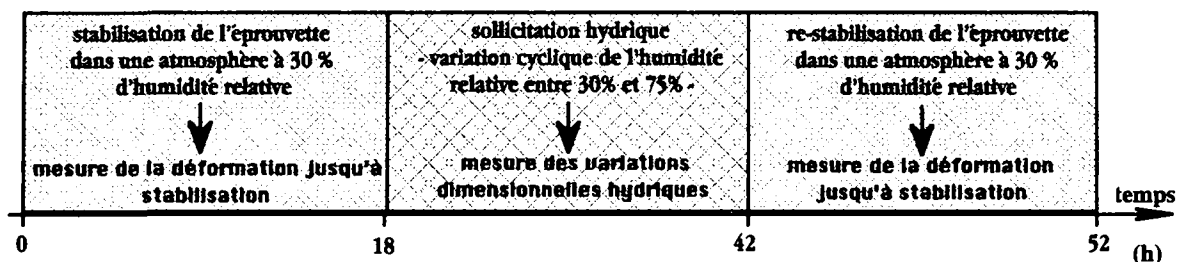
- A l'instant $t_{10}(DI)$, l'éprouvette est à nouveau chargée à 30% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont imposés à l'éprouvette, selon la figure II.9.1.B, entre les instants $t_{11}(DI)$ et $t_{12}(DI)$, pendant la durée $\Delta t_{12}(DI)$.
- A l'instant $t_{12}(DI)$, l'éprouvette est totalement déchargée. La recouvrance sans variation d'humidité relative - niveau constant de 30% - est mesurée jusqu'à l'instant $t_{13}(DI)$ pendant la durée $\Delta t_{13}(DI)$. Deux cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants $t_{13}(DI)$ et $t_{14}(DI)$, selon la figure II.9.1.B. La recouvrance sous climat variable est mesurée pendant la durée $\Delta t_{14}(DI)$.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	$t_0(DI)$	$\Delta t_1(DI)$	$t_1(DI)$	$\Delta t_2(DI)$	$t_2(DI)$	$\Delta t_3(DI)$	$t_3(DI)$
temps (h)	0	0.5	0.5	15.54	16.04	7.96	24
notations	$t_3(DI)$	$\Delta t_4(DI)$	$t_4(DI)$	$\Delta t_5(DI)$	$t_5(DI)$	$\Delta t_6(DI)$	$t_6(DI)$
temps (h)	24	16.07	40.07	8.3	48.37	15.74	64.11
notations	$t_6(DI)$	$\Delta t_7(DI)$	$t_7(DI)$	$\Delta t_8(DI)$	$t_8(DI)$	$\Delta t_9(DI)$	$t_9(DI)$
temps (h)	64.11	7.56	71.67	16.47	88.14	7.09	95.23
notations	$t_9(DI)$	$\Delta t_{10}(DI)$	$t_{10}(DI)$	$\Delta t_{11}(DI)$	$t_{11}(DI)$	$\Delta t_{12}(DI)$	$t_{12}(DI)$
temps (h)	95.23	72.77	168	0.27	168.27	15.77	184.04
notations	$t_{12}(DI)$	$\Delta t_{13}(DI)$	$t_{13}(DI)$	$\Delta t_{14}(DI)$	$t_{14}(DI)$		
temps (h)	184.04	8.23	192.27	44.73	237		

Tableau II.9.1. Notations en correspondance avec les essais décrits sur le schéma II.9.1.

PREMIÈRE PARTIE DE L'ESSAI - mesure des variations dimensionnelles



DEUXIÈME PARTIE DE L'ESSAI - application d'une sollicitation mécanique

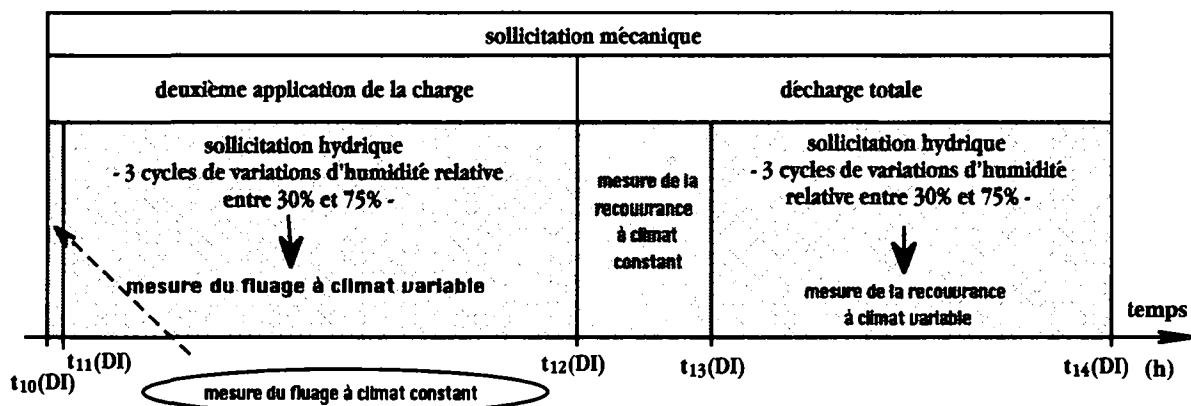
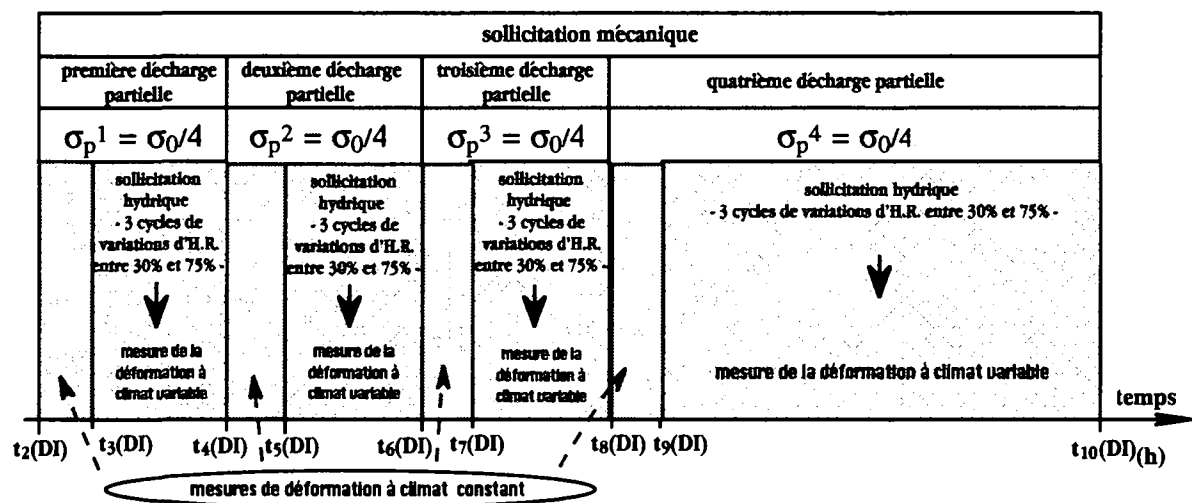
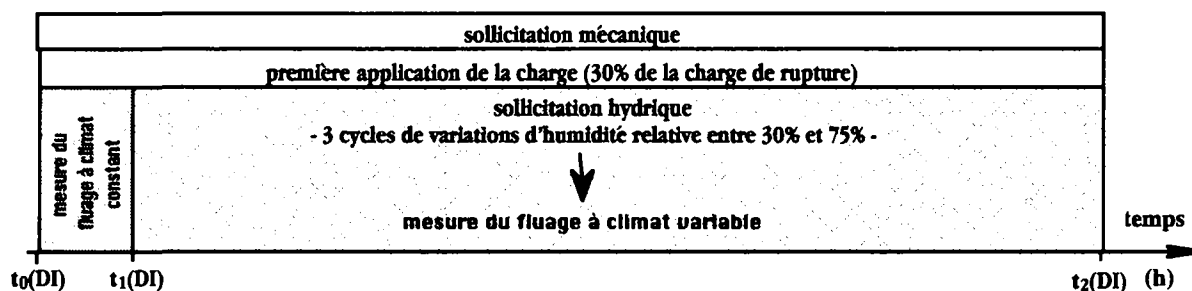


Schéma II.9.1. Étapes de déroulement de l'essai de fluage-recouvrance avec variations hydriques donné sur les figures II.9.1 à II.9.4.

Les résultats obtenus sont donnés sur les figures II.9.1 à II.9.6.

La figure II.9.1 est relative à l'ensemble de l'essai. Sont représentés sur ce graphe:

- ❶ les programmes de chargement (II.9.1.A) et de sollicitation hydrique (II.9.1.B) imposés à l'éprouvette;
- ❷ les résultats des mesures de la déformation ε_{tot} (II.9.1.C), courbe (DIa), ainsi que des variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} correspondantes (II.9.1.D), courbe (DIc);
- ❸ le résultat du calcul de la déformation ε_r , définie en (II.6.1), courbe (DIb).

Les figures II.9.2 à II.9.4 ont été tracées pour pouvoir effectuer une comparaison entre les deux parties de charge - (B₁H₁) et (AL₁AR₁) - à partir des instants respectifs t_i de mise en route des cycles hydriques. Une translation $t - t_i$ a ainsi été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que ces instants t_i correspondent. Elle est respectivement de:

- ◆ $(t - t_i(DI))$ pour la première partie de charge, entre les points B₁ et H₁;
- ◆ $(t - t_{10}(DI))$ pour la deuxième partie de charge, entre les points AL₁ et AR₁;

Sur la figure II.9.2 est représentée la déformation ε_r en fonction du temps $t - t_i$. Sur la figure II.9.3, une translation $\varepsilon_r - \varepsilon_{ri}$ a été effectuée sur l'axe des ordonnées, de manière à ce que les déformations ε_{ri} - qui correspondent respectivement à ε_{B_1} et ε_{AL_1} - coïncident. La déformation $\varepsilon_r - \varepsilon_{ri}$ est représentée, sur la figure II.9.3, en fonction du temps $t - t_i$ en échelle linéaire et sur la figure II.9.4 en fonction du temps $t - t_i$ en échelle logarithmique.

Les figures II.9.5 et II.9.6 sont relatives aux cinq parties de décharge - (I₁N₁), (P₁U₁), (W₁AB₁), (AD₁AI₁) et (AS₁AX₁). Sont représentées sur ces graphes, les quantités $H_r - H_{ri}$, où H_{ri} correspond respectivement à H_{rI_1} , H_{rP_1} , H_{rW_1} , H_{rAD_1} et H_{rAS_1} . H_r correspond au rapport entre la déformation ε_r et l'incrément de contrainte de la partie de décharge considérée. Il est définie de la manière suivante:

$$H_r(t) = \frac{\varepsilon_r(t)}{\Delta\sigma_p} \quad (II.9.2)$$

avec $\Delta\sigma_p$: l'incrément de contrainte correspondant à la décharge considérée.

Pour pouvoir effectuer une comparaison entre les quantités $H_r - H_{ri}$, à l'instant t_i où débutent les variations d'humidité, une translation $t - t_i$ a été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que ces instants coïncident. Elles sont respectivement de:

- ◆ $(t - t_3(DI))$ pour la première décharge partielle, entre les points I₁ et N₁;
- ◆ $(t - t_5(DI))$ pour la deuxième décharge partielle, entre les points P₁ et U₁;

- ◆ $(t - t_7(DI))$ pour la troisième décharge partielle, entre les points W_1 et AB_1 ;
- ◆ $(t - t_9(DI))$ pour la quatrième décharge partielle, entre les points AD_1 et AI_1 ;
- ◆ $(t - t_{13}(DI))$ pour la décharge totale, entre les points AS_1 et AX_1 ;

Sur la figure II.9.5, la quantité $H_r - H_{r_i}$ est tracée en fonction du temps $t - t_i$ en échelle linéaire. Sur la figure II.9.6, le temps est donné sur une échelle logarithmique

II.9.1.2 COMPARAISON DES RÉSULTATS RELATIVEMENT AUX DEUX PARTIES DE CHARGE

Les tableaux II.9.2 et II.9.3 qui suivent contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ε_r aux points notés B_1 à G_1 et AL_1 à AQ_1 sur la figure II.9.1.C, ainsi que les variations de la déformation ε_r dans chacun des segments $B_1B'_1$ à F_1G_1 et $AL_2AL'_2$ à AP_1AQ_1 .

notations	ε_{B_1}	$\varepsilon_{B'_1}$	ε_{C_1}	ε_{D_1}	ε_{E_1}	ε_{F_1}	ε_{G_1}
ε_r (%)	0.410	0.590	0.679	0.682	0.754	0.736	0.809

notations	ε_{AL_1}	$\varepsilon_{AL'_1}$	ε_{AM_1}	ε_{AN_1}	ε_{AO_1}	ε_{AP_1}	ε_{AQ_1}
ε_r (%)	0.655	0.793	0.868	0.843	0.900	0.865	0.930

Tableau II.9.2. Valeurs de déformation correspondant aux points B_1 à G_1 et AL_1 à AQ_1 , figure II.9.1.C.

notations	$\Delta\varepsilon_{B_1B'_1}$	$\Delta\varepsilon_{B'_1C_1}$	$\Delta\varepsilon_{C_1D_1}$	$\Delta\varepsilon_{D_1E_1}$	$\Delta\varepsilon_{E_1F_1}$	$\Delta\varepsilon_{F_1G_1}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	0.180	0.089	0.004	0.072	-0.018	0.073

notations	$\Delta\varepsilon_{AL_1AL'_1}$	$\Delta\varepsilon_{AL'_1AM_1}$	$\Delta\varepsilon_{AM_1AN_1}$	$\Delta\varepsilon_{AN_1AO_1}$	$\Delta\varepsilon_{AO_1AP_1}$	$\Delta\varepsilon_{AP_1AQ_1}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	0.138	0.075	-0.025	0.057	-0.035	0.065

Tableau II.9.3. Valeurs de déformation correspondant aux segments $B_1B'_1$ à F_1G_1 et $AL_2AL'_2$ à AP_1AQ_1 , figure II.9.1.C.

On constate, en ce qui concerne la déformation ε_r , que:

- ★ la première absorption entraîne, lors des deux charges, l'augmentation de la déformation la plus importante.
Elles sont telles que: $\Delta\varepsilon_{rB_1B'_1} \approx 0.48\varepsilon_{inst}$ et $\Delta\varepsilon_{rAL_1AL'_1} \approx 0.37\varepsilon_{inst} \approx 0.77\Delta\varepsilon_{rB_1B'_1}$.
- ★ les absorptions suivantes - (C_1D_1) , (E_1F_1) et (AM_1AN_1) , (AO_1AP_1) - entraînent, dans tous les cas, une diminution de la déformation.

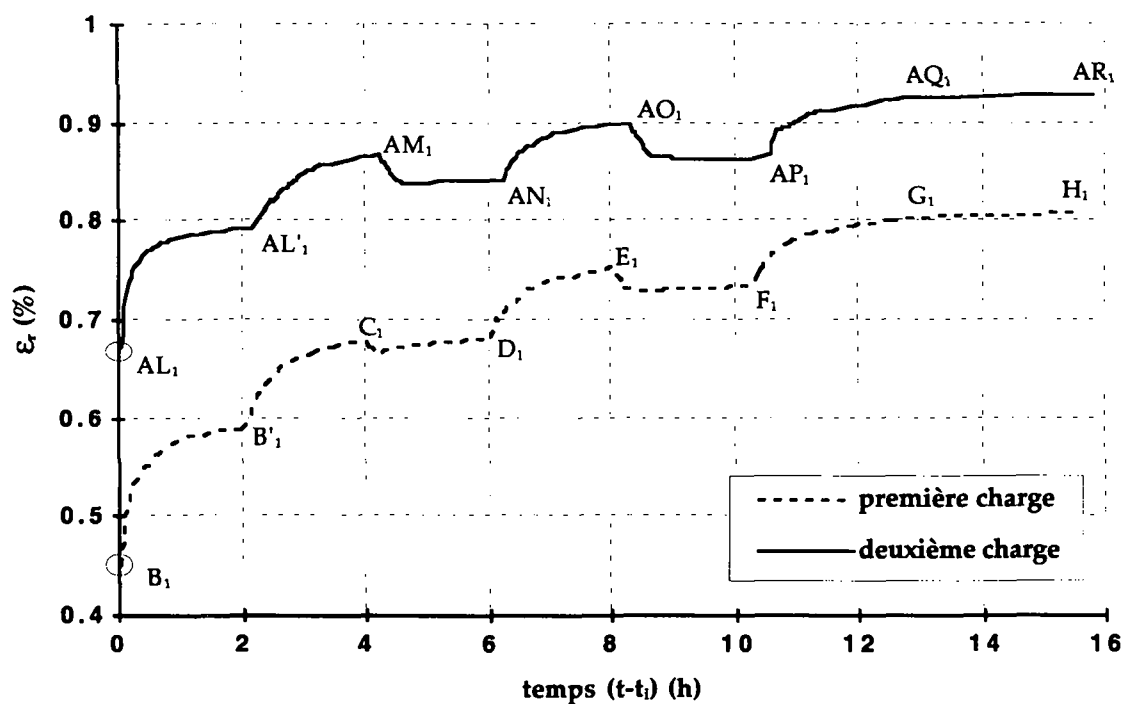


Figure II.9.2. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation ϵ_r , lors des deux charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $t - t_i$ ($t_1 = t_1(DI)$ et $t_2 = t_{11}(DI)$).

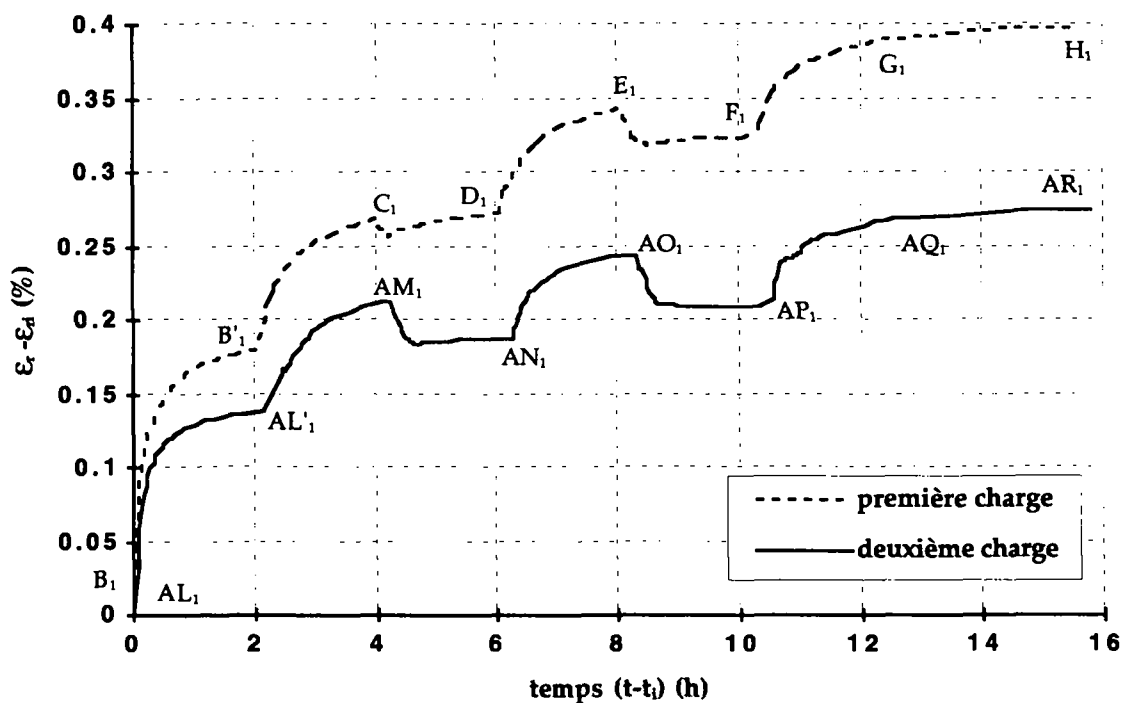


Figure II.9.3. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_{ri}$, lors des deux charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $t - t_i$ ($\epsilon_{r1} = \epsilon_{B_1}$ et $\epsilon_{r2} = \epsilon_{AL_1}$).

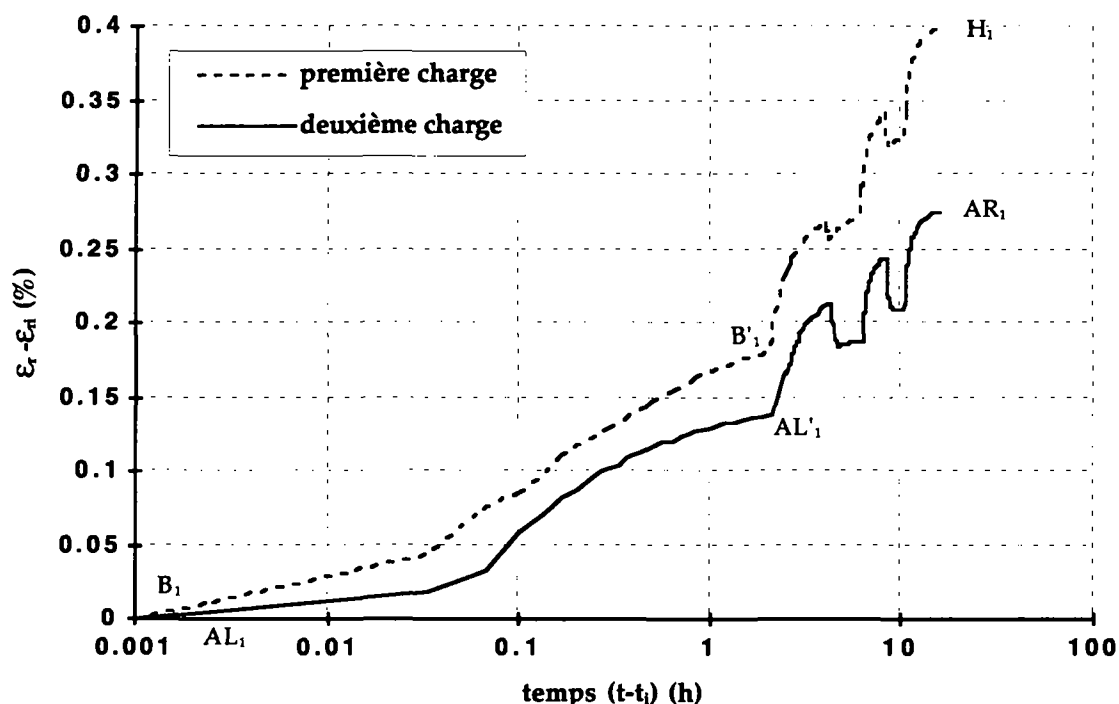


Figure II.8.4. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_{ri}$ lors des deux charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log t - t_i$ ($\epsilon_{r1} = \epsilon_{B_1}$ et $\epsilon_{r2} = \epsilon_{AL_1}$).

- ★ les désorptions - (B'_1C_1), (D_1E_1), (F_1G_1) et (AL'_1AM_1), (AN_1AO_1), (AP_1AQ_1) - entraînent, dans tous les cas, une augmentation de la déformation ϵ_r .
- ★ l'augmentation de la déformation ϵ_r engendrée lors de chaque cycle va en diminuant. En effet, en ce qui concerne la première charge, on a $\Delta\epsilon_{rB_1C_1} \approx 0.72\epsilon_{inst}$, $\Delta\epsilon_{rC_1E_1} \approx 0.20\epsilon_{inst}$ et $\Delta\epsilon_{rE_1G_1} \approx 0.15\epsilon_{inst}$. En ce qui concerne la deuxième charge, $\Delta\epsilon_{rAL_1AM_1} \approx 0.57\epsilon_{inst}$, $\Delta\epsilon_{rAM_1AO_1} \approx 0.09\epsilon_{inst}$ et $\Delta\epsilon_{rAO_1AQ_1} \approx 0.08\epsilon_{inst}$.
- ★ on constate, comme précédemment, que la vitesse de déformation est plus importante lors de la première charge.

II.9.1.2 COMPARAISON DES RESULTATS RELATIVEMENT AUX CINQ PARTIES DE DECHARGE

Les deux tableaux II.9.4 et II.9.5 qui suivent contiennent l'ensemble des valeurs de la quantité H_r aux points notés I_1 à N_1 , P_1 à U_1 , W_1 à AB_1 , AD_1 à AI_1 et AS_1 à AX_1 sur la figure II.9.1.C, ainsi que ses variations dans chacun des segments $I_1I'_1$ à M_1N_1 , $P_1P'_1$ à T_1U_1 , $W_1W'_1$ à AA_1AB_1 , $AD_1AD'_1$ à AH_1AI_1 et $AS_1AS'_1$ à AW_1AX_1 .

notations	H_{I_1}	$H_{I'_1}$	H_{J_1}	H_{K_1}	H_{L_1}	H_{M_1}	H_{N_1}
$H_r \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	10.07	9.29	9.91	9.44	10.06	9.64	10.30

notations	H_{P_1}	$H_{P'_1}$	H_{Q_1}	H_{R_1}	H_{S_1}	H_{T_1}	H_{U_1}
$H_r \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	8.76	7.87	8.37	7.96	8.34	7.99	8.49

notations	H_{W_1}	$H_{W'_1}$	H_{X_1}	H_{Y_1}	H_{Z_1}	H_{AA_1}	H_{AB_1}
$H_r \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	6.83	5.96	6.31	5.83	6.20	5.80	6.19

notations	H_{AD_1}	$H_{AD'_1}$	H_{AE_1}	H_{AF_1}	H_{AG_1}	H_{AH_1}	H_{AI_1}
$H_r \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	4.59	3.70	4.06	3.57	3.84	3.50	3.84

notations	H_{AS_1}	$H_{AS'_1}$	H_{AT_1}	H_{AU_1}	H_{AV_1}	H_{AW_1}	H_{AX_1}
$H_r \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	1.70	1.14	1.21	1.06	1.14	1.02	1.12

Tableau II.9.4 Valeurs de H_r aux points I_1 à N_1 , P_1 à U_1 , W_1 à AB_1 , AD_1 à AI_1 et AS_1 à AX_1 figure II.9.1.C.

notations	$\Delta H_{I_1 I'_1}$	$\Delta H_{I'_1 J_1}$	$\Delta H_{J_1 K_1}$	$\Delta H_{K_1 L_1}$	$\Delta H_{L_1 M_1}$	$\Delta H_{M_1 N_1}$
$\Delta H_r \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	-0.79	0.63	-0.47	0.61	-0.41	0.66

notations	$\Delta H_{P_1 P'_1}$	$\Delta H_{P'_1 Q_1}$	$\Delta H_{Q_1 R_1}$	$\Delta H_{R_1 S_1}$	$\Delta H_{S_1 T_1}$	$\Delta H_{T_1 U_1}$
$\Delta H_r \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	-0.89	0.50	-0.41	0.39	-0.36	0.50

notations	$\Delta H_{W_1 W'_1}$	$\Delta H_{W'_1 X_1}$	$\Delta H_{X_1 Y_1}$	$\Delta H_{Y_1 Z_1}$	$\Delta H_{Z_1 AA_1}$	$\Delta H_{AA_1 AB_1}$
$\Delta H_r \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	-0.87	0.36	-0.49	0.37	-0.40	0.39

notations	$\Delta H_{AD_1 AD'_1}$	$\Delta H_{AD'_1 AE_1}$	$\Delta H_{AE_1 AF_1}$	$\Delta H_{AF_1 AG_1}$	$\Delta H_{AG_1 AH_1}$	$\Delta H_{AH_1 AI_1}$
$\Delta H_r \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	-0.89	0.36	-0.49	0.27	-0.34	0.34

notations	$\Delta H_{AS_1 AS'_1}$	$\Delta H_{AS'_1 AT_1}$	$\Delta H_{AT_1 AU_1}$	$\Delta H_{AU_1 AV_1}$	$\Delta H_{AV_1 AW_1}$	$\Delta H_{AW_1 AX_1}$
$\Delta H_r \times 10^{-2} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$	-0.56	0.08	-0.15	0.08	-0.12	0.10

Tableau II.9.5. Valeurs de H_r correspondant aux segments $I_1 I'_1$ à $M_1 N_1$, $P_1 P'_1$ à $T_1 U_1$, $W_1 W'_1$ à $AA_1 AB_1$, $AD_1 AD'_1$ à $AH_1 AI_1$ et $AS_1 AS'_1$ à $AW_1 AX_1$, figure II.9.1.C.

On observe, en ce qui concerne la quantité H_r , que:

- ★ la première absorption entraîne, après chaque décharge, une diminution de H_r , dont les amplitudes sont telles que:

$\Delta H_{rAD_1AD'_1} \approx \Delta H_{rW_1W'_1} \approx \Delta H_{rP_1P'_1} \approx 1.13 \Delta H_{rI_1I'_1}$, pour les 4 décharges partielles de même amplitude et $\Delta H_{rAS_1AS'_1} \approx 0.63 \Delta H_{rAD_1AD'_1}$, pour la décharge totale.

- ★ si l'on considère la première décharge partielle, d'amplitude $\sigma_0/4$, on constate que:
 - ◆ le premier cycle d'humidité (I_1J_1) entraîne une *diminution* de H_r de $0.16 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le deuxième cycle d'humidité (J_1L_1) entraîne une *ré-augmentation* de H_r de $0.15 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le troisième cycle d'humidité (L_1N_1) entraîne une *augmentation* de H_r de $0.24 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$, l'amplitude au point N_1 étant donc supérieure à celle correspondant au point début du cyclage hydrique.
- ★ si l'on considère la deuxième décharge partielle, de même amplitude $\sigma_0/4$, on constate que:
 - ◆ le premier cycle d'humidité (P_1Q_1) entraîne une *diminution* de H_r de $0.39 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le deuxième cycle d'humidité (Q_1S_1) entraîne également une *diminution* de H_r , mais très faible, de $0.03 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le troisième cycle d'humidité (S_1U_1) entraîne une *ré-augmentation* de H_r de $0.15 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$.
- ★ si l'on considère la troisième décharge partielle, d'amplitude $\sigma_0/4$, on constate que:
 - ◆ le premier cycle d'humidité (W_1X_1) entraîne une *diminution* de H_r de $0.52 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le deuxième cycle d'humidité (X_1Z_1) entraîne une *diminution* de H_r de $0.11 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le troisième cycle d'humidité (Z_1AB_1) entraîne une très faible *diminution* de H_r de $0.01 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$.
- ★ si l'on considère la quatrième et dernière décharge partielle, d'amplitude $\sigma_0/4$, on constate que:
 - ◆ le premier cycle d'humidité (AD_1AE_1) entraîne une *diminution* de H_r de $0.53 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le deuxième cycle d'humidité (AE_1AG_1) entraîne une *diminution* de H_r de $0.22 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;

- ◆ le troisième cycle d'humidité (AG_1AI_1) entraîne une stagnation de H_r à sa précédente valeur.

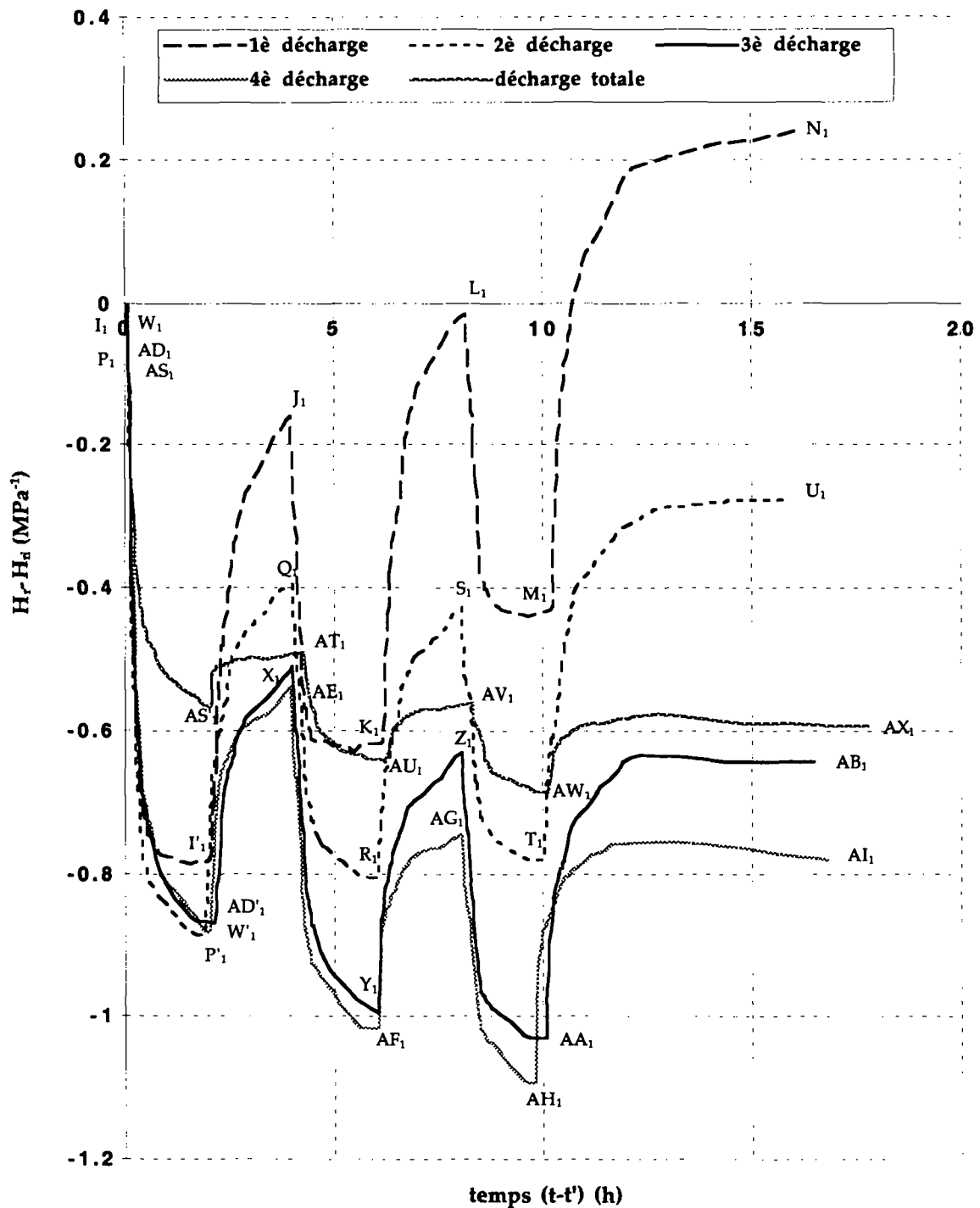


Figure II.9.5. Comparaison entre les résultats obtenus pour la quantité $H_r - H_a$ lors des cinq décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $t - t_i$ ($H_{r1} = H_{I_1}$, $H_{r2} = H_{P_1}$, $H_{r3} = H_{W_1}$, $H_{r4} = H_{AD_1}$ et $H_{r5} = H_{AS_1}$).

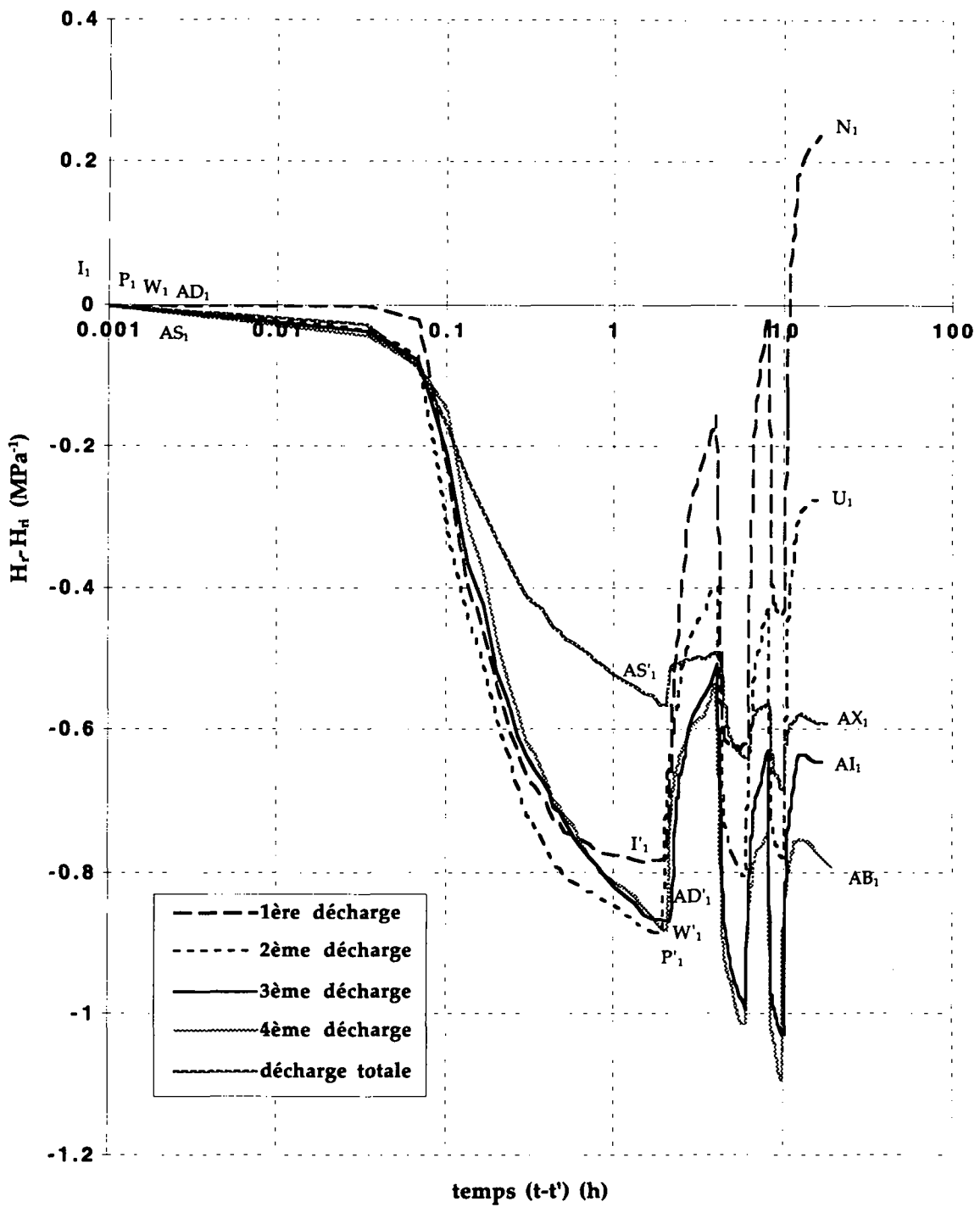


Figure II.9.6. Comparaison entre les résultats obtenus pour la quantité $H_r - H_{ri}$ lors des cinq décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log t - t_i$.

- ★ si l'on considère maintenant la décharge totale, d'amplitude σ_0 , on constate que:
- ◆ le premier cycle d'humidité (AS₁AT₁) entraîne une diminution de H_r de $0.49 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le deuxième cycle d'humidité (AT₁AV₁) entraîne une diminution de H_r de $0.07 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le troisième cycle d'humidité (AV₁AX₁) entraîne également une diminution de H_r de $0.02 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$.

II.9.2 INFLUENCE DES CYCLES D'HUMIDITÉ SUR LA RÉPONSE SOUS DÉCHARGES PARTIELLES D'AMPLITUDE CROISSANTE.

II.9.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

L'essai comporte deux étapes de charge et décharge avec variation cyclique d'humidité relative. La première de ces étapes fait intervenir 4 décharges partielles de même amplitude. Elles sont décrites sur le schéma II.9.2. Le détail de ces étapes est donné ci-dessous.

Première partie de l'essai:

L'éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une charge constante et nulle.

- Un niveau constant de 30% d'humidité relative atmosphérique est fixé pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la déformation est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 30% et 75%. Les variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.
- Un niveau constant de 30% d'humidité relative est à nouveau fixé durant la dernière période de 12 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la déformation avant application du programme de chargement.

Deuxième partie de l'essai:

Première étape de charge-décharge:

- A l'instant $t_0(DC)$ l'éprouvette est chargée à 30% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Le fluage à humidité constante - ε_{visc} - est mesuré jusqu'à l'instant $t_1(DC)$ pendant la durée $\Delta t_1(DC)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposées à l'éprouvette, entre les instants $t_1(DC)$ et $t_2(DC)$, selon la figure II.9.7.B. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_2(DC)$.
- A partir de l'instant $t_2(DC)$, l'éprouvette subit quatre décharges partielles d'amplitudes croissantes, telles que:

$$\sigma_p^n = n \frac{\sigma_0}{10} \quad n = 1, 4 \quad (II.9.3)$$

Une première décharge partielle d'amplitude $\sigma_0 / 10$ est appliquée à l'instant $t_2(DC)$. La déformation sans variation d'humidité relative est mesurée jusqu'à l'instant $t_3(DC)$ pendant la durée $\Delta t_3(DC)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont appliqués entre les instants $t_3(DC)$ et $t_4(DC)$, selon la figure II.9.7.B. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_4(DC)$.

Une deuxième décharge partielle d'amplitude $2\sigma_0 / 10$ est appliquée à l'instant $t_4(DC)$. La déformation sans variation d'humidité relative est mesurée jusqu'à l'instant $t_5(DC)$ pendant la durée $\Delta t_5(DC)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont appliqués entre les instants $t_5(DC)$ et $t_6(DC)$, selon la figure II.9.7.B. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_6(DC)$.

Une troisième décharge partielle d'amplitude $3\sigma_0 / 10$ est appliquée à l'instant $t_6(DC)$. La déformation sans variation d'humidité relative est mesurée jusqu'à l'instant $t_7(DC)$ pendant la durée $\Delta t_7(DC)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont appliqués entre les instants $t_7(DC)$ et $t_8(DC)$, selon la figure II.9.7.B. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_8(DC)$.

Une quatrième décharge partielle d'amplitude $4\sigma_0 / 10$ est appliquée à l'instant $t_8(DC)$. La déformation sans variation d'humidité relative est mesurée jusqu'à l'instant $t_9(DC)$ pendant la durée $\Delta t_9(DC)$. Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont appliqués entre les instants $t_9(DC)$ et $t_{10}(DC)$, selon la figure II.9.7.B. La réponse différée sous climat variable ε_{tot} est mesurée pendant la durée $\Delta t_{10}(DC)$.

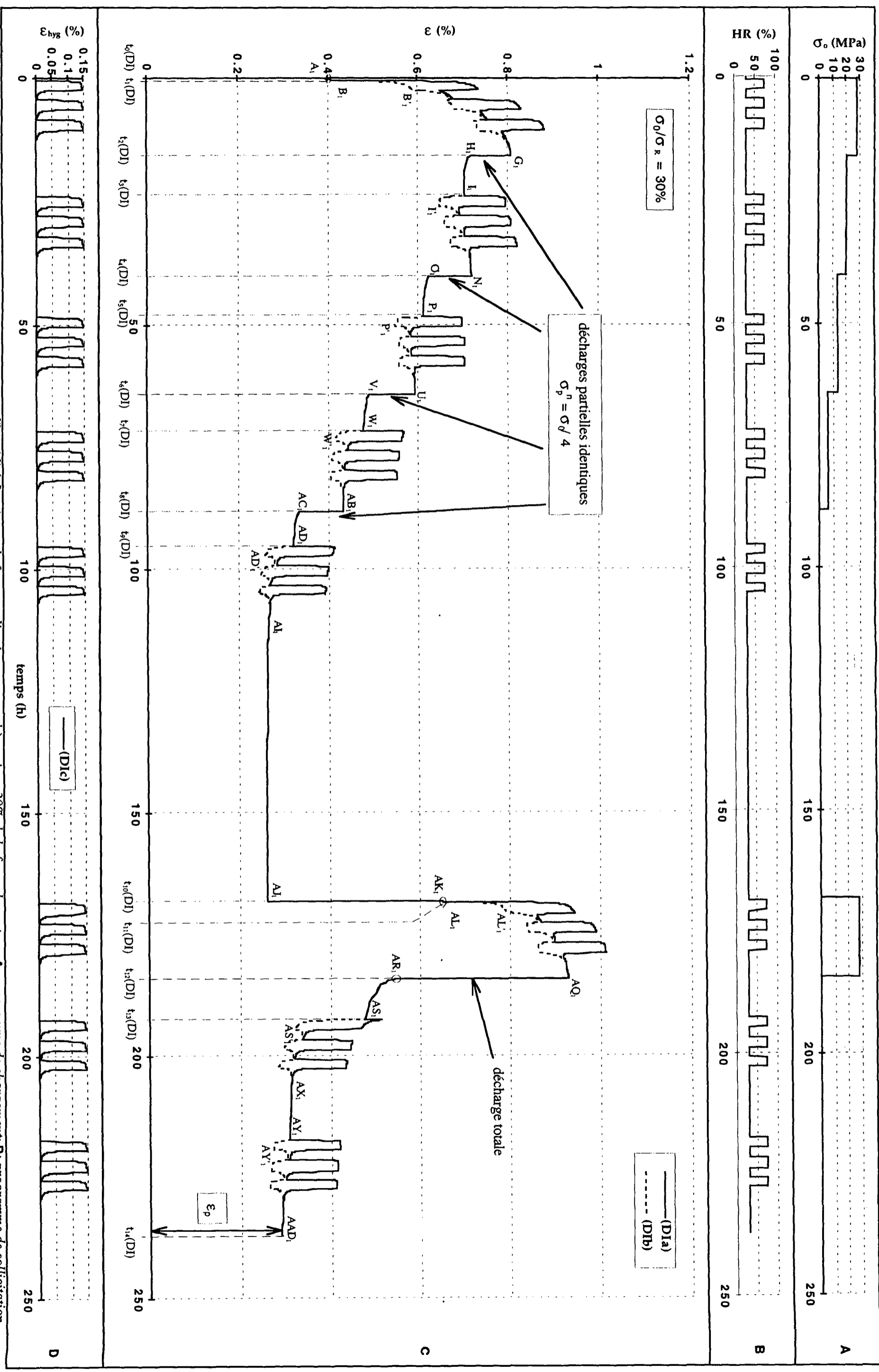


Figure II.9.1 Essai de fluage-recouvrance avec variations d'humidité. Le niveau de force appliquée correspond à environ 30% de la force de rupture. A: programme de chargement; B: programme de sollicitation hygrique; C: déformations ϵ_{tot} (D1a) et ϵ_r (D1b); D: déformation ϵ_{hyg} (D1c).

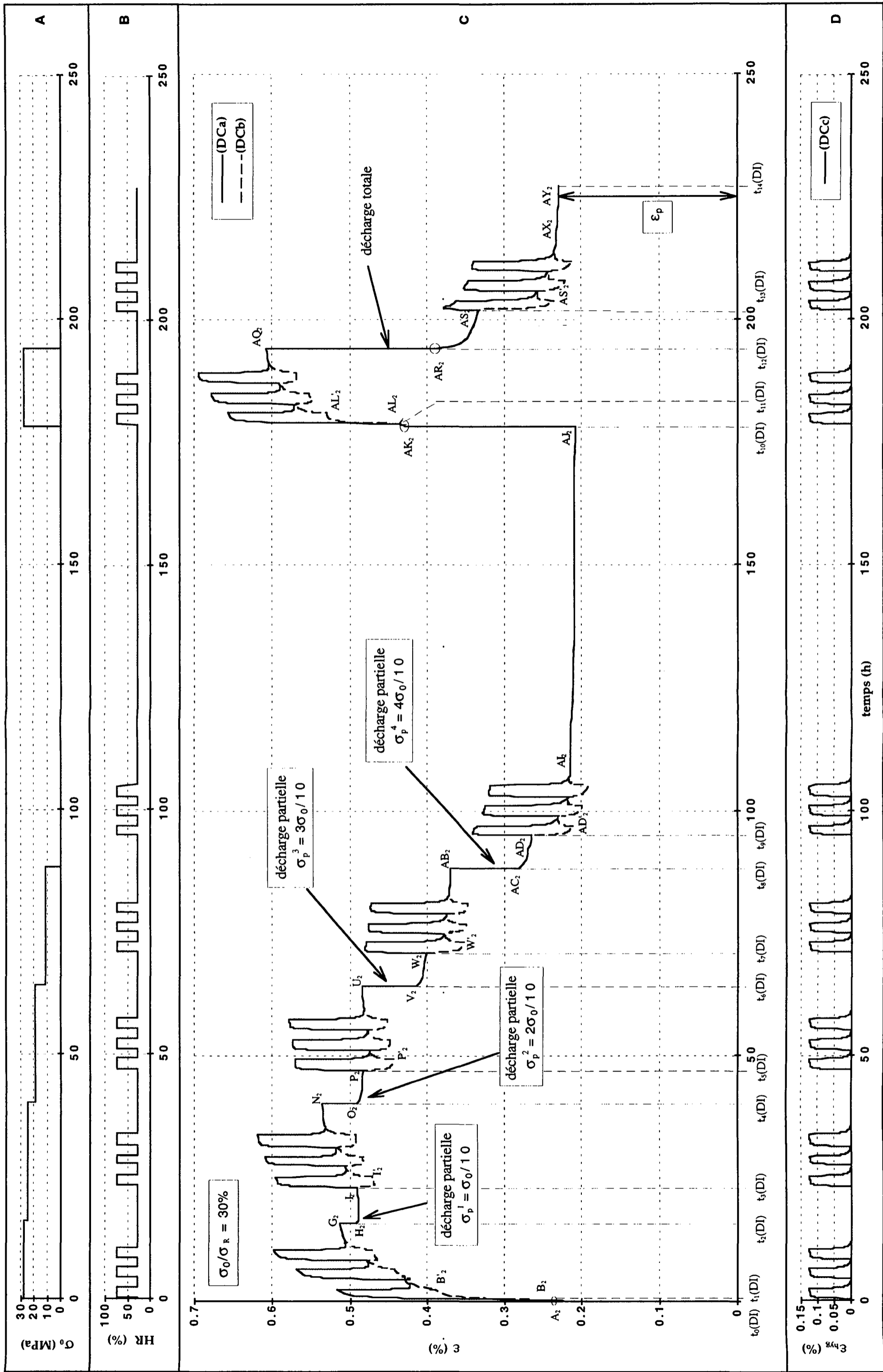


Figure II.9.7 Essai de fluage-recouvrance avec variations d'humidité. Le niveau de force appliquée correspond à environ 30% de la force de rupture. **A**: programme de chargement; **B**: programme de sollicitation hygrique; **C**: déformations ϵ_{tot} (DCa) et ϵ_r (DCb); **D**: déformation ϵ_{hyg} (DCc).

Deuxième étape de charge-décharge:

- A l'instant $t_{10}(DC)$, l'éprouvette est à nouveau chargée à 30% de la contrainte de rupture σ_{R30} . Trois cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont imposés à l'éprouvette, selon la figure II.9.7.B, entre les instants $t_{11}(DC)$ et $t_{12}(DC)$, pendant la durée $\Delta t_{12}(DC)$.
- A l'instant $t_{12}(DC)$, l'éprouvette est totalement déchargée. La recouvrance sans variation d'humidité relative - niveau constant de 30% - est mesurée jusqu'à l'instant $t_{13}(DC)$ pendant la durée $\Delta t_{13}(DC)$. Deux cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants $t_{13}(DC)$ et $t_{14}(DC)$, selon la figure II.9.7.B. La recouvrance sous climat variable est mesurée pendant la durée $\Delta t_{14}(DC)$.

Les résultats obtenus sont donnés sur les figures II.9.7 à II.9.12.

La figure II.9.7 est relative à l'ensemble de l'essai. Sont représentés sur ce graphe:

- ① les programmes de chargement (II.9.7.A) et de sollicitation hydrique (II.9.7.B) imposés à l'éprouvette;
- ② les résultats des mesures de la déformation ε_{tot} (II.9.7.C), courbe (DCa), ainsi que des variations dimensionnelles hydriques ε_{hyg} correspondantes (II.9.7.D), courbe (DCc);
- ③ le résultat du calcul de la déformation ε_r , définie en (II.6.1), courbe (DCb).

Les figures II.9.8 à II.9.10 ont été tracées pour pouvoir effectuer une comparaison entre les deux parties de charge - (B₂H₂) et (AL₂AR₂) - à partir des instants respectifs t_i de mise en route des cycles hydriques. Une translation $t - t_i$ a ainsi été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que ces instants t_i correspondent. Elle est respectivement de:

- ◆ $(t - t_i(DC))$ pour la première partie de charge, entre les points B₂ et H₂;
- ◆ $(t - t_{10}(DC))$ pour la deuxième partie de charge, entre les points AL₂ et AR₂;

Sur la figure II.9.8 est représentée la déformation ε_r en fonction du temps $t - t_i$. Sur la figure II.9.9, une translation $\varepsilon_r - \varepsilon_{ri}$ a été effectuée sur l'axe des ordonnées, de manière à ce que les déformations ε_{ri} - qui correspondent respectivement à ε_{B_2} et ε_{AL_2} - coïncident. La déformation $\varepsilon_r - \varepsilon_{ri}$ est représentée, sur la figure II.9.9, en fonction du temps $t - t_i$ en échelle linéaire et sur la figure II.9.10 en fonction du temps $t - t_i$ en échelle logarithmique.

Les figures II.9.11 et II.9.12 sont relatives aux cinq parties de décharge - (I₂N₂), (P₂U₂), (W₂AB₂), (AD₂AI₂) et (AS₂AX₂). Sont représentées sur ces graphes, les quantités $H_r - H_{ri}$,

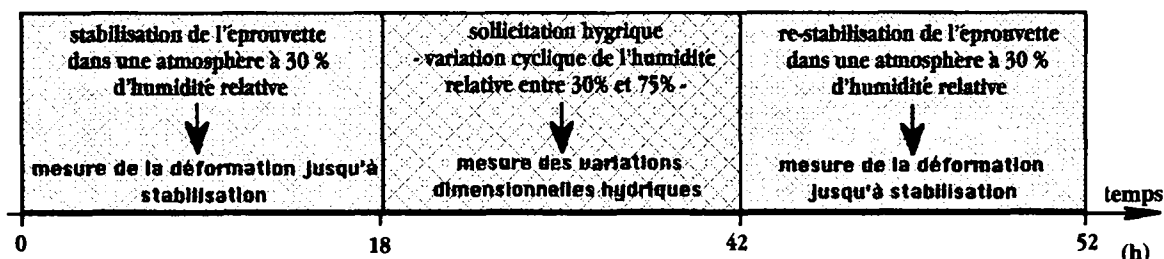
où H_{r_i} correspond respectivement à H_{rI_2} , H_{rP_2} , H_{rW_2} , H_{rAD_2} et H_{rAS_2} . La quantité H_r est définie selon l'expression (II.9.2).

Pour pouvoir effectuer une comparaison entre les quantités $H_r - H_{r_i}$, à l'instant t_i où débutent les variations d'humidité, une translation $t - t_i$ a été faite sur l'axe des temps, de manière à ce que ces instants coïncident. Elles sont respectivement de:

- ◆ $(t - t_3(DC))$ pour la première décharge partielle, entre les points I_2 et N_2 ;
- ◆ $(t - t_5(DC))$ pour la deuxième décharge partielle, entre les points P_2 et U_2 ;
- ◆ $(t - t_7(DC))$ pour la troisième décharge partielle, entre les points W_2 et AB_2 ;
- ◆ $(t - t_9(DC))$ pour la quatrième décharge partielle, entre les points AD_2 et AI_2 ;
- ◆ $(t - t_{13}(DC))$ pour la décharge totale, entre les points AS_2 et AX_2 ;

Sur la figure II.9.11, $H_r - H_{r_i}$ est tracée en fonction du temps $t - t_i$ en échelle linéaire. Sur la figure II.9.12, le temps est donné sur une échelle logarithmique

PREMIERE PARTIE DE L'ESSAI - mesure des variations dimensionnelles



DEUXIEME PARTIE DE L'ESSAI - application d'une sollicitation mécanique

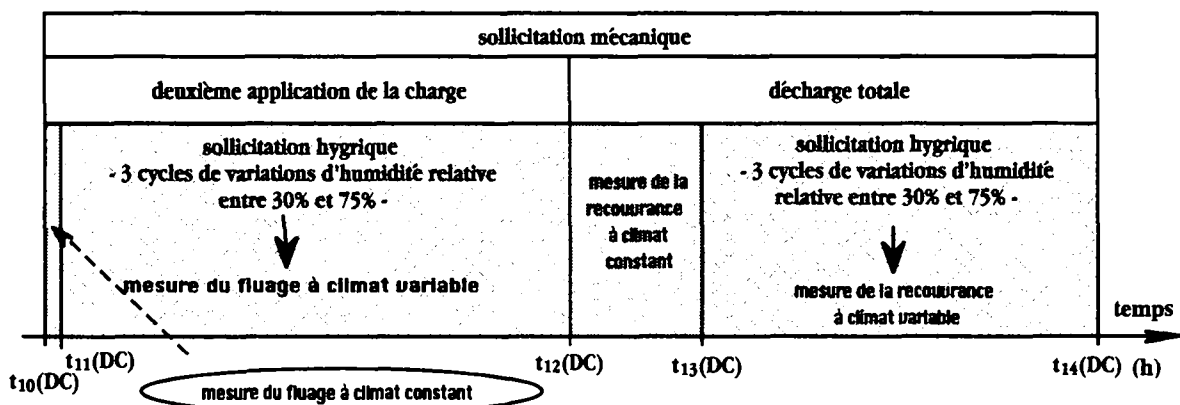
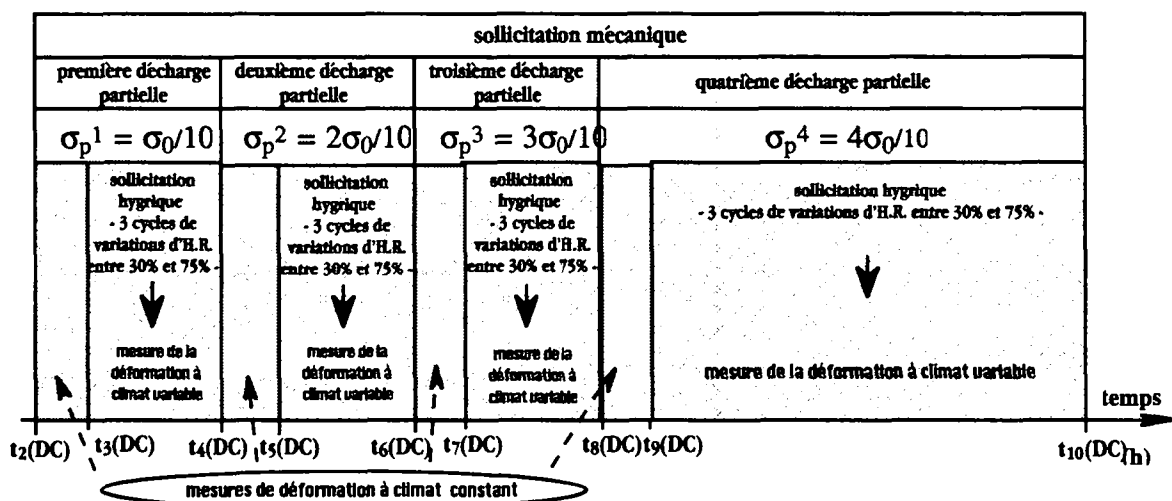
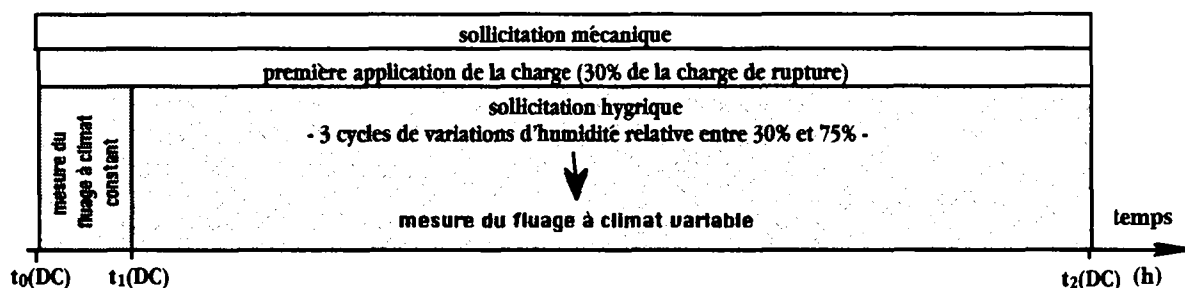


Schéma II.9.2. Etapes de déroulement de l'essai de fluage-recouvrance avec variations hydriques donné sur les figures II.9.7 à II.9.12.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	$t_0(DC)$	$\Delta t_1(DC)$	$t_1(DC)$	$\Delta t_2(DC)$	$t_2(DC)$	$\Delta t_3(DI)$	$t_3(DC)$
temps (h)	0	0.5	0.5	15.54	16.04	7.96	24
notations	$t_3(DC)$	$\Delta t_4(DC)$	$t_4(DC)$	$\Delta t_5(DC)$	$t_5(DC)$	$\Delta t_6(DC)$	$t_6(DC)$
temps (h)	24	16.07	40.07	8.3	48.37	15.74	64.11
notations	$t_6(DC)$	$\Delta t_7(DC)$	$t_7(DC)$	$\Delta t_8(DC)$	$t_8(DC)$	$\Delta t_9(DC)$	$t_9(DC)$
temps (h)	64.11	7.56	71.67	16.47	88.14	7.09	95.23
notations	$t_9(DC)$	$\Delta t_{10}(DC)$	$t_{10}(DC)$	$\Delta t_{11}(DC)$	$t_{11}(DC)$	$\Delta t_{12}(DC)$	$t_{12}(DC)$
temps (h)	95.23	72.77	168	0.27	168.27	15.77	184.04
notations	$t_{12}(DC)$	$\Delta t_{13}(DC)$	$t_{13}(DC)$	$\Delta t_{14}(DC)$	$t_{14}(DC)$		
temps (h)	184.04	8.23	192.27	44.73	237		

Tableau II.9.6. Notations en correspondance avec les essais décrits sur le schéma II.9.2.

II.9.2.2 COMPARAISON DES RESULTATS RELATIVEMENT AUX DEUX PARTIES DE CHARGE

Les deux tableaux II.9.2 et II.9.3 qui suivent contiennent l'ensemble des valeurs de la déformation ε_r aux points notés B_2 à G_2 et AL_2 à AQ_2 sur la figure II.9.7.C, ainsi que les variations de la déformation ε_r dans chacun des segments $B_2B'_2$ à F_2G_2 et $AL_2AL'_2$ à AP_2AQ_2 .

notations	ε_{B_2}	$\varepsilon_{B'_2}$	ε_{C_2}	ε_{D_2}	ε_{E_2}	ε_{F_2}	ε_{G_2}
ε_r (%)	0.230	0.392	0.430	0.443	0.479	0.473	0.514

notations	ε_{AL_2}	$\varepsilon_{AL'_2}$	ε_{AM_2}	ε_{AN_2}	ε_{AO_2}	ε_{AP_2}	ε_{AQ_2}
ε_r (%)	0.448	0.531	0.573	0.553	0.593	0.570	0.609

Tableau II.9.7. Valeurs de déformation ε_r correspondant aux points B_1 à G_1 et AL_1 à AQ_1 , figure II.9.7.C.

notations	$\Delta\varepsilon_{B_2B'_2}$	$\Delta\varepsilon_{B'_2C_2}$	$\Delta\varepsilon_{C_2D_2}$	$\Delta\varepsilon_{D_2E_2}$	$\Delta\varepsilon_{E_2F_2}$	$\Delta\varepsilon_{F_2G_2}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	0.162	0.039	0.013	0.036	-0.006	0.041

notations	$\Delta\varepsilon_{AL_2AL'_2}$	$\Delta\varepsilon_{AL'_2AM_2}$	$\Delta\varepsilon_{AM_2AN_2}$	$\Delta\varepsilon_{AN_2AO_2}$	$\Delta\varepsilon_{AO_2AP_2}$	$\Delta\varepsilon_{AP_2AQ_2}$
$\Delta\varepsilon_r$ (%)	0.084	0.042	-0.020	0.039	-0.023	0.039

Tableau II.9.8. Valeurs de déformation ε_r correspondant aux segments $B_1B'_1$ à F_1G_1 et $AL_2AL'_2$ à AP_1AQ_1 , figure II.9.7.C.

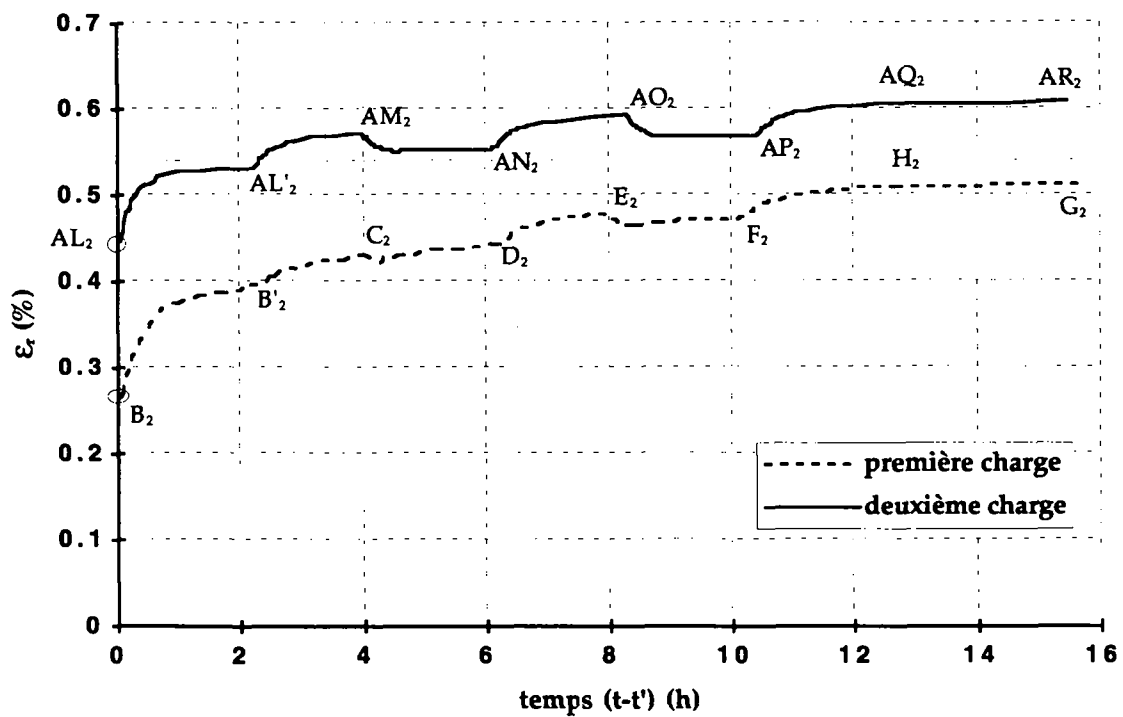


Figure II.9.8. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation ϵ_r lors des deux charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $t - t_i$ ($t_1 = t_1(DC)$ et $t_2 = t_{11}(DC)$).

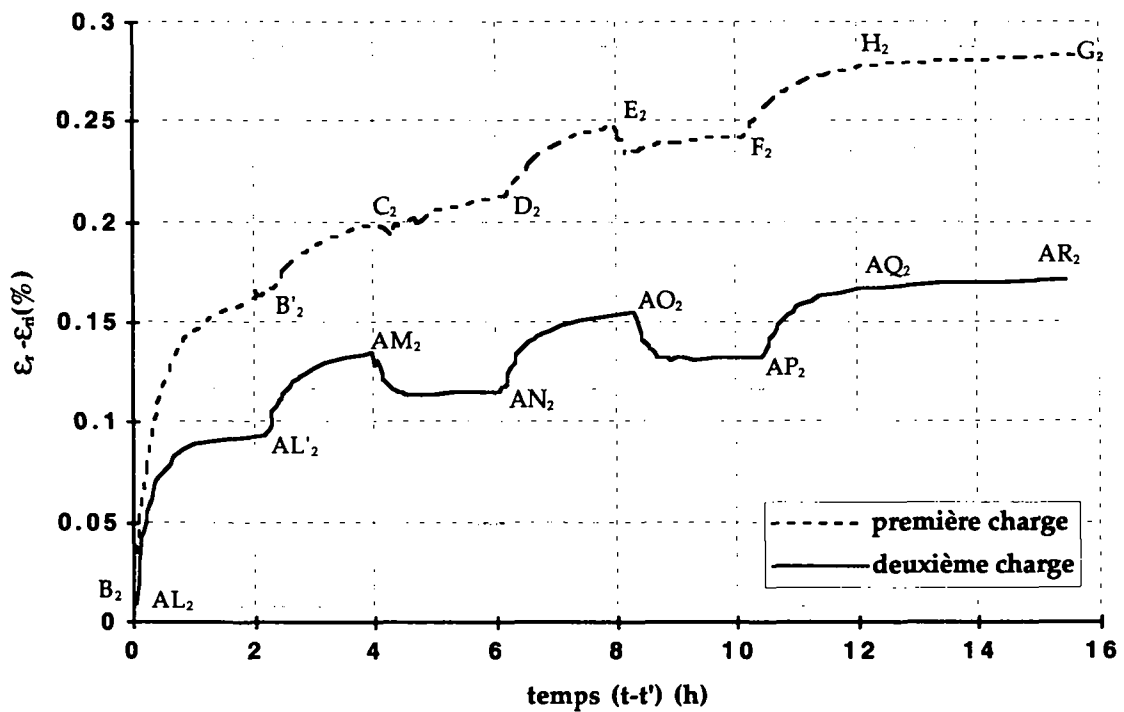


Figure II.9.9 Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_{ri}$ lors des deux charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $t - t_i$ ($\epsilon_{r1} = \epsilon_{B_2}$ et $\epsilon_{r2} = \epsilon_{AL_2}$).

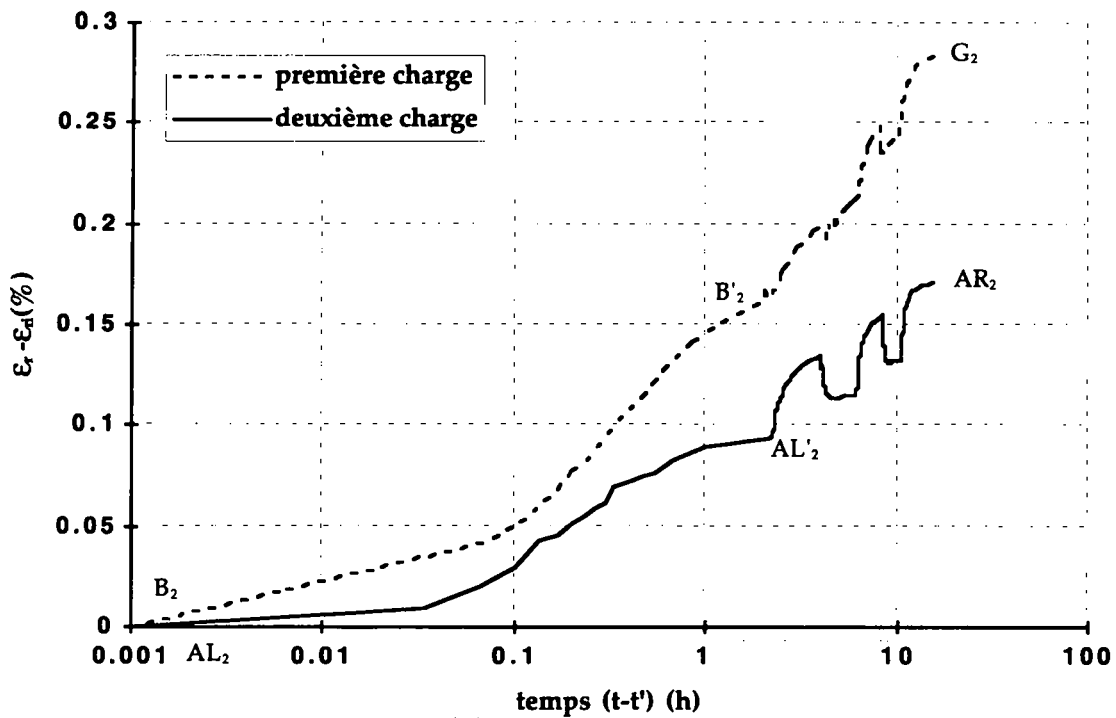


Figure II.9.10. Comparaison entre les résultats obtenus pour la déformation $\epsilon_r - \epsilon_d$ lors des deux charges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log t - t_i$.

On constate, en ce qui concerne la déformation ϵ_r , que:

- ★ la première absorption entraîne, lors des deux charges, l'augmentation de la déformation la plus importante.
Elles sont telles que: $\Delta\epsilon_{rB_2B'_2} \approx 0.74\epsilon_{inst}$ et $\Delta\epsilon_{rAL_2AL'_2} \approx 0.39\epsilon_{inst} \approx 0.52\Delta\epsilon_{rB_2B'_2}$.
- ★ l'augmentation de la déformation ϵ_r , engendrée lors de chaque cycle va en diminuant. En effet, en ce qui concerne la première charge, on a $\Delta\epsilon_{rB_2C_2} \approx 0.87\epsilon_{inst}$, $\Delta\epsilon_{rC_2E_2} \approx 0.21\epsilon_{inst}$ et $\Delta\epsilon_{rE_2G_2} \approx 0.15\epsilon_{inst}$. En ce qui concerne la deuxième charge, $\Delta\epsilon_{rAL_2AM_2} \approx 0.54\epsilon_{inst}$, $\Delta\epsilon_{rAM_2AO_2} \approx 0.09\epsilon_{inst}$ et $\Delta\epsilon_{rAO_2AQ_2} \approx 0.07\epsilon_{inst}$.
- ★ on constate, comme précédemment, que la vitesse de déformation est plus importante lors de la première charge.

II.9.2.3 COMPARAISON DES RESULTATS RELATIVEMENT AUX CINQ PARTIES DE DECHARGE

Les deux tableaux II.9.7 et II.9.8 qui suivent contiennent l'ensemble des valeurs de la quantité H_r aux points notés I_2 à N_2 , P_2 à U_2 , W_2 à AB_2 , AD_2 à AI_2 et AS_2 à AX_2 sur la figure II.9.7.C, ainsi que les variations de H_r dans chacun des segments $I_2I'_2$ à M_2N_2 , $P_2P'_2$ à T_1U_2 , $W_2W'_2$ à AA_2AB_2 , $AD_2AD'_2$ à AH_2AI_2 et $AS_2AS'_2$ à AW_2AX_2 .

notations	H_{I_2}	$H_{I'_2}$	H_{J_2}	H_{K_2}	H_{L_2}	H_{M_2}	H_{N_2}
$H_r \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	17.54	16.82	18.14	17.29	18.50	17.64	19.21
notations	H_{P_2}	$H_{P'_2}$	H_{Q_2}	H_{R_2}	H_{S_2}	H_{T_2}	H_{U_2}
$H_r \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	8.64	7.95	8.48	8.02	8.54	8.09	8.66
notations	H_{W_2}	$H_{W'_2}$	H_{X_2}	H_{Y_2}	H_{Z_2}	H_{AA_2}	H_{AB_2}
$H_r \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	4.80	4.21	4.44	4.17	4.48	4.14	4.43
notations	H_{AD_2}	$H_{AD'_2}$	H_{AE_2}	H_{AF_2}	H_{AG_2}	H_{AH_2}	H_{AI_2}
$H_r \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	2.38	1.88	2.06	1.79	1.94	1.72	1.92
notations	H_{AS_2}	$H_{AS'_2}$	H_{AT_2}	H_{AU_2}	H_{AV_2}	H_{AW_2}	H_{AX_2}
$H_r \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	1.20	0.85	0.92	0.79	0.87	0.76	0.84

Tableau II.9.7 Valeurs de H_r correspondant aux points I_2 à N_2 , P_2 à U_2 , W_2 à AB_2 , AD_2 à AI_2 et AS_2 à AX_2 figure II.9.1.C.

notations	$\Delta H_{I_2I'_2}$	$\Delta H_{I'_2J_2}$	$\Delta H_{J_2K_2}$	$\Delta H_{K_2L_2}$	$\Delta H_{L_2M_2}$	$\Delta H_{M_2N_2}$
$\Delta H_r \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.71	1.32	-0.86	1.21	-0.86	1.57
notations	$\Delta H_{P_2P'_2}$	$\Delta H_{P'_2Q_2}$	$\Delta H_{Q_2R_2}$	$\Delta H_{R_2S_2}$	$\Delta H_{S_2T_2}$	$\Delta H_{T_2U_2}$
$\Delta H_r \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.70	0.54	-0.46	0.52	-0.45	0.57
notations	$\Delta H_{W_2W'_2}$	$\Delta H_{W'_2X_2}$	$\Delta H_{X_2Y_2}$	$\Delta H_{Y_2Z_2}$	$\Delta H_{Z_2AA_2}$	$\Delta H_{AA_2AB_2}$
$\Delta H_r \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.58	0.23	-0.27	0.31	-0.33	0.29
notations	$\Delta H_{AD_2AD'_2}$	$\Delta H_{AD'_2AE_2}$	$\Delta H_{AE_2AF_2}$	$\Delta H_{AF_2AG_2}$	$\Delta H_{AG_2AH_2}$	$\Delta H_{AH_2AI_2}$
$\Delta H_r \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.50	0.19	-0.28	0.15	-0.21	0.20
notations	$\Delta H_{AS_2AS'_2}$	$\Delta H_{AS'_2AT_2}$	$\Delta H_{AT_2AU_2}$	$\Delta H_{AU_2AV_2}$	$\Delta H_{AV_2AW_2}$	$\Delta H_{AW_2AX_2}$
$\Delta H_r \times 10^{-2} (MPa^{-1})$	-0.35	0.08	-0.13	0.08	-0.11	0.08

Tableau II.9.8. Valeurs de H_r correspondant aux segments $I_2I'_2$ à M_2N_2 , $P_2P'_2$ à T_2U_2 , $W_2W'_2$ à AA_2AB_2 , $AD_2AD'_2$ à AH_2AI_2 et $AS_2AS'_2$ à AW_2AX_2 figure II.9.1.C.

On observe, en ce qui concerne la quantité H_r , que:

- ★ la première absorption entraîne, après chaque décharge, une diminution de H_r , les amplitudes sont telles que:

$\Delta H_{rAD_2AD'_2} \approx 1.16 \Delta H_{rW_2W'_2} \approx 1.40 \Delta H_{rP_2P'_2} \approx 1.42 \Delta H_{rI_2I'_2}$, pour les 4 décharges partielles de même amplitude et $\Delta H_{rAS_2AS'_2} \approx 0.70 \Delta H_{rAD_2AD'_2}$, pour la décharge totale. On peut constater que lors de la première décharge partielle - dont l'amplitude est faible par rapport aux suivantes - H_r décroît puis ré-augmente dans le sens du fluage.

- ★ si l'on considère la première décharge partielle, d'amplitude $\sigma_0/10$, on constate que:
 - ◆ le premier cycle d'humidité (I_2J_2) entraîne une *augmentation* de H_r de $0.60 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le deuxième cycle d'humidité (J_2L_2) entraîne une *augmentation* de H_r de $0.36 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le troisième cycle d'humidité (L_2N_2) entraîne une *augmentation* de H_r de $0.71 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$, l'amplitude au point N_2 étant donc supérieure à celle correspondant au point début du cyclage hydrique.
- ★ si l'on considère la deuxième décharge partielle, d'amplitude $2\sigma_0/10$, on constate que:
 - ◆ le premier cycle d'humidité (P_2Q_2) entraîne une *diminution* de H_r de $0.16 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le deuxième cycle d'humidité (Q_2S_2) entraîne également une *ré-augmentation* de H_r , mais très faible, de $0.06 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le troisième cycle d'humidité (S_2U_2) entraîne une *augmentation* de H_r de $0.12 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$.
- ★ si l'on considère la troisième décharge partielle, d'amplitude $3\sigma_0/10$, on constate que:
 - ◆ le premier cycle d'humidité (W_2X_2) entraîne une *diminution* de H_r de $0.36 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le deuxième cycle d'humidité (X_2Z_2) entraîne une *ré-augmentation* de H_r de $0.04 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le troisième cycle d'humidité (Z_2AB_2) entraîne une *diminution* de H_r de $0.05 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$.
- ★ si l'on considère la dernière décharge partielle, d'amplitude $4\sigma_0/10$, on constate que:
 - ◆ le premier cycle d'humidité (AD_2AE_2) entraîne une *diminution* de H_r de $0.32 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
 - ◆ le deuxième cycle d'humidité (AE_2AG_2) entraîne une *diminution* de H_r de $0.12 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;

- ◆ le troisième cycle d'humidité (AG_2AI_2) entraîne une *diminution* de H_r de $0.02 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$.

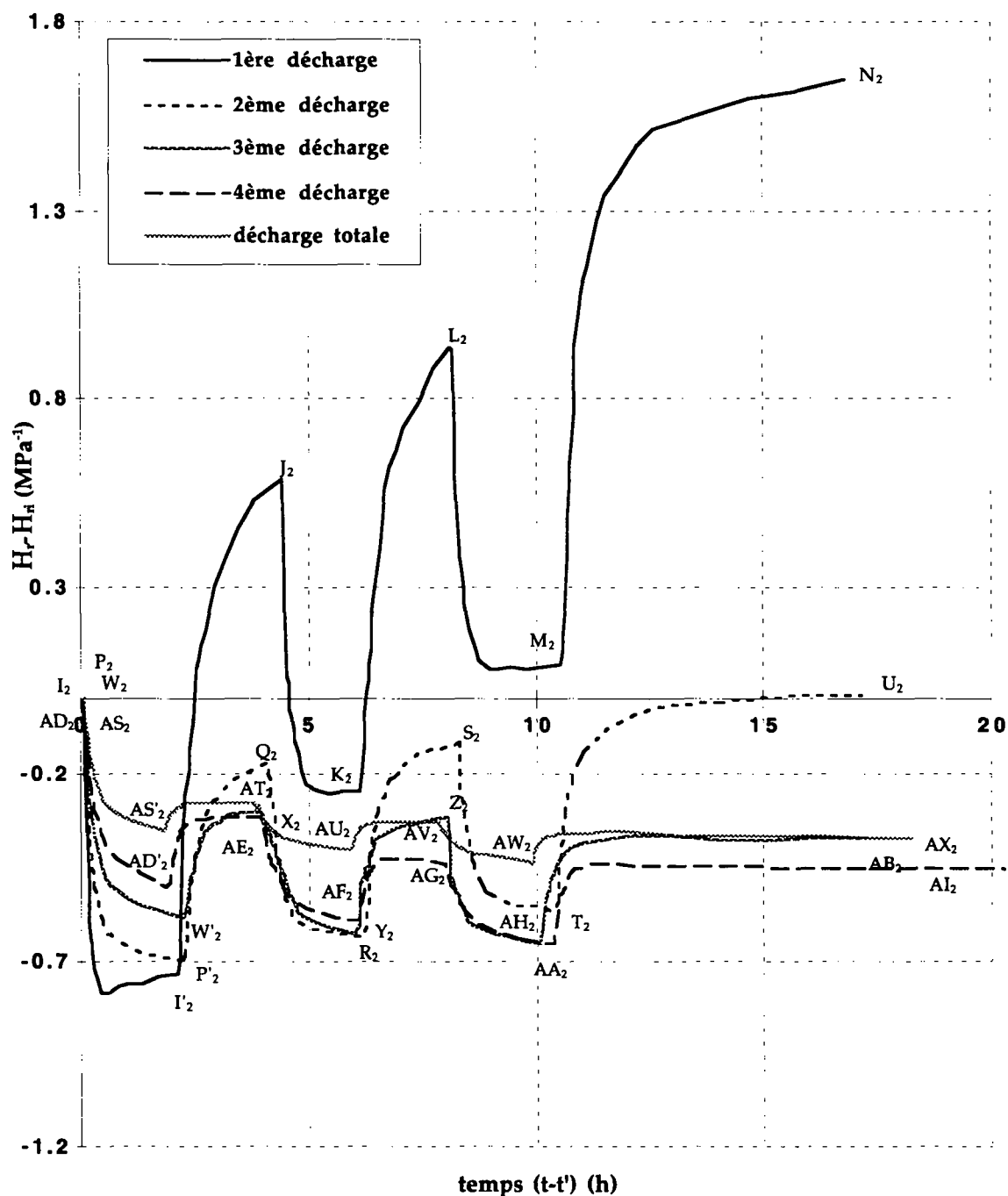


Figure II.9.11 Comparaison entre les résultats obtenus pour $H_r - H_i$ lors des cinq décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $t - t_i$ ($H_{r1} = H_{I_2}$, $H_{r2} = H_{P_2}$, $H_{r3} = H_{W_2}$, $H_{r4} = H_{AD_2}$ et $H_{r5} = H_{AS_2}$).

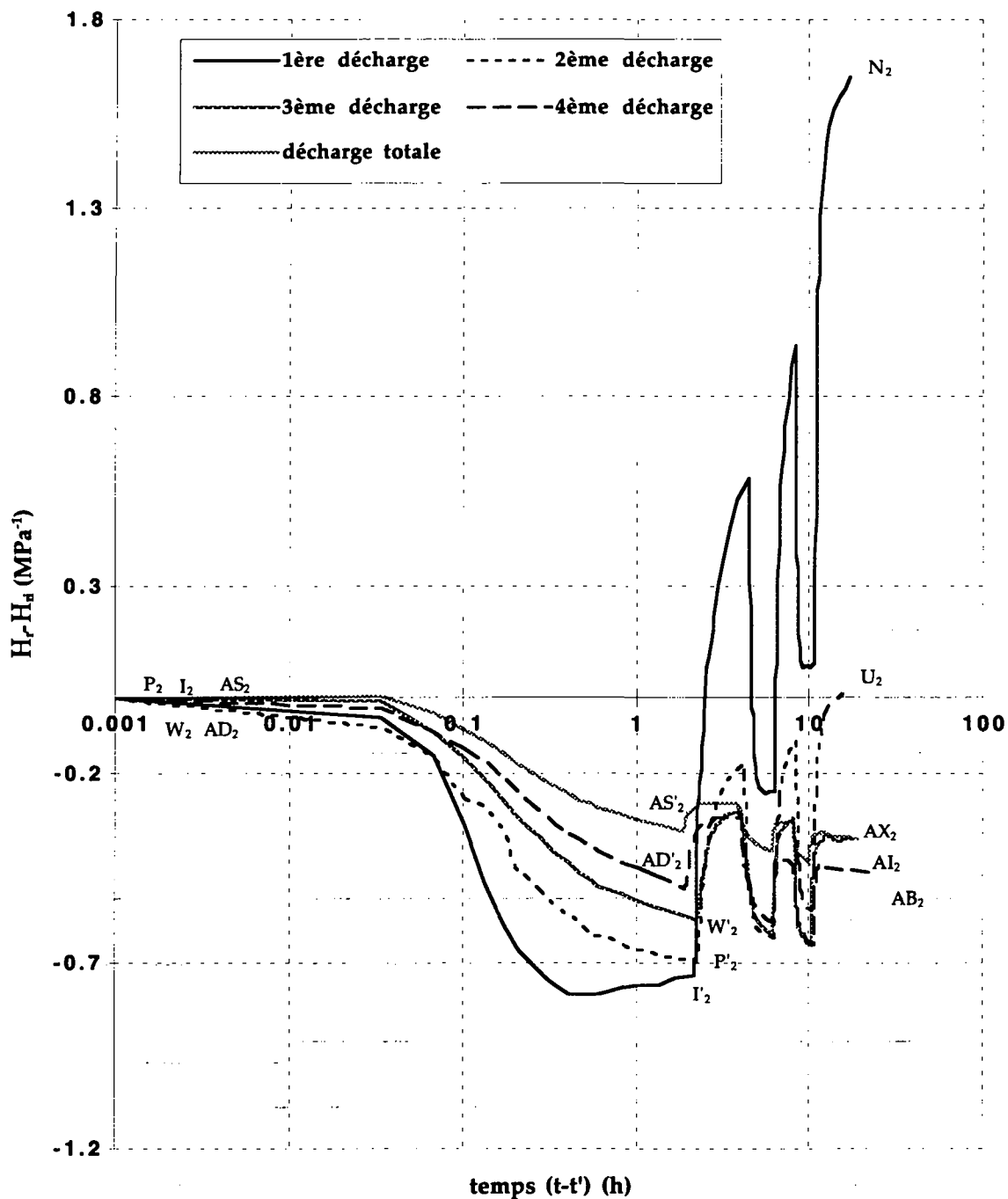


Figure II.9.12 Comparaison entre les résultats obtenus pour $H_r - H_{ri}$ lors des cinq décharges, à partir des instants de mise en route des cycles d'humidité relative en fonction de $\log t - t_i$.

★ si l'on considère maintenant la décharge totale, d'amplitude σ_0 , on constate que:

- ◆ le premier cycle d'humidité (AS₂AT₂) entraîne une *diminution* de H_r de $0.28 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
- ◆ le deuxième cycle d'humidité (AT₂AV₂) entraîne une *diminution* de H_r de $0.05 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$;
- ◆ le troisième cycle d'humidité (AV₂AX₂) entraîne également une *diminution* de H_r de $0.03 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$.

II.9.3 CONCLUSION

A partir des résultats obtenus sur les deux essais, figures II.9.1 à II.9.12, le point suivant est proposé:

La déformation ε_r semble être la superposition de deux phénomènes qui sont tels que:

① dans un premier temps, *chaque cycle* hydrique appliqué à l'éprouvette entraîne:

- ◆ une diminution de la déformation lors d'une absorption;
- ◆ une augmentation de la déformation lors d'une désorption;

L'allure des oscillations de déformation engendrées par les cycles hydriques apparaît comme étant liée au niveau de contrainte. En effet, l'amplitude des oscillations est plus importante pour un niveau de contrainte élevé.

② dans un deuxième temps, la *première absorption* qui intervient après une variation de la charge - d'un incrément positif ou négatif - entraîne l'apparition d'une *déformation additionnelle*, qui varie selon le signe de cet incrément. Cette déformation additionnelle semble être proportionnelle à l'incrément de variation de la contrainte.

CHAPITRE II.10

OBSERVATION DE CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE LA RÉPONSE SOUS CLIMAT VARIABLE

ESSAIS DE RELAXATION-EFFACEMENT

II.10.1 ESSAI DE RELAXATION-EFFACEMENT EN TRACTION AVEC CYCLES DE VARIATION D'HUMIDITÉ RELATIVE SUR ÉPROUVETTE INITIALEMENT SÈCHE (STABILISÉE A UNE HUMIDITE ATMOSPHERIQUE DE 30%).

II.10.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Un essai de relaxation-effacement sur éprouvette sèche avec variations cycliques d'humidité relative sous charge a été réalisé pour observer le comportement hygro-mécanique du bois. Celui-ci s'est déroulé suivant les étapes données sur le schéma II.10.1. Il se détaille de la manière suivante:

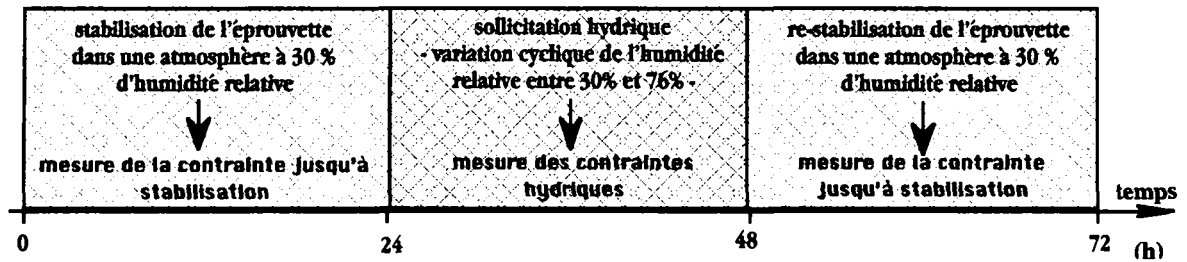
Première partie de l'essai:

L'éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une déformation constante et nulle.

- Un niveau constant de 30% d'humidité relative atmosphérique est maintenu pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la contrainte est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 30% et 75%. Les variations de contrainte hydriques σ_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.
- Un niveau constant de 30% d'humidité relative est à nouveau fixé durant une dernière période de 10 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la contrainte avant application du programme de chargement.

PREMIÈRE PARTIE DE L'ESSAI

mesure des contraintes hygriques



DEUXIÈME PARTIE DE L'ESSAI

application d'une sollicitation mécanique

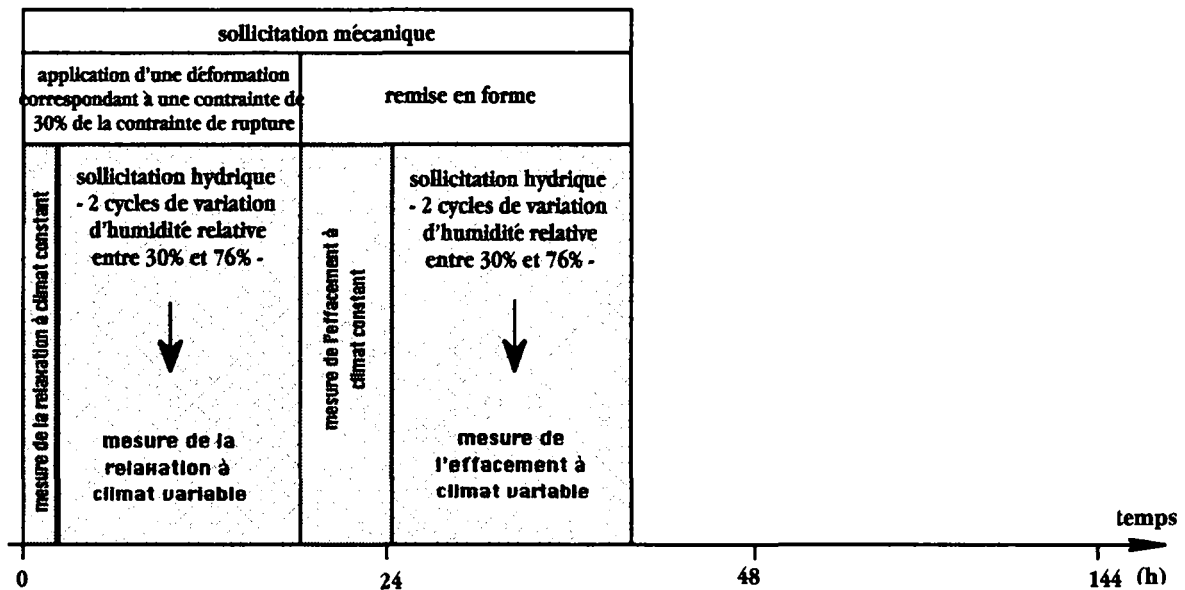


Schéma II.10.1. Étapes de déroulement de l'essai de relaxation-effacement avec variations hydriques effectué sur une éprouvette initialement sèche, dont les résultats sont donnés sur la figure II.10.1.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	t_0	Δt_1	t_1	Δt_2	t_2	Δt_3	t_3	Δt_4	t_4
temps (h)	0	0.833	0.833	16.167	17	6.9	23.9	17.1	41

Tableau II.10.1 Notations en correspondance avec l'essai décrit sur le schéma II.10.1.

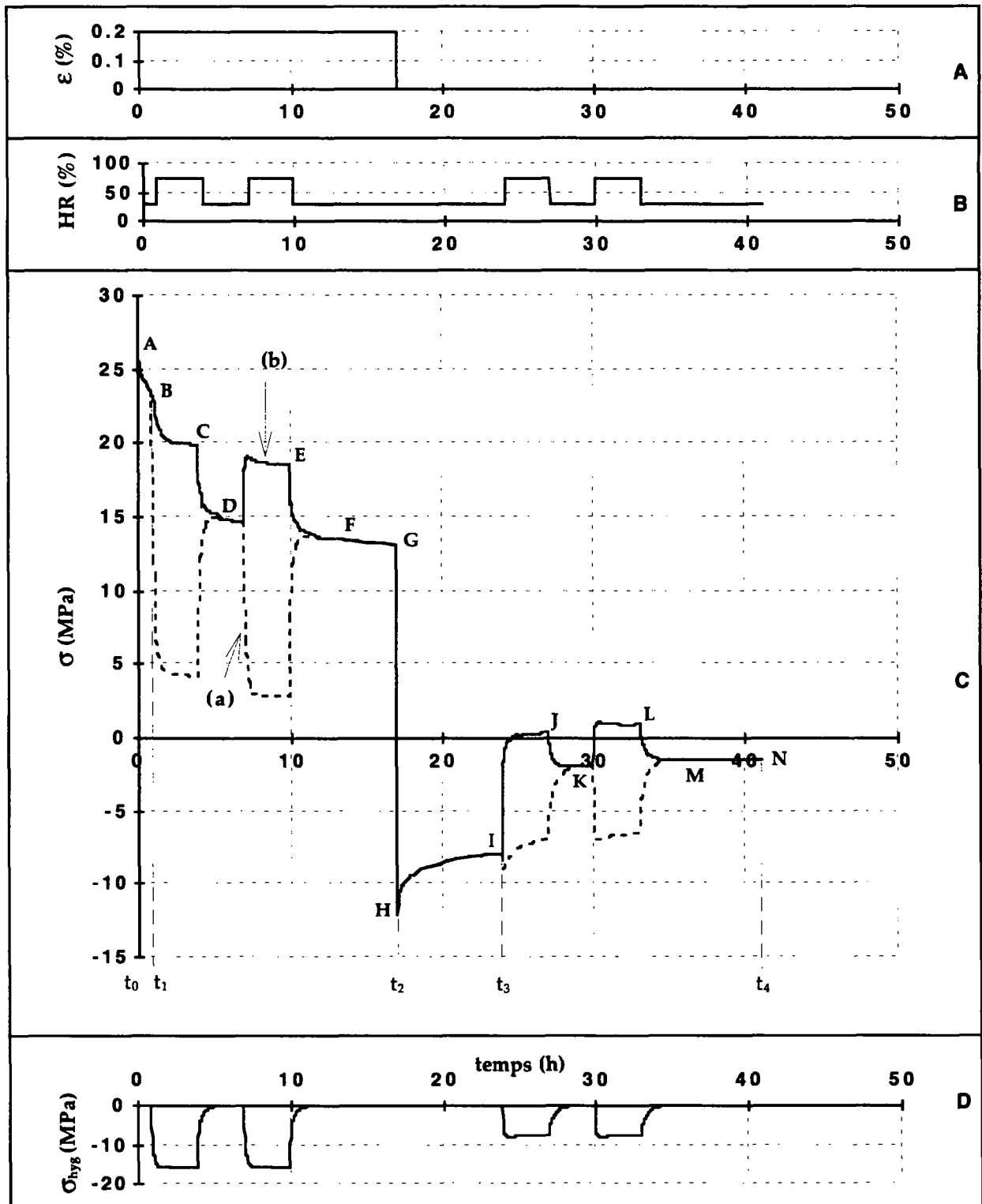


Figure II.10.1. Essai de relaxation-effacement avec variations d'humidité réalisé sur une éprouvette initialement sèche, pour un niveau de déformation correspondant à 22% environ de la contrainte de rupture. **A:** programme de sollicitation mécanique; **B:** programme de sollicitation hydrique; **C:** contraintes σ_{tot} (a) et σ_r (b) **D:** contraintes σ_{hyg} .

Deuxième partie de l'essai:

- A l'instant t_0 l'éprouvette est chargée à une déformation correspondant à 22% de la contrainte de rupture σ_{R30} . La relaxation à humidité constante - σ_{visc} - est mesurée jusqu'à l'instant t_1 pendant la durée Δt_1 . Deux cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposées à l'éprouvette, entre les instants t_1 et t_2 , selon la figure II.10.1.B. La réponse différée sous climat variable σ_{tot} est mesurée pendant la durée Δt_2 .
- A l'instant t_2 , l'éprouvette est remise à sa forme initiale. L'effacement, pour un niveau d'humidité relative constant de 30%, est mesuré jusqu'à l'instant t_3 pendant la durée Δt_3 . Deux cycles de variation d'humidité relative entre 30% et 75% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants t_3 et t_4 , selon la figure II.10.1.B. L'effacement différé sous climat variable est mesuré pendant la durée Δt_4 .

L'ensemble des sollicitations imposées et des résultats obtenus sont donnés sur la figure II.10.1.

Sur la figure II.10.1.C, la courbe (b) représente la contrainte σ_r , définie comme suit:

$$\sigma_r = \sigma_{tot} - \sigma_{hyg} \quad \text{(II.10.1)}$$

Avec σ_{tot} : contrainte totale;

σ_{hyg} : contraintes hydriques.

La contrainte σ_r correspond à la contrainte totale σ_{tot} après déduction des variations de contrainte hydriques σ_{hyg} , mesurées à déformation nulle.

II.10.1.2 DONNÉES COMPARATIVES

Les tableaux II.10.2 et II.10.3 contiennent l'ensemble des valeurs de la contrainte σ_r aux points notés A à N sur la figure II.10.1.C, ainsi que les variations de la contrainte σ_r dans chacun des segments AB à MN.

notations	σ_A	σ_B	σ_C	σ_D	σ_E	σ_F	σ_G	σ_H	σ_I
σ_r (MPa)	26.94	23.54	19.95	14.55	18.62	13.49	13.12	-12.17	-7.86
notations	σ_J	σ_K	σ_L	σ_M	σ_N				
σ_r (MPa)	0.49	-1.85	0.95	-1.45	-1.37				

Tableau II.10.2 Valeurs de contrainte σ_r correspondant aux points A à Q, figure II.10.1.C.

notations	$\Delta\sigma_{AB}$	$\Delta\sigma_{BC}$	$\Delta\sigma_{CD}$	$\Delta\sigma_{DE}$	$\Delta\sigma_{EF}$	$\Delta\sigma_{FG}$	$\Delta\sigma_{GH}$
σ_r (MPa)	-3.40	-3.59	-5.40	4.07	-5.13	-0.37	-25.29
notations	$\Delta\sigma_{HI}$	$\Delta\sigma_{IJ}$	$\Delta\sigma_{JK}$	$\Delta\sigma_{KL}$	$\Delta\sigma_{LM}$	$\Delta\sigma_{MN}$	
σ_r (MPa)	4.30	8.36	-2.34	2.80	-2.41	0.08	

Tableau II.10.3 Valeurs de contrainte σ_r , correspondant aux segments AB à MN, figure II.10.1.C.

II.10.1.3 CONSTATATIONS

On constate, en ce qui concerne la contrainte σ_r , que:

- ★ entre les instants t_0 et t_2 , période durant laquelle la déformation est imposée à l'éprouvette:
 - ◆ la première absorption (BC) entraîne une diminution de la contrainte (augmentation de la relaxation), qui est telle que: $\Delta\sigma_{rBC} \approx 0.14\sigma_{inst}$, avec σ_{inst} la contrainte instantanée mesurée à la charge;
 - ◆ les désorptions (CD) et (EF) entraînent une diminution de la contrainte;
 - ◆ la deuxième absorption (DE) entraîne une ré-augmentation de la contrainte.
 - ◆ Une relaxation supplémentaire de la contrainte est induite lors de chaque cycle hydrique; elle est telle que: $\Delta\sigma_{rBD} \approx 0.34\sigma_{inst}$ lors du premier cycle et $\Delta\sigma_{rDF} \approx 0.04\sigma_{inst}$ lors du second. Au point G, après 17 heures de charge, la contrainte mesurée est telle que: $\sigma_G \approx 0.50\sigma_{inst}$.

- ★ entre les instants t_2 et t_4 , après remise en forme de l'éprouvette:
 - ◆ la première absorption (IJ) entraîne une augmentation de la contrainte telle que: $\Delta\sigma_{rIJ} \approx 0.31\sigma_{inst}$;
 - ◆ les désorptions (JK) et (LM) entraînent une diminution de la contrainte;
 - ◆ l'absorption suivante (DE) entraîne également une augmentation de la contrainte.
 - ◆ Une augmentation de l'effacement est induite lors de chaque cycle hydrique; il est tel que: $\Delta\sigma_{rIK} \approx 0.22\sigma_{inst}$ lors du premier cycle et $\Delta\sigma_{rKM} \approx 0.02\sigma_{inst}$ lors du second.
 - ◆ Une contrainte résiduelle σ_p est mise en évidence au point N, 24 heures après la décharge. Elle est telle que $\sigma_p \approx 0.05\sigma_{inst}$.

- ★ la contrainte instantanée mesurée à la décharge est légèrement inférieure à celle mesurée à la charge, en effet, $\Delta\sigma_{rGH} \approx 0.94\sigma_{rA}$.

II.10.2 ESSAI DE RELAXATION-EFFACEMENT EN TRACTION AVEC CYCLES DE VARIATIONS D'HUMIDITÉ RELATIVE SUR ÉPROUVETTE INITIALEMENT HUMIDE (STABILISÉE A UNE HUMIDITE RELATIVE DE 75%).

II.10.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Un essai de relaxation-effacement avec variations cycliques d'humidité relative sous charge a été réalisé sur une éprouvette initialement humide.

Celui-ci s'est déroulé suivant les étapes données sur le schéma II.10.2. Le détail de ces étapes est donné ci-dessous.

Première partie de l'essai:

L'éprouvette est fixée dans les mors de la presse, puis est maintenue durant 52 heures à une déformation constante et nulle.

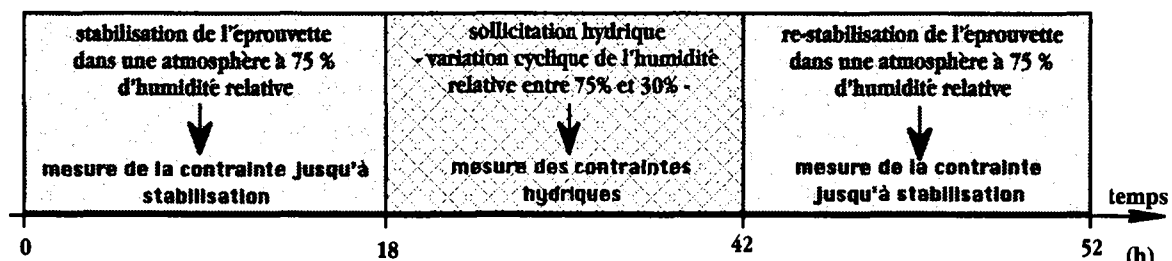
- Un niveau constant de 75% d'humidité relative est maintenu pendant une première période de 18 heures. L'évolution de la contrainte est mesurée jusqu'à ce qu'une valeur de stabilisation soit atteinte.
- L'humidité relative est ensuite cyclée 3 fois entre 75% et 30%. Les variations de contrainte hydriques σ_{hyg} de l'éprouvette dans la direction longitudinale sont alors mesurées.
- Un niveau constant de 75% d'humidité relative est à nouveau fixé durant une dernière période de 10 heures, de manière à permettre une re-stabilisation de la contrainte avant application du programme de chargement.

Deuxième partie de l'essai:

- A l'instant t_0 l'éprouvette est chargée à une déformation correspondant à 22% de la contrainte de rupture σ_{R75} . La relaxation à humidité constante - σ_{visc} - est mesurée jusqu'à l'instant t_1 pendant la durée Δt_1 . Deux cycles de variation d'humidité relative entre 75% et 30% sont ensuite imposées à l'éprouvette, entre les instants t_1 et t_2 , selon la figure II.10.2.B. La réponse différée sous climat variable σ_{tot} est mesurée pendant la durée Δt_2 .

PREMIÈRE PARTIE DE L'ESSAI

mesure des contraintes hydriques



DEUXIÈME PARTIE DE L'ESSAI

application d'une sollicitation mécanique

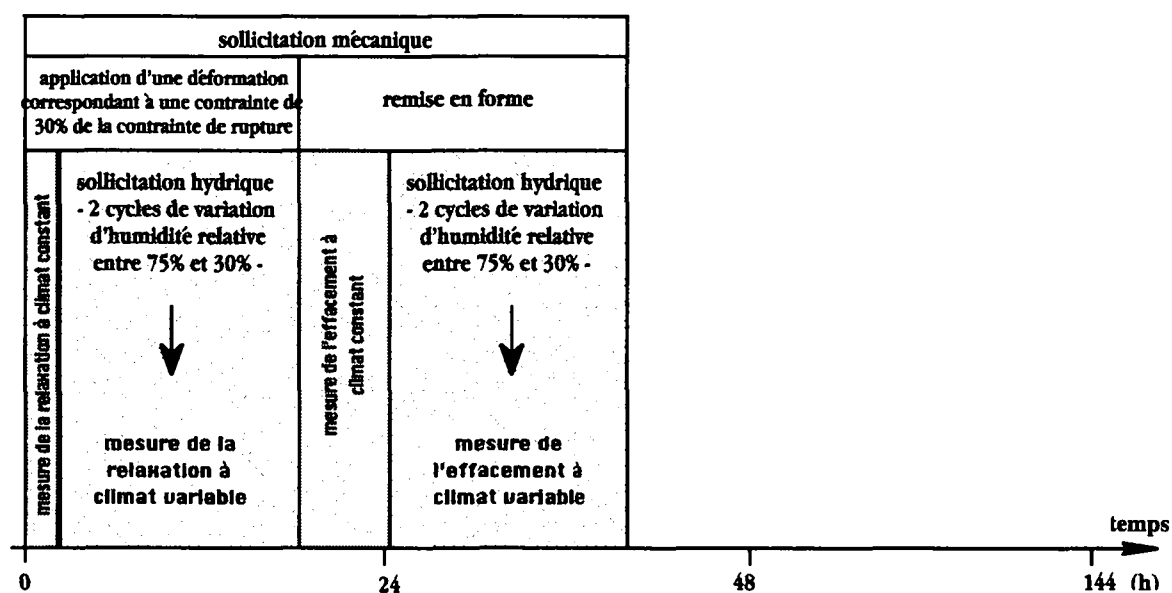


Schéma II.10.2. Étapes de déroulement de l'essai de relaxation-effacement avec variations hydriques effectué sur une éprouvette initialement humide, dont les résultats sont donnés sur la figure II.10.2.

Les notations à prendre en compte sont les suivantes:

notations	t_0	Δt_1	t_1	Δt_2	t_2	Δt_3	t_3	Δt_4	t_4
temps (h)	0	0.5	0.5	16.5	17	7.4	24.4	17	41

Tableau II.10.2 Notations en correspondance avec l'essai décrit sur le schéma II.10.4.

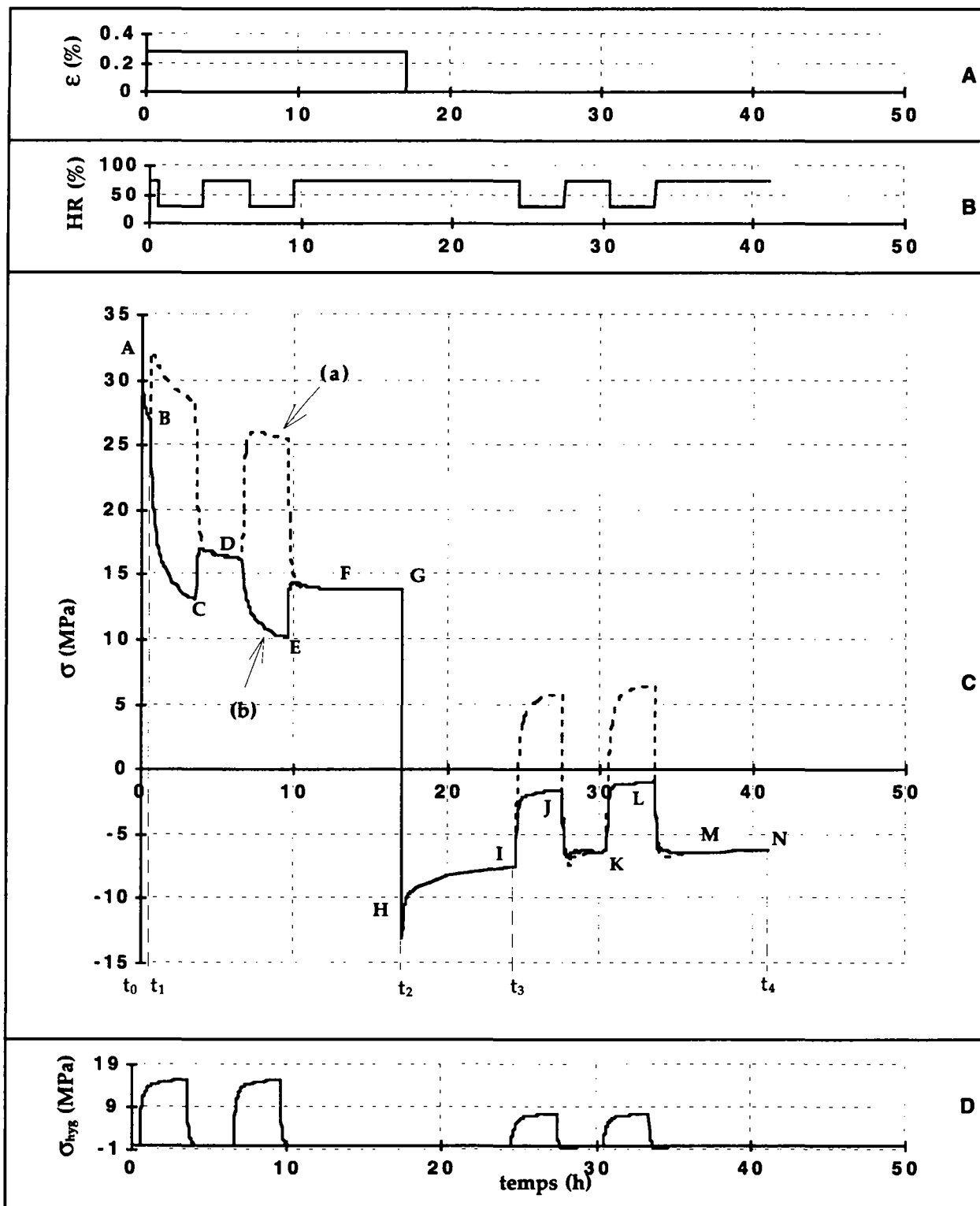


Figure II.10.2. Essai de relaxation-effacement avec variations d'humidité réalisé sur une éprouvette initialement humide pour un niveau de déformation correspondant à 22% environ de la contrainte de rupture. A: programme de sollicitation mécanique; B: programme de sollicitation hydrique; C: contraintes σ_{tot} (a) et σ_r (b) D: contraintes σ_{hyg} .

- A l'instant t_2 , l'éprouvette est remise à sa forme initiale. L'effacement, pour un niveau d'humidité relative constant de 75%, est mesuré jusqu'à l'instant t_3 pendant la durée Δt_3 . Deux cycles de variation d'humidité relative entre 75% et 30% sont ensuite imposés à l'éprouvette, entre les instants t_3 et t_4 , selon la figure II.10.2.B. L'effacement différé sous climat variable est mesuré pendant la durée Δt_4 .

L'ensemble des sollicitations imposées et des résultats obtenus sont donnés sur la figure II.10.2.

II.10.2.2 DONNÉES COMPARATIVES

Les tableaux II.10.5 et II.10.6 contiennent l'ensemble des valeurs de la contrainte σ_r aux points notés A à N sur la figure II.10.2.C, ainsi que les variations de la contrainte σ_r dans chacun des segments AB à MN.

notations	σ_A	σ_B	σ_C	σ_D	σ_E	σ_F	σ_G	σ_H	σ_I
σ_r (MPa)	32.01	27.02	13.18	16.26	10.20	13.94	13.99	-13.03	-7.47
notations	σ_J	σ_K	σ_L	σ_M	σ_N				
σ_r (MPa)	-1.65	-6.19	-1.02	-6.31	-6.11				

Tableau II.10.5 Valeurs de contrainte σ_r correspondant aux points A à N, figure II.10.2.C.

notations	$\Delta\sigma_{AB}$	$\Delta\sigma_{BC}$	$\Delta\sigma_{CD}$	$\Delta\sigma_{DE}$	$\Delta\sigma_{EF}$	$\Delta\sigma_{FG}$	$\Delta\sigma_{GH}$
σ_r (MPa)	-4.99	-13.84	3.08	-6.06	3.74	0.05	-27.02
notations	$\Delta\sigma_{HI}$	$\Delta\sigma_{IJ}$	$\Delta\sigma_{JK}$	$\Delta\sigma_{KL}$	$\Delta\sigma_{LM}$	$\Delta\sigma_{MN}$	
σ_r (MPa)	5.56	5.82	-4.54	5.17	-5.29	0.20	

Tableau II.10.6. Valeurs de contrainte σ_r correspondant aux segments AB à MN, figure II.10.2.C.

II.10.2.3 CONSTATATIONS

On constate, en ce qui concerne la contrainte σ_r , que:

- ★ entre les instants t_0 et t_2 , période durant laquelle la déformation est imposée à l'éprouvette:
 - ◆ la première désorption (BC) entraîne une diminution importante de la contrainte (augmentation de la relaxation). Elle est telle que: $\Delta\sigma_{rBC} \approx 0.43\sigma_{inst}$, avec σ_{inst} la contrainte instantanée mesurée à la charge;

- ◆ les absorptions (CD) et (EF) entraînent une ré-augmentation de la contrainte;
- ◆ la deuxième désorption (DE) entraîne également une diminution de la contrainte.
- ◆ Une relaxation supplémentaire de la contrainte est induite lors de chaque cycle hydrique; elle est telle que: $\Delta\sigma_{rBD} \approx 0.34\sigma_{inst}$ lors du premier cycle et $\Delta\sigma_{rDF} \approx 0.07\sigma_{inst}$ lors du second. Au point G, après 17 heures de charge, l'amplitude de la contrainte mesurée est de $\sigma_G \approx 0.44\sigma_{inst}$.

★ entre les instants t_2 et t_4 , après remise en forme de l'éprouvette:

- ◆ les désorptions (JK) et (LM) entraînent une augmentation de la contrainte;
- ◆ les absorptions (BC) et (DE) entraînent une diminution de la contrainte.
- ◆ L'effacement semble ne pas être affecté par le cyclage hydrique. Une contrainte résiduelle σ_p , d'amplitude plus importante que lors de l'essai précédent, est mise en évidence au point N, 24 heures après la décharge. Elle est telle que: $\sigma_p \approx 0.20\sigma_{inst}$.

★ la contrainte instantanée mesurée à la décharge est légèrement inférieure à celle mesurée à la charge, en effet, $\Delta\sigma_{rGH} \approx 0.94\sigma_{rA}$.

II.10.3 CONCLUSION

A partir des résultats obtenus sur les figures II.10.1 et II.10.2, on constate que :

- ★ dans les deux essais, une *relaxation supplémentaire*, d'amplitude relativement importante, est induite par les cycles de variations hydriques. La diminution de la contrainte σ , engendrée par deux cycles - identiques en durée et en amplitude - est *légèrement plus importante dans le cas où l'éprouvette est initialement humide*.
- ★ en ce qui concerne la branche d'effacement, on constate qu'une *contrainte résiduelle permanente* σ_p peut être mise en évidence, même après deux cycles de variations hydriques. L'amplitude de la contrainte résiduelle est plus importante dans le cas où l'éprouvette à été sollicitée dans un état initialement humide. En effet, *une diminution de la contrainte d'amplitude importante* (augmentation de l'effacement) est engendrée par la première absorption, *dans le cas de l'éprouvette initialement sèche*.

CHAPITRE II.11

RÉCAPITULATION DES RÉSULTATS OBTENUS LORS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS

II.11.1 REMARQUES SUR LE DÉROULEMENT DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS

Les résultats obtenus à partir des essais effectués sur les éprouvettes de faible épaisseur nous ont permis de donner des conclusions sur plusieurs points. Ceux-ci sont relatifs aussi bien au déroulement général de l'expérimentation qu'aux observations résultant des essais.

Il a tout d'abord été important de constater l'existence de grandes dispersions au niveau de la mesure des caractéristiques mécaniques et hydriques - chapitre II.8.3 -. Celles-ci sont liées à la *non-représentativité* des éprouvettes de petites dimensions utilisées, les résultats obtenus du point de vue qualitatif ont toujours été similaires et répétitifs, aussi bien lors des essais à climat constant qu'à climat variable.

Les essais de fluage-recouvrance et relaxation-effacement effectués à climat constant, pour plusieurs niveaux de charge, ont permis de mettre en évidence l'existence d'une déformation ou d'une contrainte résiduelle, dont l'amplitude est plus importante que celle mesurée sur des éprouvettes d'épaisseur plus élevée. Cette amplitude augmente avec le niveau de sollicitation. Ceci semblerait être relié, en partie, à la faible épaisseur des éprouvettes utilisées, Navi et al. (1995), voir chapitre II.4.

En ce qui concerne la campagne d'expérimentation réalisée à climat variable, les essais de fluage-recouvrance avec variations cycliques d'humidité, effectués dans le sens de la traction sur des éprouvettes de faible épaisseur nous ont permis, dans un premier temps, de retrouver des caractéristiques générales de l'effet mécanosorptif comme celles qui furent observées lors des précédents travaux, voir chapitre I.2.

II.11.2 CONSTATATIONS EN RAPPORT AVEC LES TRAVAUX DE PRÉCÉDENTS AUTEURS

Nous avons pu observer, sur les essais de fluage-recouvrance en traction avec variations hydriques cycliques, en ce qui concerne la déformation ε_r , (correspondant à somme de la déformation mécanosorptive ε_{ms} et de la déformation viscoélastique ε_{visc}) que:

★ lors du maintien de la charge:

- (i) ε_r augmente, de manière globale, d'une amplitude importante;
- (ii) le premier changement d'humidité sous charge entraîne toujours une augmentation de ε_r , que celui-ci soit une absorption ou une désorption;
- (iii) les absorptions ultérieures entraînent, en principe, une diminution de ε_r . Une très petite augmentation peut parfois être observé, qui semble lié au niveau de charge considéré;
- (iv) les désorptions entraînent, dans tous les cas, une augmentation de la déformation.

★ après décharge totale de l'éprouvette:

- (v) la recouvrance est accélérée lors des premiers cycles de variation hydrique, et de manière plus importante lors d'une absorption que d'une désorption.

II.11.3 APPORTS NOUVEAUX DU TRAVAIL EFFECTUE

❶ Les essais effectués au chapitre II.7 nous ont permis d'observer que le **délai de mise en route du cyclage hydrique - et donc le temps pendant lequel l'éprouvette est maintenue sous charge constante** - n'a d'influence sur la déformation ε_r qu'*au niveau du premier changement d'humidité*. Cette influence *n'est pas significative*. En effet, l'amplitude de l'augmentation de la déformation induite par la première absorption diminue légèrement avec l'augmentation de son délai de mise en route.

Lors de changements d'humidité ultérieurs, *l'allure des courbes obtenues est quasiment similaire*, quel que soit l'instant de mise en route des variations hydriques. Ceci semble montrer que le couplage entre contrainte et variation d'humidité n'est pas fonction du temps de maintien de la contrainte ("load-duration").

- ② Les essais de fluage-recouvrance avec variations hydriques que nous avons effectués nous ont permis de supposer que la déformation supplémentaire, induite par le couplage mécanosorptif, peut être décomposée en *deux parties*:

la première est mise en évidence *lors de chaque cycle hydrique* imposé à l'éprouvette sous charge. Elle est observée par **l'allure répétitive des oscillations de déformation engendrée par ces cycles** et est telle que:

- ◆ chaque absorption donne lieu à une diminution de la déformation;
- ◆ chaque désorption donne lieu à une augmentation de la déformation.

Dans le cas où le chargement est appliqué sur une éprouvette initialement sèche, stabilisée à une humidité relative atmosphérique de 30%, l'allure répétitive des oscillations se dessine après quelques cycles - 2 à 4 -, comme on peut le voir sur les résultats des essais II.8, figures II.8.1 à II.8.29.

Dans le cas où le chargement est appliqué sur une éprouvette humide, l'allure répétitive semble être obtenue après un nombre de cycles réduit, figures II.7.17 à II.7.21.

Le phénomène observé dans cette partie pourrait s'exprimer par un mécanisme se déroulant principalement au niveau de la microstructure du bois, voir travaux de Mukudai et Yata (1986).

- ★ la deuxième consiste en une **déformation additionnelle**, mise en évidence lors de la **première absorption** qui intervient après application ou modification de la sollicitation mécanique.

En effet, on a constaté, *dans le cas où l'éprouvette est stabilisée à 30% d'humidité relative*, que:

- ◆ la première augmentation de l'humidité relative atmosphérique sous chargement mécanique en traction entraîne une augmentation importante de la déformation, figures II.6.1, II.7.1 à II.7.16, et lors du premier chargement figures II.9.1 et II.9.7.
- ◆ la première augmentation de l'humidité relative atmosphérique sous décharge totale entraîne une diminution importante de la déformation, figures II.6.1, II.8.12, II.8.13, II.8.21, II.8.22 lors des deuxième et troisième décharges.
- ◆ de plus, on constate, sur les essais faisant intervenir des décharges partielles, figures II.9.1 et II.9.7, que la diminution de déformation induite par la première absorption - ou une partie de cette déformation - semble liée à l'incrément de contrainte de la décharge qui précède.

- ◆ par contre, si l'éprouvette subit une modification de la sollicitation non suivie de variations d'humidité, comme c'est le cas sur les essais du chapitre II.8, lors de la première décharge suivie d'une deuxième charge sans variations d'humidité, la variation de déformation mesurée n'est pas d'amplitude aussi importante.

Le signe de la déformation additionnelle apparaît comme étant toujours le même que le signe de l'incrément de contrainte qui précède.

Ce phénomène semblerait mettre principalement en jeu un effet de *plastification* entre les molécules d'eau et les constituants chimiques du bois. Il se déroulerait principalement au *niveau moléculaire*. Ce phénomène se produirait une seule fois dans le cas où le niveau de sollicitation mécanique varierait et il ne semble significatif que si le changement d'humidité appliqué à l'éprouvette va dans le sens de l'humidification (sollicitation mécanique appliquée dans le sens de la traction).

- ④ Dans tous les essais de fluage réalisés, la déformation augmentait globalement après chaque cycle de variations hydriques, aucune limite de fluage n'a été mise en évidence - pour les niveaux de contrainte d'environ 20% de la contrainte de rupture considérés - contrairement à la thèse avancée par Hunt (1986).

Lors d'une décharge totale, la recouvrance - mesurée après deux fois la durée du chargement avant décharge - est partielle, et une déformation résiduelle d'amplitude relativement importante est mise en évidence, même après variation cyclique de l'humidité relative. Elle peut être d'amplitude plus importante que la déformation instantanée, mesurée à la charge (chapitre II.8).

- ④ Des mesures de contraintes engendrées par des variations cycliques d'humidité relative ont été mesurées sur éprouvettes maintenues à une déformation nulle, chapitre II.4. Les résultats obtenus ont montré qu'il existait une *différence d'amplitude entre celles qui sont engendrées dans le sens de la traction* - mesures effectuées sur une éprouvette initialement sèche - *ou dans le sens de la compression* - mesures effectuées sur une éprouvette initialement humide. L'amplitude mesurée est, en effet, deux fois plus importante dans le premier cas.

- ⑤ Des essais de relaxation-effacement en traction avec variations cycliques d'humidité relative atmosphérique, on pu être réalisés sur des éprouvettes initialement sèche ou initialement humide, grâce au dispositif expérimental développé.

Ils ont permis de mettre en évidence:

- ★ une importante relaxation supplémentaire, induite par les changements d'humidité.
- ★ une contrainte résiduelle après remise de l'éprouvette à ses dimensions initiales, dont l'amplitude est plus importante sur les essais effectués sur éprouvettes initialement stabilisée à 75% d'humidité relative.

PARTIE III

MODÉLISATION ET SIMULATION
DU COMPORTEMENT DU BOIS SOUS CLIMAT CONSTANT

SIMULATION DU COMPORTEMENT DU BOIS SOUS CLIMAT CONSTANT

III.1 INTRODUCTION

Le bois est un matériau qui évolue au cours du temps. Une réponse différée est, en effet, mise en évidence lors de sollicitations de longue durée. Celle-ci peut correspondre à une déformation de fluage, lors de l'application d'une charge constante, ou à une relaxation de la contrainte lors du maintien de la déformation à une valeur fixe. L'illustration expérimentale de ce phénomène a été donnée dans le chapitre III.4, pour les éprouvettes de faible épaisseur, dans le cas d'un climat constant.

Le bois peut être considéré comme un matériau orthotrope du point de vue de ses propriétés mécaniques ou hydriques, ses axes principaux d'orthotropie étant définis au chapitre I.1. Seul le comportement dans la direction longitudinale est étudié dans cette partie puisque tous les essais ont été réalisés pour une sollicitation en traction dans le sens des fibres. Une étude du comportement dans les directions transversale et radiale permettrait de compléter la modélisation et la simulation pour l'étendre au cas tri-dimensionnel.

La méthode utilisée pour écrire la loi de comportement à climat constant est décrite en premier lieu, puis, sur la base de modèles rhéologiques choisis, un résultat de la simulation est exposé et commenté en comparaison avec le résultat expérimental.

III.2 COMPORTEMENT A CLIMAT CONSTANT

III.2.1. FORMULATION FONCTIONNELLE

L'écriture d'une loi de comportement d'un matériau héréditaire se fait de manière générale à partir d'une représentation fonctionnelle, faisant intervenir l'histoire antérieure des sollicitations. La réponse s'écrit alors sous la forme:

$$R(t) = \mathbf{F}[S(u), 0 \leq u \leq t] \quad (\text{III.1})$$

où \mathbf{F} est une fonctionnelle de l'histoire antérieure des sollicitations.

Dans le cas où la fonctionnelle \mathbf{F} est linéaire, elle peut être représentée sous la forme d'une intégrale simple de Stieljes. Pour un matériau non-vieillissant, on peut écrire:

$$R(t) = \int_0^t k(t-u) dS(u) \quad (\text{III.2})$$

La fonction $k(t-u)$ correspond au noyau de la fonctionnelle \mathbf{F} .

On peut distinguer le cas où la sollicitation est une contrainte et la réponse une déformation, et celui où la sollicitation est une déformation et la réponse une contrainte. Dans le premier cas, la fonctionnelle associée sera nommée \mathbf{F} et dans le second \mathbf{G} . On peut alors écrire:

$$\varepsilon(t) = \mathbf{F}[\sigma(u), 0 \leq u \leq t] \quad (\text{III.3})$$

$$\sigma(t) = \mathbf{G}[\varepsilon(u), 0 \leq u \leq t] \quad (\text{III.4})$$

Les deux fonctionnelles \mathbf{F} et \mathbf{G} sont inverses l'une de l'autre.

Dans le cas d'un matériau à comportement viscoélastique linéaire, on a:

$$\varepsilon(t) = \int_{0^-}^t f(t-u) d\sigma(u) \quad (\text{III.5})$$

$$\sigma(t) = \int_{0^-}^t r(t-u) d\varepsilon(u) \quad (\text{III.6})$$

La fonction $f(t-u)$ est le tenseur des fonctions fluage et la fonction $r(t-u)$ le tenseur des fonctions relaxation du matériau. La connaissance de ces fonctions, effectuée de manière expérimentale, permet de caractériser totalement les fonctionnelles correspondantes.

L'écriture d'une loi de comportement utilisant une approche intégrale fait donc intervenir l'histoire antérieure du chargement.

Du point de vue numérique, la résolution peut devenir très coûteuse en temps et en mémoire, puisqu'il est nécessaire de stocker l'ensemble des valeurs aux instants antérieurs. Ce problème peut être évité par l'utilisation d'une méthode basée sur un formalisme thermodynamique. Celle-ci est exposée dans les paragraphes qui suivent.

III.2.2 LA MÉTHODE DES VARIABLES INTERNES

Une méthode, développée par Biot (1954), Mandel (1966) et Huet (1980, 1988, 1993), basée sur une représentation thermodynamique du comportement, permet de lever le problème de stockage par l'utilisation d'un ensemble approprié de variables internes $\alpha = \{\alpha_i\}$, dont les forces thermodynamiques X_i correspondantes ne sont fonction que des valeurs actuelles des α et des vitesses $\dot{\alpha}$, et non de leur histoire antérieure.

Le formalisme des variables internes suppose que la loi de comportement d'un matériau peut s'exprimer comme une fonction de la déformation totale ε et d'un ensemble de variables internes indépendantes $\alpha = \{\alpha_i\}$, sous la forme d'un système d'équations canoniques qui, à climat constant s'écrit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial R}{\partial \dot{\varepsilon}} + \frac{\partial \Phi}{\partial \varepsilon} = \sigma \\ \frac{\partial R}{\partial \dot{\alpha}_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_i} = 0; \quad i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(équation dynamique)} \\ \text{(équations cinétiques)} \end{array} \quad (8.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial R}{\partial \dot{\varepsilon}} + \frac{\partial \Phi}{\partial \varepsilon} = \sigma \\ \frac{\partial R}{\partial \dot{\alpha}_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_i} = 0; \quad i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(équation dynamique)} \\ \text{(équations cinétiques)} \end{array} \quad (8.8)$$

où $\Phi = \Phi(\varepsilon, \alpha_i)$ représente l'énergie libre du matériau par unité de volume représentatif. C'est un potentiel d'état, indépendant des vitesses de déformation $\dot{\varepsilon}$ et $\dot{\alpha}$, d'après le théorème de Coleman (1964). Dans le cas d'un équilibre thermodynamique, l'énergie libre est équivalente à un potentiel thermodynamique.

La fonction R , apparaissant dans les équations (III.7) et (III.8) est nommée fonction dissipative de Rayleigh. Elle est définie à partir de la dissipation D par la relation:

$$D = \frac{\partial R}{\partial \dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\alpha}} \dot{\alpha} \quad (III.9)$$

R est un potentiel cinétique dépendant des variables ε et α ainsi que de leur vitesse de variation $\dot{\varepsilon}$ et $\dot{\alpha}$.

$$R = R(\dot{\varepsilon}, \dot{\alpha}, \varepsilon, \alpha) \quad (\text{III.10})$$

L'équivalence entre les deux approches thermodynamique et fonctionnelle a été établie pour les comportements viscoélastiques linéaires non vieillissants par Biot (1954) et Mandel (1966).

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de déterminer la loi de comportement de n'importe quel système élasto-visco-plastique, pour autant que l'on puisse déterminer explicitement les expressions des deux potentiels Φ et R .

L'ensemble des variables internes choisies peuvent être de nature très diverses. Elles expriment en général des particularités liées à la structure interne du matériau, par exemple au niveau des hétérogénéités (nombre de dislocations, défauts), pouvant être à l'origine de phénomènes d'endommagement ou d'une déformation plastique. Un autre choix peut, par exemple, se porter sur des variables de nature chimique, voir Guidoum (1994), Huet (1995).

III.2.3 AUTRES SPÉCIFICITÉS DE LA MÉTHODE

La méthode des variables internes comporte l'avantage supplémentaire de pouvoir s'appliquer non seulement aux comportements viscoélastiques linéaires, mais également aux comportements non-linéaires, de type plasticité ou viscosité non-linéaire. De plus, des éléments à spectre continu peuvent également être considérés, faisant intervenir cette fois l'histoire antérieure des sollicitations, tel l'élément parabolique. Cette approche a été introduite par Huet (1993, 1995) et porte le nom de méthode hybride. Elle permet de pouvoir tenir compte de comportements faisant intervenir des spectres continus, généralisant ainsi le formalisme des variables internes.

La seule difficulté réside en la détermination du potentiel d'énergie libre et de la fonction dissipative de Rayleigh, ce qui revient à pouvoir effectuer une séparation des énergies.

III.2.4 APPLICATION A L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX

Un logiciel a été réalisé sur la base du formalisme des variables internes. Il ne s'applique pas uniquement à l'étude du comportement du bois, mais à celui des matériaux de manière plus générale.

Le but de ce logiciel est de déterminer la loi de comportement d'un matériau, à partir du choix préalable d'un modèle formé par une association en série ou en parallèle d'éléments rhéologiques. Les différents types d'éléments pouvant entrer dans l'élaboration d'un modèle sont actuellement au nombre de 5.

Ces éléments sont:

- le ressort, caractérisant un comportement élastique linéaire;
- l'amortisseur, caractérisant un comportement visqueux newtonien;
- le patin à frottement sec, caractérisant un comportement rigide parfaitement plastique;
- l'élément d'Eyring, caractérisant un comportement visqueux non-linéaire;
- l'élément parabolique, caractérisant un comportement dont la loi est de type puissance.

Les expressions explicites des deux potentiels Φ et D relativement à un modèle donné seront déterminées en supposant que le système considéré peut être divisé en N sous-systèmes. Ces sous-systèmes sont formés des éléments constitutifs pris séparément, voir Huet (1992). Les propriétés d'additivité des deux potentiels sur l'ensemble du système permettent d'écrire les relations suivantes:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \Phi_i \quad (\text{III.11})$$

$$D = \sum_{i=1}^N D_i \quad (\text{III.12})$$

avec Φ_i et D_i l'énergie libre et la puissance dissipée relatives au "i"ème sous-système.

L'expression de ces deux potentiels est donnée dans les paragraphes qui suivent pour chaque type d'élément.

III.2.4.1 Éléments linéaires

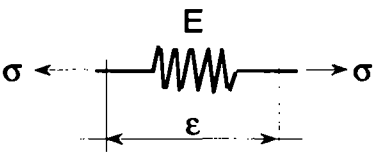
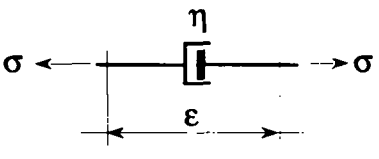
Schématisation de l'élément	énergie libre Φ	fonction dissipative de Rayleigh R
	$\Phi = \frac{1}{2} E \varepsilon^2$	$R = 0$
	$\Phi = 0$	$R = \frac{1}{2} \eta \dot{\varepsilon}^2$

Tableau III.1. Expression des potentiels Φ et R relativement aux éléments linéaires

Dans le tableau III.1 sont données les expressions de deux potentiels Φ et R pour les deux éléments considérés.

III.2.4.1 Éléments non-linéaires

Deux éléments ont été considérés, d'une part, un élément patin et d'autre part l'élément d'Eyring.

III.2.4.2.1 Patin à frottement sec

La loi de comportement de l'élément plastique (patin) suit l'équation suivante:

$$\sigma = k \frac{\dot{\epsilon}}{\sqrt{\dot{\epsilon}^2}} = k \text{sign}(\dot{\epsilon}) \quad (\text{III.13})$$

Ceci se traduit par une courbe contrainte-déformation de la forme donnée sur la figure III.1. Le comportement mis en évidence est celui d'un solide rigide parfaitement plastique.

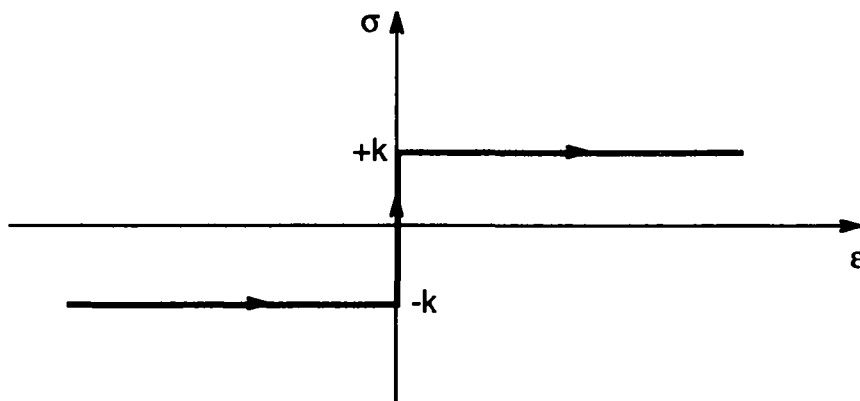


Figure III.1. Courbe contrainte-déformation du patin à frottement sec.

III.2.4.2.2 Viscosité non-newtonienne (élément d'Eyring)

Celui-ci, proposé par Eyring (1934), est basé sur la statistique de Boltzmann pour la probabilité de franchissement d'une barrière de potentiel énergétique séparant, pour un même élément cinétique, deux sites stables voisins.

Sa loi de comportement suit l'équation:

$$\sigma = G \operatorname{Argsh}(\tau \dot{\varepsilon}) \quad (\text{III.14})$$

où G à la dimension d'un module et τ celle d'un temps.

Dans le tableau III.2 sont données les expressions des potentiels Φ et R pour les deux éléments non-linéaires considérés. La fonction de Rayleigh du modèle d'Eyring est non classique et a été établie par Huet (1993).

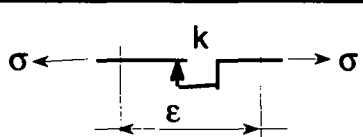
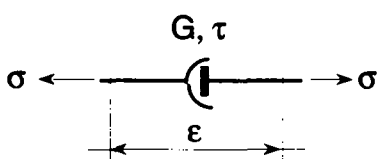
Schématisation de l'élément	énergie libre Φ	fonction dissipative de Rayleigh R
	$\Phi = 0$	$R = k\sqrt{\dot{\varepsilon}^2}$
	$\Phi = 0$	$R = \frac{G}{\tau} \left[1 + \tau \dot{\varepsilon} \operatorname{Argsh}(\tau \dot{\varepsilon}) - \sqrt{1 + (\tau \dot{\varepsilon})^2} \right]$

Tableau III.2. Expression des potentiels Φ et R relativement aux éléments non-linéaires

III.2.4.3 Éléments à mémoire

La loi de comportement d'un élément parabolique, caractérisée par une fonction de type puissance, ne peut s'écrire que de manière générale, sous forme d'une intégrale, donnée par l'équation (III.15), faisant ainsi intervenir l'histoire antérieure des sollicitations.

$$\sigma(t) = G_p \int_0^t \left(\frac{t-u}{\tau} \right)^{-k} d\varepsilon(u) \quad (\text{III.15})$$

où G_p correspond au module et τ au temps de relaxation.

Dans ce cas, il n'est pas évident de pouvoir séparer les énergies par des considérations simples comme pour les éléments précédents. En effet, l'élément parabolique n'est ni purement non-dissipatif, ni purement dissipatif. Pour écrire l'énergie libre et la fonction dissipative de Rayleigh on considère alors des formes quadratiques générales définies positives, Staverman et Schwarzl (1952), qui s'écrivent sous la forme suivante:

$$\Phi = \frac{1}{2} \int_0^t \int_0^t r(2t-u-v) d\epsilon(u) d\epsilon(v) \quad (\text{III.16})$$

et

$$R = \frac{1}{2} \int_0^t \int_0^t r(2t-u-v) d\epsilon(u) d\epsilon(v) \quad (\text{III.17})$$

en posant ici l'expression suivante:

$$r(2t-u-v) = G_p \left(\frac{2t-u-v}{\tau} \right)^{-k} \quad (\text{III.18})$$

La comparaison des résultats de la simulation avec ceux obtenus lors d'un essai de relaxation-effacement à climat constant est exposé ci-dessous.

III.3 APPLICATION AU MATÉRIAU BOIS

Considérons le problème inverse, à partir des résultats obtenus sur la figure III.2. Sur cette figure est donné le résultat d'un essai de relaxation-effacement obtenu sur une éprouvette de bois de faible épaisseur stabilisée dans une atmosphère à 75% d'humidité relative. L'amplitude de la déformation imposée correspond à une contrainte d'environ 14% de la contrainte de rupture. La relaxation de la contrainte est mesurée pendant 3 heures, puis l'éprouvette est remise à sa forme initiale. L'effacement est mesuré durant 4 heures.

Le comportement obtenu est montré sur la figure III.2. On peut observer que l'effacement n'est pas total. En effet, il subsiste une contrainte résiduelle dans le matériau 4 heures après sa remise en forme. D'après le critère de Mandel, cela montre que le matériau - testé dans ces conditions - n'est pas purement viscoélastique et que son comportement fait intervenir de la plasticité.

Dans le but d'effectuer un fittage des données, nous avons choisi un modèle de Maxwell généralisé comportant 5 branches (Figure III.3).

Les constantes du modèle sont les suivantes:

$$E_0 = 4562 \text{ MPa};$$

$$E_1 = 415 \text{ MPa}; \tau_1 = 0.89 \text{ h}$$

$$E_2 = 347 \text{ MPa}; \tau_2 = 0.09 \text{ h}$$

$$E_3 = 154 \text{ MPa}; \tau_3 = 0.42 \text{ h}$$

$$E_4 = 139 \text{ MPa}; \tau_4 = 2.7 \text{ h}$$

$E_5 = 1000 \text{ MPa}; k = 1.025 \text{ MPa}$

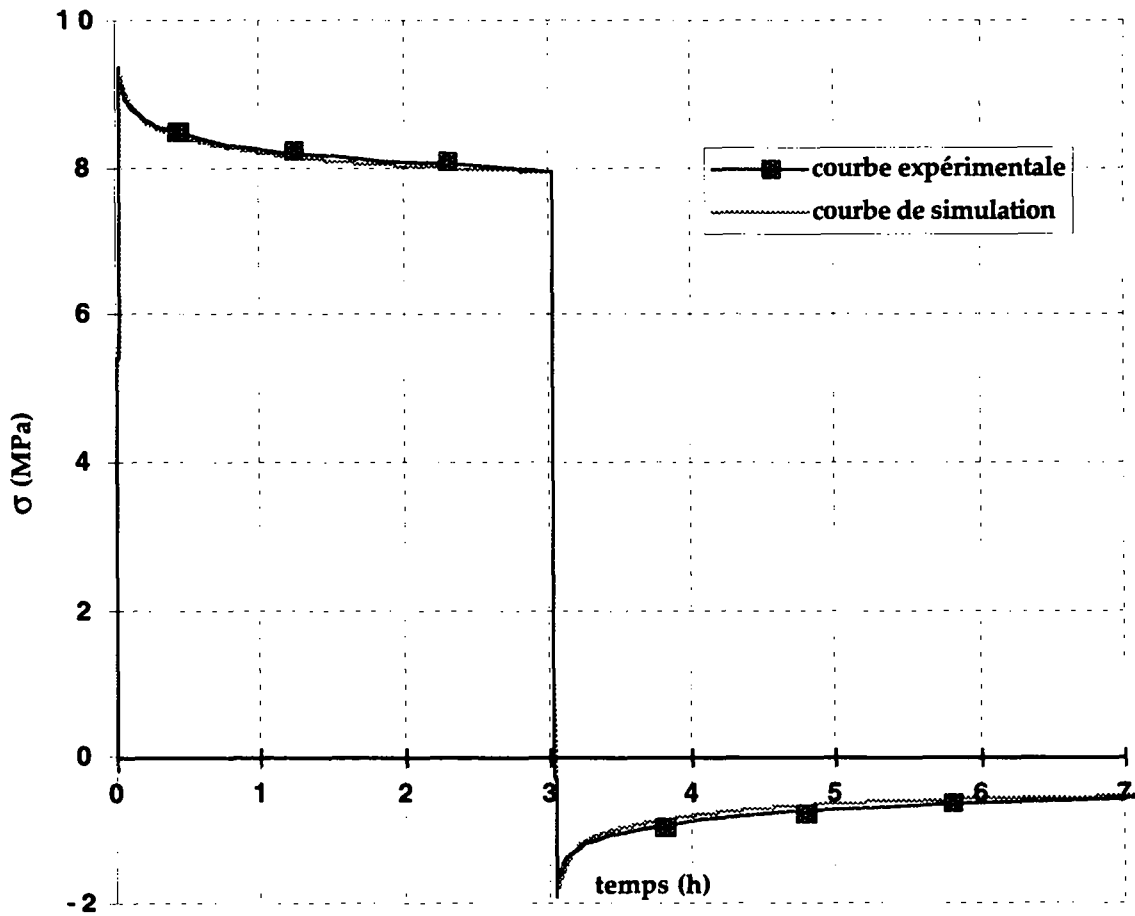


Figure III.2 Essais de relaxation - effacement pour un niveau de déformation, correspondant à un niveau de contrainte de 14% de la contrainte de rupture. L'humidité relative est maintenue constante à 75%.

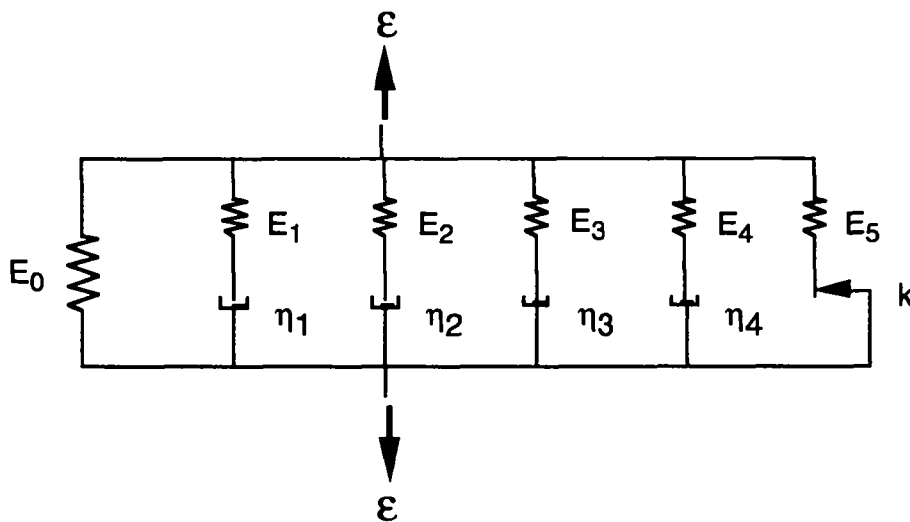


Figure III.3
Modèle de
Maxwell généralisé

Comme on peut le voir sur la figure III.2, la partie de relaxation a pu être approximée avec une bonne précision.

Un modèle de Maxwell généralisé comportant 4 branches permet une bonne approximation de la première partie de la courbe expérimentale relative à la branche de relaxation. Par contre, avec ce modèle purement viscoélastique, la branche d'effacement devrait tendre vers zéro, ce qui n'est pas le cas sur le résultat obtenu expérimentalement. Il a été trouvé, pour résoudre ce problème, qu'il suffisait de rajouter au modèle une cinquième branche, comportant un élément non-linéaire du type patin. Comme on peut l'observer, l'introduction de cette branche a permis de tenir compte de manière correcte de l'effacement partiel observé expérimentalement sur le matériau.

III.4 CONCLUSION

Sur la base du résultat de la simulation exposé dans le paragraphe précédent, ainsi que de ceux obtenus à partir de modèles élasto-visco-plastiques linéaires ou non-linéaires dont le détail n'est pas présenté dans cette thèse, on peut conclure que le formalisme général utilisé ainsi que le logiciel réalisé permettent de prédire de manière correcte les réponses locales ou globale d'un modèle choisi de manière arbitraire, quelque soit le programme de sollicitation qui lui est imposé.

Ceci est lié en grande partie à la puissance de la méthode des variables internes utilisée, qui permet la détermination de la réponse de modèles arbitraires linéaires ou non-linéaires à partir de la seule connaissance du système d'équations canoniques.

Le formalisme appliqué au cas du climat constant s'étant donc avéré efficace, la prochaine étape serait de l'étendre au cas du climat variable, en écrivant un nouveau système d'équations canoniques fonctions de la température et de la teneur en eau. L'introduction de variables internes de nature physico-chimique correctement choisies permettrait peut-être de rendre compte d'effets mécanosorptifs observés.

CONCLUSION

Le bois est un matériau naturel d'une très grande complexité. L'agencement des différents polymères qui le composent, comme on peut le voir dans la description du chapitre I.1, ainsi que leurs propriétés physiques et chimiques sont à l'origine de la complexité de son comportement hygro-mécanique. L'étude bibliographique du chapitre I.2 a donné un aperçu de l'ampleur des travaux déjà réalisés sur le problème des effets mécanosorptifs, observés lors de variations hydriques sous chargements de longue durée.

Le travail de thèse présenté a été effectué dans le but de tenter d'apporter des éléments nouveaux à la recherche des mécanismes qui sont mis en jeu dans les effets mécanosorptifs du bois. L'originalité de l'étude expérimentale effectuée réside dans le fait qu'elle a été menée sur des éprouvettes de bois de faible épaisseur (0.7 mm), selon le choix exposé dans le chapitre II.1. Des programmes de sollicitation complexes sous variations hydriques contrôlées ont été réalisés. D'autre part, un logiciel permettant la simulation du comportement élasto-visco-plastique linéaire ou non-linéaire sous climat constant a été développé sur la base de la méthode des variables internes.

Une partie importante du temps consacré à l'étude a été relative à la mise au point d'un dispositif expérimental permettant la réalisation d'essais hygromécaniques en traction sur le bois de faible épaisseur. Celui-ci se devait, d'une part, de permettre une mesure précise de la réponse de l'éprouvette sous sollicitation parfaitement régulée - en contraintes ou en déformations. D'autre part, il était nécessaire d'assurer un bon contrôle des conditions d'environnement imposées à l'éprouvette.

Dans cette optique, nous avons, dans un premier temps, fait l'acquisition d'une presse de traction-compression, conçue selon nos propres spécifications. Cette presse est pilotée par un logiciel permettant d'imposer à l'éprouvette des programmes de sollicitation complexes (cycles de charge-décharge, décharges partielles d'amplitude variable, par exemple). Les mesures précises de la déformation ont pu être réalisées grâce à la fixation, sur l'éprouvette, d'un extensomètre de très faible masse (8g). Dans un deuxième temps, une cellule hygrothermique a été spécialement fabriquée dans notre laboratoire. Composée de deux demi-cylindres, coulissant sur les tiges des mors de la presse, elle permet de maintenir l'éprouvette dans des conditions climatiques contrôlées. Sa conception en double-paroi permet la circulation d'eau, dont la température, constante, est régulée par un bain thermostatique. L'humidité relative dans la cellule est réglée par le moyen de débitmètres, permettant le mélange d'une quantité d'air comprimé sec et humide (chapitre II.2).

Une fois le dispositif expérimental mis au point, une première sélection d'éprouvettes a été réalisée dans un cerne de bois d'été de pin maritime. La campagne expérimentale a débuté par la réalisation d'essais préliminaires, consistant en la mesure de caractéristiques mécaniques (module d'élasticité et contrainte à la rupture sur des éprouvettes stabilisées à 30% et 75% d'humidité relative atmosphérique) et hydrique (mesure des variations dimensionnelles hydriques longitudinales, entre 30% et 75% d'humidité relative; mesure des contraintes hydriques longitudinales). Ils nous ont permis d'être attentifs, au vu de la variabilité des résultats obtenus, à la non-représentativité des éprouvettes de faible épaisseur utilisées. Ils ont abouti à un tri supplémentaire des éprouvettes sur le module d'élasticité et à des choix sur le déroulement des essais sous climat variable (chapitre II.3).

Le comportement du bois sous climat constant a ensuite été observé.

Des essais de fluage-recouvrance en traction ont été réalisés sur des éprouvettes préalablement stabilisées à une valeur constante de 30%, puis 75% d'humidité relative atmosphérique, pour plusieurs niveaux de contrainte. Une déformation permanente, d'amplitude plus importante que celle mesurée sur des éprouvettes de dimensions élevées, a été mise en évidence à la décharge - après une durée supérieure ou égale à la durée préalable de maintien de la charge. Elle augmente avec le niveau de charge et l'humidité relative, et peut atteindre une amplitude correspondant à environ 30% de la déformation instantanée, mesurée à la charge.

Des essais de relaxation-effacement en traction ont été réalisés sur des éprouvettes préalablement stabilisées au même niveau constant d'humidité relative atmosphérique. Une contrainte résiduelle permanente a été mise en évidence, elle augmente avec le niveau de sollicitation. Elle peut atteindre une amplitude d'environ 20% de la contrainte instantanée, mesurée à la charge (chapitre II.4).

L'étude du comportement du bois sous climat variable a été regroupé en 6 chapitres.

Une première série d'essais de fluage-recouvrance en traction a été effectuée dans le but d'observer les caractéristiques générales du comportement hygromécanique du bois (chapitre II.5). Ils ont été effectués sur éprouvettes initialement sèche et initialement humide. Les résultats obtenus ont permis d'observer - de même que lors des travaux de précédents auteurs - l'augmentation importante de la déformation mécanosorptive après plusieurs cycles de variations d'humidité relative. D'autre part, nous avons retrouvé le caractère paradoxal engendré par une absorption ou une désorption sur cette déformation. Cependant, dans le cas où le *premier changement d'humidité après charge ou décharge de l'éprouvette est une absorption* - charge appliquée sur une éprouvette initialement sèche - on observe une *variation de la*

déformation mécanosorptive d'amplitude importante. Elle se fait dans le même sens que l'incrément de contrainte qui précède.

Des essais de fluage-recouvrance en traction ont été ensuite réalisés sur plusieurs groupes d'éprouvettes provenant d'une même série de coupe (chapitre II.7). Dans un groupe donné, les éprouvettes - stabilisées initialement à la même humidité relative atmosphérique - ont été sollicitées au même niveau de contrainte. Seul variait le délai de mise en route du cyclage hydrique, et donc le temps pendant lequel la contrainte était maintenue à un niveau donné. Les observations effectuées ont montré que ce temps n'avait d'influence sur la déformation mécanosorptive qu'au niveau du premier changement d'humidité, et qu'elle n'était pas d'amplitude significative.

Deux types d'essais sous climat variable, faisant intervenir des programmes de sollicitation complexes, ont été réalisés dans le but d'observer l'effet de la première absorption après application ou modification du niveau de contrainte (chapitres II.8 et II.9).

Dans un premier temps, deux essais de fluage-recouvrance consistant en des cycles de variations hydriques sous cycles de charge-décharge ont été réalisés sur des éprouvettes initialement sèches, pour deux niveaux de contrainte. Dans un second temps, deux éprouvettes initialement sèches ont été soumises à un même niveau de contrainte, puis déchargées partiellement en 4 étapes. L'amplitude des décharges partielles était soit identique, soit croissante. Les éprouvettes ont ensuite été soumises à un deuxième cycle de charge suivie d'une décharge totale. A chaque palier de contrainte considéré, un cyclage hydrique identique a été appliqué à l'éprouvette.

Ces essais nous ont permis de mettre en évidence une différence entre l'effet de la première absorption intervenant après modification de la charge et les changements d'humidité ultérieurs. Il a ainsi été suggéré que la déformation supplémentaire, induite par les couplages mécanosorptifs, pouvait être considérée comme la superposition de deux déformations, provenant de deux différents phénomènes. Le premier, qui semblerait être lié principalement à des mécanismes se déroulant au niveau de la microstructure du bois, est observé par l'allure répétitive des oscillations de la déformation engendrée lors de chaque cyclage hydrique. Le deuxième, mis en évidence uniquement lors de la première absorption qui intervient après modification de la charge, consisterait en une déformation additionnelle d'amplitude importante. Le signe de cette déformation semblerait être lié au signe de la modification de contrainte qui précède.

Deux essais de relaxation-effacement sous climat variable ont été effectués sur des éprouvettes initialement sèche et initialement humide, grâce au dispositif expérimental mis en place. Les essais obtenus ont montré qu'une importante relaxation supplémentaire est induite par le cyclage

hydrique. Une contrainte résiduelle permanente est mise en évidence après remise en forme de l'éprouvette, même après cyclage hydrique. Une différence d'amplitude de la contrainte résiduelle est cependant observée entre les deux essais - lié, à nouveau, à l'effet du premier changement d'humidité.

Parallèlement à l'étude expérimentale effectuée, un logiciel de simulation du comportement élasto-visco-plastique linéaire ou non-linéaire des matériaux a été développé. Il se base sur la méthode des variables internes (partie III). Cette méthode permet de lever le problème du stockage de l'histoire antérieure de la sollicitation, contrairement à l'utilisation d'une méthode classique basée sur une formulation fonctionnelle. D'autre part, elle extrêmement puissante, puisqu'elle permet de déterminer la loi de comportement de n'importe quel système élasto-visco-plastique, pour autant que l'on puisse déterminer explicitement les expressions de l'énergie libre Φ et de la fonction dissipative de Rayleigh R pour un modèle rhéologique donné. Le logiciel présenté s'applique uniquement à l'étude du comportement sous climat constant. Une extension au climat variable nécessiterait la détermination de nouvelles expressions des deux potentiels, pour écrire un système d'équation canoniques dépendant de la température et de l'humidité.

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit à la base d'un projet d'étude sur le comportement hygro-thermo-mécanique du bois, dont la poursuite est envisagée dans le laboratoire. Elle devrait être continuée, dans un premier temps, par un travail de caractérisation minutieux des effets mécanosorptifs à partir des essais réalisés, avant de déboucher sur un travail de modélisation.

BIBLIOGRAPHIE

Andriamitantsoa L.D. et Castera P., 1988: Mécanosorption et ultrastructure. *Etudes sur le pin maritime. COST 508.*

Andriamitantsoa L.D., Castera P. et Morlier P., 1991: Effets mécanosorptifs sur le pin maritime: cristallinité et modélisation. *Materials and Structure. 24: 83-99.*

Armstrong L. et Kingston R., 1960: The effect of moisture changes on creep in wood. *Nature 185: 862-863.*

Armstrong L. et Kingston R., 1962: The effect of moisture content changes on the deformation of wood under stress. *Austr. J. Appl. Sci. 13: 257-276.*

Back E.L., Salmen L. et Richardson G., 1983: Transient effects of moisture sorption on the strength properties of paper and wood-based materials. *Svensk papperstidning 1983: R61-71.*

Barber N.F., Meylan B.A., 1964 : The anisotropic shrinkage of wood: A theoretical model. *Holzforschung BD 18 : 146-156.*

Bazant Z.P., 1985: Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature. *Wood Sci. Technol. 19: 159-177.*

Bazant Z.P., 1988: Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete. *John wiley & Son ltd.*

Becker H. et Reiter L., 1970: Uber den Einfluss von Temperatur und Holzfeuchtigkeit auf die Relaxation der Biegespannungen in Rotbuchenholz. *Holz als Roh.- und Werk. 28 (7): 264-270.*

Bethe E., 1969: Festigkeitseigenschaften von Bauholz bei Lagerung im Wechselklima unter gleichzeitiger mechanischer Belastung. *Holz als Roh.- und Werk. 27 (8): 291303.*

Biot M.A., 1954 : Theory of stress strain relations in anisotropic viscoelasticity relaxation phenomena. *J. Appl. PhysicS*, 13 : (11): 1385-1391.

Bodig J., Jayne B.A., 1982 : Mechanics of wood and wood composites. *Van Nostrand Reinhold Co.*

Boyd J.D., 1982: An anatomical explanation for visco-elastic and mechano-sorptive creep in wood, and effects of loading rate on strength. *Baas, P. (Ed): New perspectives in wood anatomy. La Hague: 171-222.*

Cariou J.L., 1987 : Caractérisation d'un matériau viscoélastique anisotrope : Le bois. *Thèse Université de Bordeaux I.*

Carrington H., 1922: The elastic constants of spruce as influenced by moisture. *The aeronautical journal.* 462-471.

Castera P., 1988: Comportement mécanique d'une pièce de bois soumise à des gradients évolutifs d'humidité. *COST 508.*

Chabert J., 1966: Contribution à l'étude physico-chimique de la sorption de vapeur d'eau par les fibres textiles. *Thèse de Docteur-Ingénieur. Paris*

Cheng J.-C. et Schniewind A.P., 1985: Creep buckling of small, slender wood columns under cyclic environment. *Wood and Fiber Science* 17: 159-169.

Christensen G.N. et Kelsey K.E., 1959: Die Geschwindigkeit der Wasserdampfsorption durch Holz. *Holz Roh. Werk.* 17, 5: 178-188.

Christensen G.N., 1960: Kinetics of sorption of water vapour by wood. *Austr. J. Appl. Sci.* 11: 295-304.

Christensen G., 1962: The use of small specimens for studying the effect of moisture content changes on the deformation of wood under load. *Austr. J. Appl. Sci.* 13: 242-256.

Coleman B.N., 1964 : Thermodynamics of materials with memory. *Arch. National Mech. Anal.* 17: 146.

Core H.A., Côté V.A., Day A.C., 1979 : Wood structure and identification, 2nd ed., *Syracuse wood science series 6, Syracuse University Press.*

Davidson R.W., 1962: The influence of temperature on creep in wood. *For. Prod. J.* 377-381.

Eriksson L. et Noren B., 1965: Der Einfluss von Feuchtigkeitsänderungen auf die Verformung von Holz bei Zug in Faserrichtung. *Holz Roh. Werk.* 23, 5: 201-209.

Foret G., 1988: Comparaison des modules et résistances d'un bois de printemps et d'un bois d'été à l'échelle microscopique. *Mémoire de DEA. CERAM.*

Génevaux J.M., 1988 : Le fluage à température linéairement croissante : Caractérisation des sources de viscoélasticité anisotrope du bois. *Thèse I.N.P.L.*

Gibson E.J., 1965: Creep of wood: role of water and effect of a changing moisture content. *Nature* 4980: 213-215.

Gril J., 1988: Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure. *Thèse de doctorat, Université de Paris.*

Gril J., 1991: Mechanosorption, microstructure and wood formation. *COST 508.*

Grossman P.U.A., 1976: Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour. *Wood Sci. Technol.* 10: 163-168.

Guerrin G.M., 1990 : Caractérisation en flexion quasi-statique et dynamique d'un matériau thermo-hydro-viscoélastique : Le bois . *Thèse I.N.P.L.*

Guidoum A., 1994: Simulation numérique 3D des comportements des bétons en tant que composites granulaires. *Thèse de doctorat N°1310. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.*

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

Hadj Mohamed B., 1989: Endommagement et raidissement post-endommagement du bois en traction. *Mémoire de DEA, CERAM.*

Hanhijärvi A., 1995: Modelling of creep deformation mechanisms in wood. *VTT Publications 231, Technical Research Centre of Finland, Espoo.*

Hearmon R. et Paton J., 1964: Moisture content changes and creep of wood. *For. Prod. J.* 14: 357-359.

Hoffmeyer P. et Davidson R.W., 1989: Mechano-sorptive creep mechanism of wood in compression and bending. *Wood Sci. Technol.* 23: 215-227.

Hoffmeyer P., 1993: Non-linear creep caused by sleep plane formation. *Wood Sci. Technol.* 27: 321-335.

Huet, 1986. Some basic principles in the thermorheology of heterogeneous materials, Proceedings of the 2nd Conference of European Rheologists, Prague, June 17-20, In H. Giesekus and M.F. Hibberd (Eds.) *Progress and Trends in Rheology, Supplement to Rheologica Acta*, Vol. 26, pp. 1-8, 1988.

Huet C., 1988: Quelques aspects du comportement thermo-hygro-viscoélastique du bois. *COST 508*

Huet, P. Morlier et D. Guitard, 1988. Mechanical Properties of Wood, *Proceedings of the CNRS Scientific Grouping No 81, Rheology of Wood, Bordeaux.*

Huet, 1988. Some aspects of the thermo-hygro-viscoelastic behaviour of wood, In P. Morlier, D. Guitard, C. Huet (Eds.), *Comptes Rendus du Colloque Scientifique Européen sur la Mécanique du Bois (organisé par le Groupement Scientifique CNRS No 81 Rhéologie du Bois)*, p.103-108.

Huet, 1988. Application of the natural variables formalism to classical rheological models, In P.H.T. Uhlherr (Ed.) *Proceedings Xth Int. Congress in Rheology, Sydney, Australie*, Vol. 1, p. 419-421.

Huet, 1988. Modelizing the kinetics of the thermo-hygro-viscoelastic behaviour of wood under constant climatic conditions, In R. Itani(Ed.), *Proceedings of the International Conference on Timber Engineering,Seattle*, p.395-401 .

Huet, P. Navi, B. Hadj Mohamed, 1990. Approche microscopique du comportement rhéologique du bois en traction, *25e Colloque du Groupe Français de Rhéologie, Rhéologie des matériaux du Génie Civil, Grenoble*, p. 331-344.

Huet, B. Hadj Mohamed, S. Hazanov, 1991. Internal variables technique for elasto-visco-plastic mechanical models of heterogeneous materials, 11th Int. *Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Tokyo*, BO1/2- p. 7-12.

Huet, 1991. Contribution to thermohygro-mechanical modelization of creep in wood material. *Final report. CEC contract no MA 1 B - 0049 F*.

Huet, 1992. Cours de matériaux de construction. *EPFL*.

Huet, C. (ed.) 1993. "Micromechanics of Concrete and Cementitious Composites", Proceedings of JMX 13 International Conference, Lausanne. *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne* .

Huet, 1993. "Some basic tools and pending problems in the development of constitutive equations for the delayed behaviour of Concrete", in *Z.P. BAZANT and I. CAROL, Eds. Creep and Shrinkage of concrete*, Invited Lecture to 5th RILEM International Symposium, Barcelone pp. 189-200

Huet, 1995. Hybrid continuum thermodynamics framework and numerical simulations examples for the delayed micromechanical behaviour of heterogeneous materials with chemical, climatic and defects sensitivity, *Engineering Mechanics Today*, Hanoi (in press).

Hunt D.G. et Shelton C.F., 1988: Longitudinal moisture-shrinkage coefficients of softwood at the mechano-sorptive creep limit. *Wood Sci. Technol.* 22: 199-210.

Hunt D.G., 1984; Creep trajectories for beech during moisture changes under load. *Journal of Mat. Sci.* 19: 1456-1467.

Hunt D.G. et Shelton C.F., 1987: Progress in the analysis of creep in wood during concurrent moisture changes. *Journal of Mat. Sci.* 22: 313-320.

Hunt D.G., 1986: The mechano-sorptive creep susceptibility of two softwoods and its relation to some other materials properties. *Journal of Mat. Sci.* 21: 2088-2096.

Hunt D.G., 1990: Longitudinal shrinkage-moisture relations in softwood. *Journal of Mat. Sci.* 25: 3671-3676.

Hunt D.G., 1988: Non-linearity in mechano-sorptive creep of softwood in compression and bending. *COST 508*, Bordeaux.

Hunt D.G., 1989: Two classical theories combined to explain anomalies in wood behaviour. *Journal of Mat. Sci. Letters* 8: 1474-1476.

Hunt D.G., 1989: Linearity and non-linearity in mechano-sorptive creep of softwood and its relation to some other material properties. *Journal of Mat. Sci.* (23) : 323-333.

Joyet P., 1992: Comportement différé du matériau bois dans le plan transverse sous des conditions hydriques évolutives. Thèse N° 812, *Université de Bordeaux I*.

Joyet P., Lagièrre P., 1991: Radial and tangential dimensional changes of softwood under zero-load and tensile load during moisture changes. Séminaires *COST 508 Wood Mechanics : fundamental aspects on creep in wood*, Lund, Sweden.

Kellogg R. et Ifju G., 1962: Influence of specific gravity and certain other factors on the tensile properties of wood. *For. Prod. J.* 12(10): 463-470.

Kaumann W.G., 1966 : On the deformation and setting of wood cell wall. *Holz als Roh-und Werkstoff*. Vol. 24 (11) : 551-557.

Kaumann W.G., 1983 : L'eau dans le bois. *Ecole d'hiver D'ARBOLOR*.

Kollmann F. et Cote W.A., 1968: Principles of wood science and technology. *Springer-Verlag, New York*.

Leicester R.H., 1971: A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams. *Wood Sci. Technol.* 5: 211-220.

Liu T., 1994: Creep of wood under a large span of loads in constant and varying environments. Part 1: Experimental observations and analysis. *Holz als Roh. und Werk.* 51: 400-405.

Liu T., 1994: Creep of wood under a large span of loads in constant and varying environments. Part 2: Theoretical investigations. *Holz als Roh. und Werk.* 52: 63-70.

Mandel J., 1966 : Cours de mécanique des milieux continus, *T.II, Annexe XXI, Viscoélasticité, Gauthier-Villars, Paris, 779-802.*

Martensson A., 1993: Mechano-sorptive effects in wooden material. *Wood Sci. Technol.* 437-449.

Martensson A., 1992 : Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations. Report TVBK-1006. *Lund University, Sweden.*

Martensson A., 1988 : Interaction between moisture and stress in wooden materials. Report TVSM-3011. *Lund Institute of Technology, Sweden.*

Martensson A. et Thelandersson S., 1990: Effect of moisture and mechanical loading on wooden materials. *Wood Sci. Technol.* 24: 247-261.

Morlier P., 1994: Creep in timber structures. *RILEM Report 8.* E & FN SPON, London.

Mohager S. et Toratti T., 1993: Lon term bending creep of wood in cyclic relative humidity. *Wood Sci. Technol.* 27: 49-59.

Mukudai J. et Yata S., 1986: Modeling and simulation of viscoelastic behavior (tensile strain) of wood under moisture change. *Wood Sci. Technol.* 20: 335-348.

Mukudai J. et Yata S., 1988: Verification of Mukudai's mechano-sorptive model. *Wood Sci. Technol.* 22: 43-58.

Mukudai J. et Yata S., 1987: Further modeling and simulation of the viscoelastic behavior of wood under moisture change. *Wood Sci. Technol.* 21: 49-63.

P. Navi, 1988: Three dimensional multilevel technique to study influence of the fiber microstructure on wood macroscopic elastic properties. *The third Joint ASCE/ASME Mechanics conference, University of California, San Diego.*, 61-67

Navi, C. Huet, 1989. A three dimensional multilevel technique to study influence of the fiber microstructure on wood macroscopic elastic properties, 3rd Joint ASCE/ASME Mechanics Conference, University of California, San Diego, In R.W. Perkins (Ed.), *Mechanics of Cellulosic and Polymeric Materials*, Ed. *The American Society of Mechanical Engineers, New York*, (AMD-Vol. 99 / MD-Vol. 13), p. 61-67.

P. Navi, V. Pittet-Gress. 1994. Cyclic tensile loading and creep-recovery test on thin wood specimens, *COST 508 Wood Mechanics. Workshop on: Service life assesement of wooden structures, Espoo, Finland*.

P. Navi, P.K. Rastogi, V. Pittet et A. Tolou, 1995 : Micromechanics of wood subjected to axial Tension. *Wood Science and Technology*.29, 411-429.

P. Navi, V. Pittet, 1995 : Mechanosorptive effect deformation of thin wood specimens in grain direction. *Cost 508 Wood Mechanics Workshop "Mechanical Properties of Panel Products, Watford-Garston, UK (in press)*.

V. Pittet, P. Navi, C. Huet, 1995 : Effet mécanosorptif observé sur le bois de faible épaisseur. 30ème Colloque annuel du GFR *Les développements récents en rhéologie, Bordeaux* : 325-334.

Norimoto M., Gril J., 1989 : Wood bending using microwave heating. *Journal of Mcrowave Power and Elecromagnetic Energy*. Vol.24 (4).

Pérez J. Ph. et Romulus A.M., 1993: Thermodynamique, fondements et applications. Ed. Masson, Paris.

Perkinty T., Kingston R.S.T., 1972 : Review of the sufficiency of research on the swelling pressureof wood. *Wood science and technology* (6) : 215-229.

Ranta-Maunus A., 1975: The viscoelasticity of wood at varying moisture content. *Wood Sci. Technol.* 9: 189-205.

Salmen N.L., 1977 : The influence of water on the glass transition temperature of cellulose . TAPPI. Vol. 60 (12) : 137-140.

Schaffer E. L., 1972: Modeling the creep of wood in a changing moisture environment. *Wood and Fiber*. 3: 232-235.

Schniewind A.P., 1966: Über den Einfluss von feuchtigkeitsänderungen auf das kriechen von buchenholz quer zur faser unter berücksichtigung von temperatur und temperaturänderungen. *Holz Roh. - Werk.*, vol 24(3): 87-98.

Schniewind A.P., 1968: A recent progress in the study of the rheology of wood. *Wood Sci. Technol.* (2): 188-206

Schulz H., 1994: Evolution de l'utilisation du bois aux 19ème, 20ème et 21ème siècles. *Holz Roh. - Werk.*

Schwarzl F. et Staverman A.J., 1952: Time-temperature dependence of linear viscoelastic behaviour. *J. of Applied Physics*. 23 (8): 838-843.

Sell J. et Kropf F., 1990: Propriétés et caractéristiques des essences de bois. *Lignum, Le Mont, Suisse.*

Tong Liu, 1994: Creep of wood under a large span of loads in constant and varying environments. Part 2: Theoretical investigations. *Holz Roh. Werk.* 52: 63-70.

Toratti T., 1991 . Creep of wood in varying environment humidity . Part I simulation of creep. *Julkaisu/Report 19, Helsinki University of technology, L.S.E.B.P.*

Toratti T., 1992 . Creep of timber beams in a variable environment. *Helsinki University of technology, Report 31.*

Ugolev B.N., 1976: General laws of wood deformation and rheological properties of hardwood. *Wood Sci. Technol.* 10: 169-181.

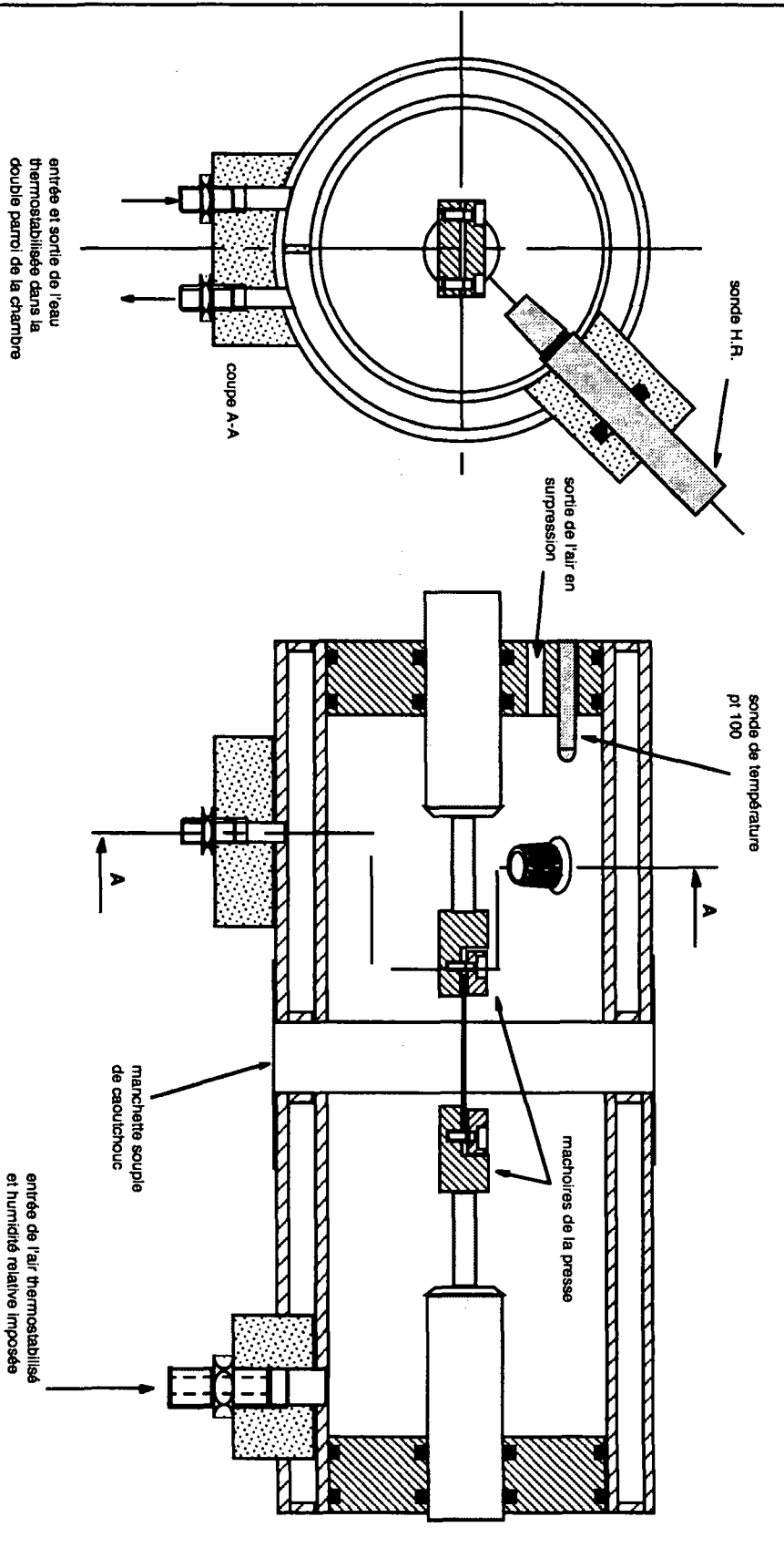
Van Der Put T.A.C.M., 1988: Derivation of the mechano-sorptive effect by the kinetic approach. *COST 508, Bordeaux.*


Van Der Put T.A.C.M., 1989: Deformation and damage processes in wood. *Delft University press.*

Yahiaoui K., 1991 : A rheological model to account for mechano-sorptive behaviour.
Séminaire COST 508-Wood Mechanics : Fundamental aspects on creep in wood, Lund, Sweden.

ANNEXE 1

PLAN DE LA CELLULE HYGROTHERMIQUE

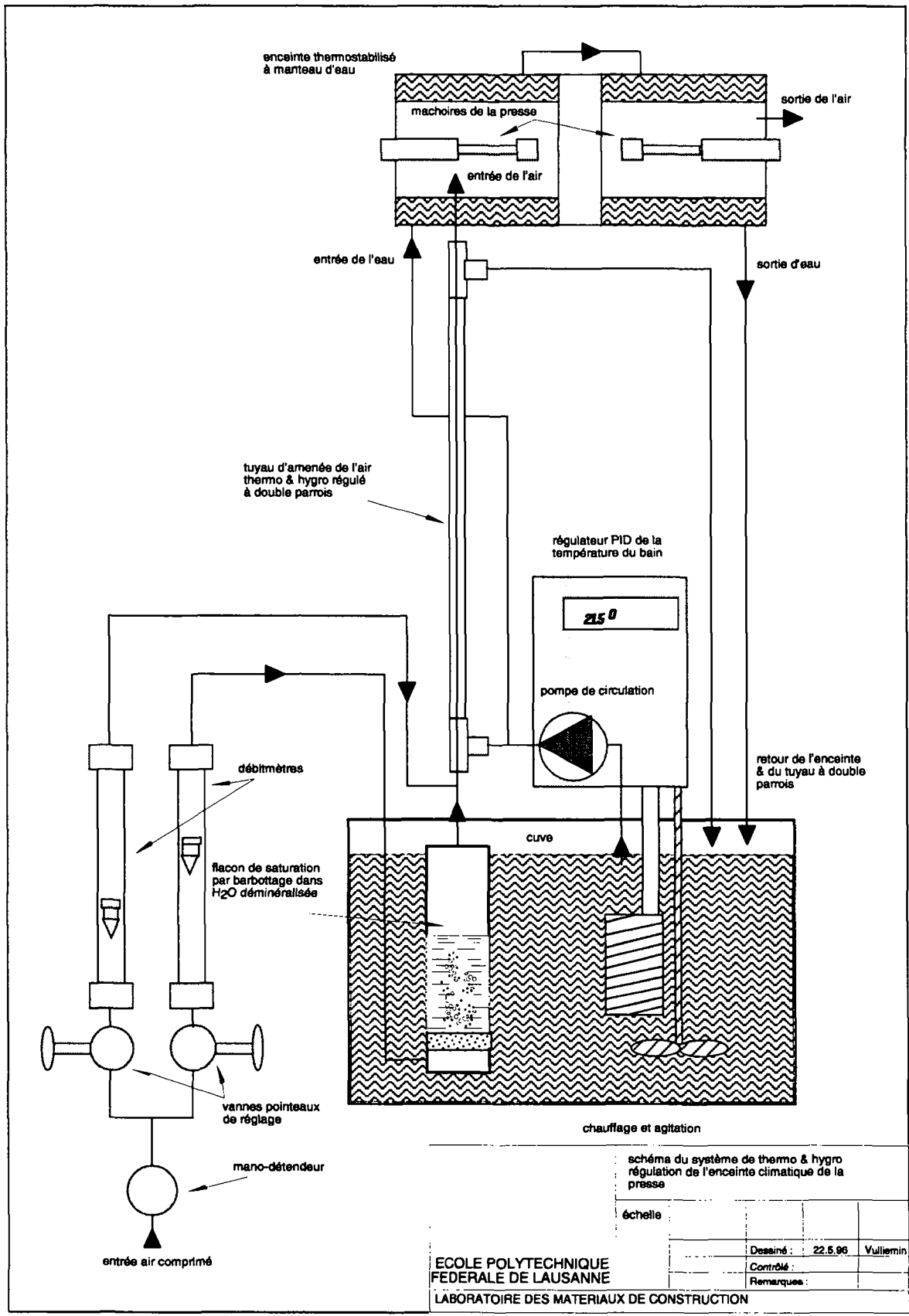


 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE		échelle			
		1/1			
LABORATOIRE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION		dessiné :	CA 4.1888	William	
		contrôle :			
		remarques :			

Petite enceinte climatique avec contrôle de l'humidité relative et de la température

ANNEXE 2

SCHÉMATISATION DE LA RÉGULATION DES CONDITIONS CLIMATIQUES DANS LA CELLULE



ANNEXE 3

BALANCE SETARAM

Montage expérimental

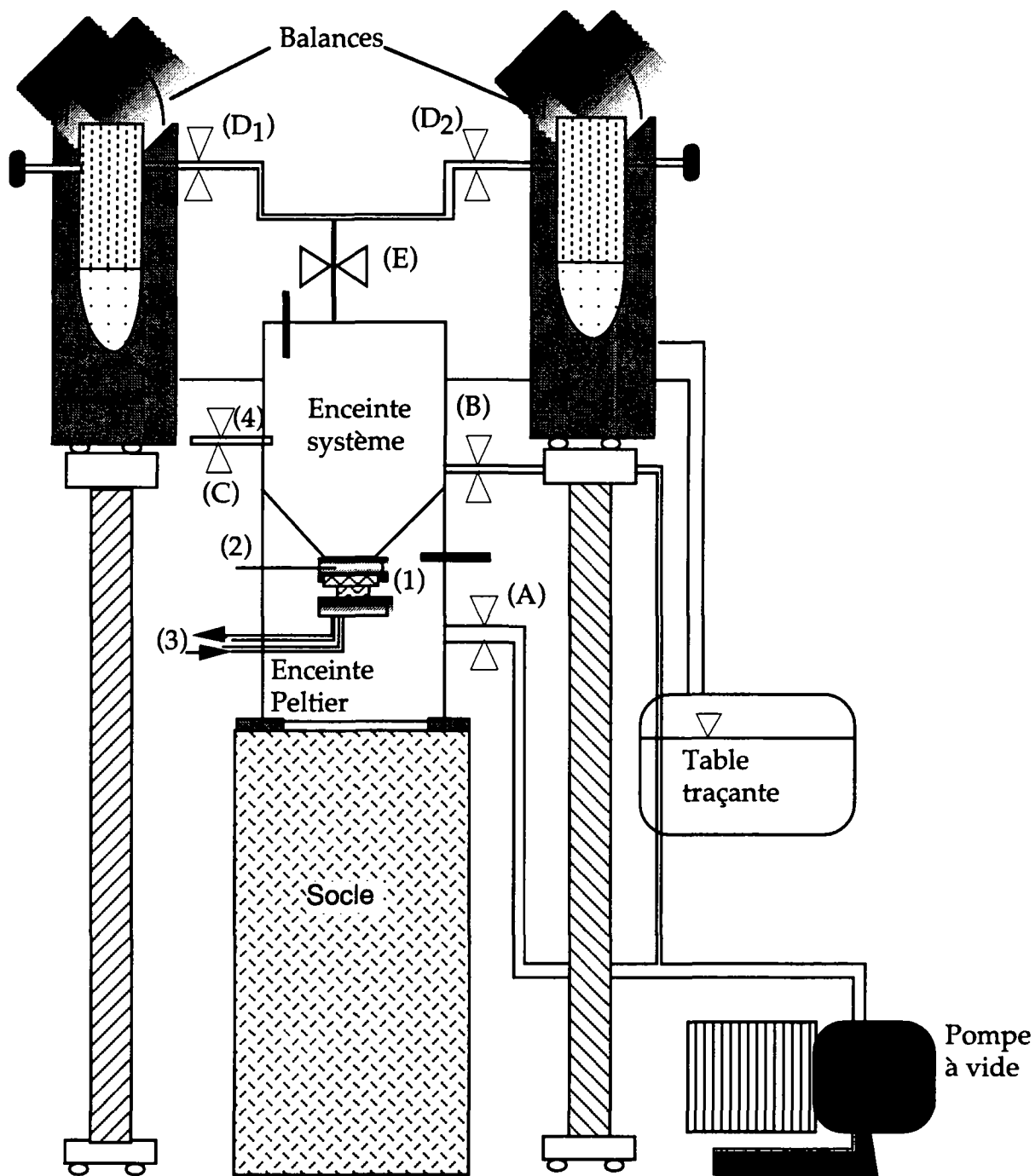
La prise en eau des éprouvettes est déterminée par des balances électroniques "Setaram B70" précises au dixième de milligramme et ce sur une longue durée. Les échantillons sont placés dans une nacelle en verre soutenue par une tige de même matière (masse : ≈ 12 g). Ces balances sont reliées à un élément Peltier qui contrôle l'humidité relative. Le tout est placé et maintenu sous vide grâce à une pompe à palette à deux étages "Alcatel 2012A". Des jauges Pirani "Balzers TPR 010" (domaine de mesure $5.6 \cdot 10^{-4} - 10^3$ mb) servent à mesurer les pressions de travail dans les enceintes et des jauges de pression absolue "Balzers APR 010" permettent de déterminer les pressions de vapeur d'eau. Un système d'introduction d'eau est situé sur la partie supérieure de l'enceinte. Des vannes sont placées le long du circuit de vide pour rendre plus commode les manipulations . Une vue d'ensemble du montage de trouve sur la figure A1.

Dans le dessiccateur déjà les échantillons prennent une certaine quantité d'eau. Néanmoins, comme ils sont placés dans un vide poussé avant d'être soumis aux différentes humidités, ils sont totalement secs lors de l'introduction d'eau dans l'enceinte.

Description de la balance "Setaram B70"

Le principe de fonctionnement des balances "Setaram B70" est le même que celui des balances à plateau, cependant, elle déterminent non pas une masse, mais une variation de masse.

D'un côté du fléau se trouve l'échantillon dont on veut déterminer la prise en eau et son support (presse, nacelle, ...) et de l'autre est placé le système de mesure électronique. Le principe de fonctionnement de ce dernier consiste à transformer le déplacement du fléau en une variation d'intensité lumineuse qui à son tour influence la position du fléau en agissant sur un système électromagnétique rééquilibrant la balance. La variation d'intensité lumineuse se mesure par l'intermédiaire du faisceau d'un filament obstrué partiellement par un volet solidaire du fléau et qui vient éclairer une cellule photosensible.



- (1) Thermoélément Peltier
- (2) Thermocouple Pt 100
- (3) Système de refroidissement
- (4) Sas d'introduction d'eau

- Jauges de pression absolue
- Jauges Pirani
- ⋈ Vannes

Figure A1. Schéma global du montage expérimental.

La balance est équipée d'un potentiomètre de tension de sortie (0 - 10mV) permettant de régler la plage de sensibilité des mesures, d'un système de relevage/abaissement du fléau, ainsi que des masses étalonnées pour le calibrage (10, 20, 40, 80 mg). La précision des mesures est d'un dixième de milligramme. La masse de l'assemblage dont on veut déterminer la variation de poids ne doit pas excéder 100g.

Description de l'élément Peltier

Le système Peltier permet de contrôler la pression de vapeur d'eau, et donc l'humidité relative en se basant sur l'équation de Clausius-Clapeyron qui lie la température à la pression. Le contrôle de la température est effectué en utilisant l'effet Peltier qui est le phénomène d'absorption ou de génération de chaleur à partir du passage de courant à travers deux conducteurs. Cet effet se superpose généralement à l'effet Joules, c'est pourquoi le vide doit être assez poussé pour qu'il soit dominant.

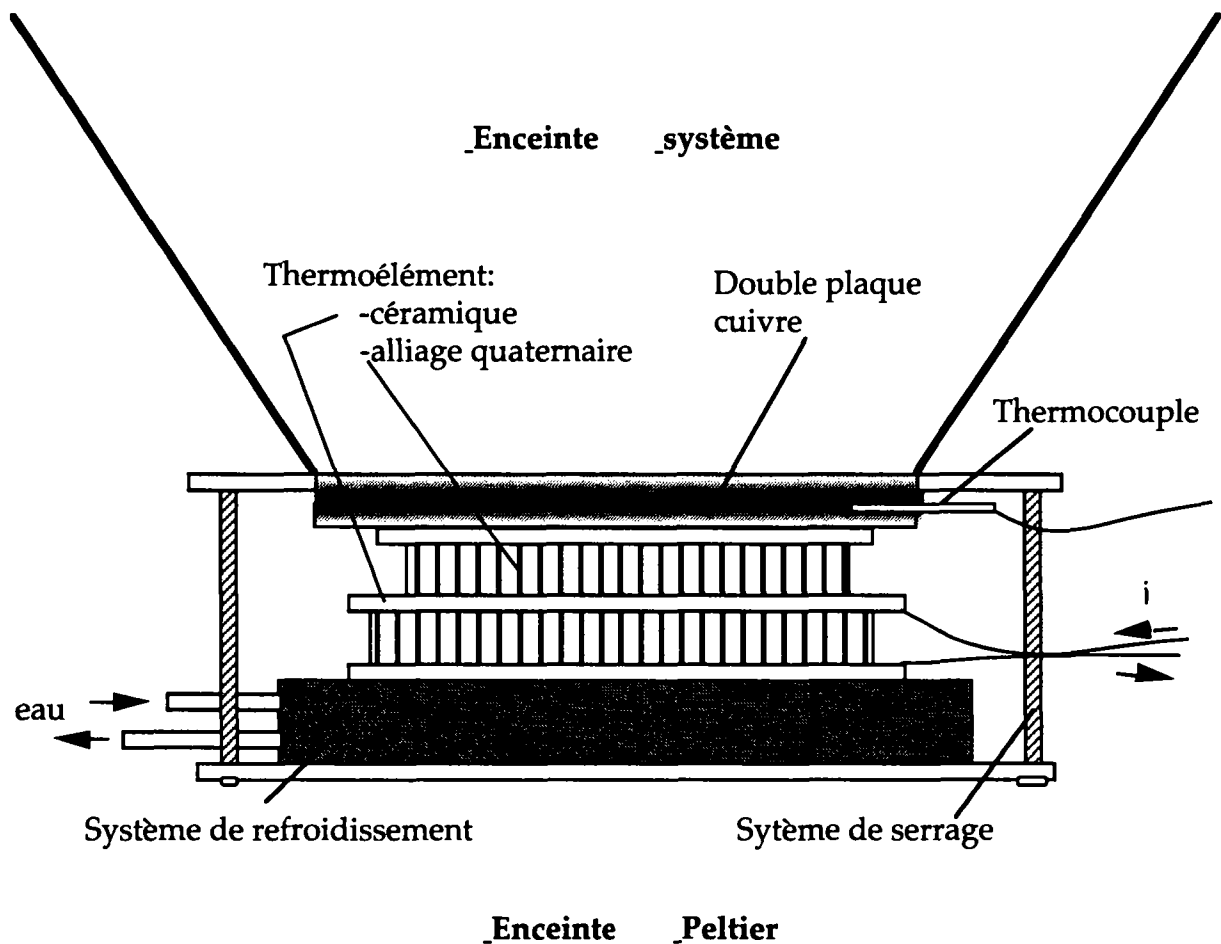


Figure A2. Schéma de l'élément Peltier.

La pièce utilisant l'effet Peltier dans le système est un thermoélément composé de deux pièces d'un alliage quaternaire (Te, Se, Sb et Bi) comme matériau thermoélectrique, isolées par trois plaques céramiques. La pièce la plus grande est en contact avec le système de refroidissement et la plus petite pièce avec une plaque en cuivre liée à un thermocouple Pt 100 dont la précision est d'un dixième de degré (figure A2). Celle-ci est en contact avec l'enceinte supérieure, si bien que sa température peut gérer le taux de condensation de l'eau sur la plaque, et donc l'humidité relative de l'enceinte:

d'après P. Huguenin (Travail de diplôme, 1994)

ANNEXE 4

**ÉTALONNAGE DES CAPTEURS DE LA PRESSE DE TRACTION-
COMPRESSION**

Essai de l'extensomètre de la mini presse				
essai No 1				
régler le -100% du PC à 400 de l'Instron (minimum de l'échelle) et mesurer de -100 à +100				
Tambour INSTRON	lecture sur FC	REFERENCE	écart mesuré absolu où % pleine éch	écart en % de la mesure
400	-100.01	-100	0.01	0.01
410	-89.45	-90	-0.55	-0.61
420	-79.82	-80	-0.18	-0.23
430	-70.48	-70	0.48	0.69
440	-60.91	-60	0.91	1.52
450	-51.15	-50	1.15	2.30
460	-41.35	-40	1.35	3.38
470	-31.64	-30	1.64	5.47
480	-21.84	-20	1.84	9.20
490	-12.08	-10	2.08	20.80
0	-2.17	0	-2.17	
10	7.67	10	-2.33	-23.30
20	17.33	20	-2.67	-13.35
30	27.31	30	-2.69	-8.97
40	37.05	40	-2.95	-7.38
50	47.09	50	-2.91	-5.82
60	56.92	60	-3.08	-5.13
70	66.64	70	-3.36	-4.80
80	76.46	80	-3.54	-4.43
90	86.72	90	-3.28	-3.64
100	96.25	100	-3.75	-3.75

essai No2				
régler le 0% du PC à 0 de l'Instron (milieu d'échelle)				
rattraper les jeux et mesurer de -100 à +100				
Tambour INSTRON	lecture sur FC	REFERENCE	écart mesuré absolu où % pleine éch	écart en % de la mesure
400	-97.81	-100	-2.19	-2.19
410	-88.08	-90	-1.92	-2.13
420	-78.19	-80	-1.81	-2.26
430	-68.49	-70	-1.51	-2.16
440	-58.67	-60	-1.33	-2.22
450	-49.01	-50	-0.99	-1.98
460	-39.18	-40	-0.82	-2.05
470	-29.41	-30	-0.59	-1.97
480	-19.64	-20	-0.36	-1.80
490	-9.81	-10	-0.19	-1.90
0	0.04	0	0.04	
10	9.89	10	-0.11	-1.10
20	19.58	20	-0.42	-2.10
30	29.36	30	-0.64	-2.13
40	39.18	40	-0.82	-2.05
50	48.89	50	-1.11	-2.22
60	58.73	60	-1.27	-2.12
70	68.67	70	-1.33	-1.90
80	78.5	80	-1.5	-1.88
90	88.34	90	-1.66	-1.84
100	98.25	100	-1.75	-1.75

KALIBRIERZEUGNIS

CERTIFICAT DE CALIBRATION

CALIBRATION CERTIFICATE

Client : EPFL-LMC
 CH-1015 Lausanne

Machine : d'essai électromecanique Type : LFEM-HZ-1kN no. 344 / Cde no K 7200

Electronic : CS-6000-PC no. : 336

Capt. de F. : U2A-500 N no. : F61760

Date d'étal. : 25.03.94

Echelle de mesure	Moyenne de 3 lecture	Valeur étalon	Erreur q %
0,5 kN	100,1 N	100,0 N	- 0,1
	199,7 N	200,0 N	+ 0,2
	299,1 N	300,0 N	+ 0,3
	398,7 N	400,0 N	+ 0,3
	498,2 N	500,0 N	+ 0,4

250 kN	50,2 N	50,0 N	- 0,4
	100,2 N	100,0 N	- 0,2
	150,2 N	150,0 N	- 0,1
	200,0 N	200,0 N	—
	250,1 N	250,0 N	—

100 N	20,1 N	20,0 N	- 0,5
	40,2 N	40,0 N	- 0,5
	60,3 N	60,0 N	- 0,5
	80,4 N	80,0 N	- 0,5
	100,5 N	100,0 N	- 0,5

50 N	10,05 N	10,0 N	- 0,5
	20,10 N	20,0 N	- 0,5
	30,15 N	30,0 N	- 0,5
	40,15 N	40,0 N	- 0,4
	50,25 N	50,0 N	- 0,5

CURRICULUM VITAE

PITTET Valérie

Née le: 24 octobre 1968

Nationalité: française

Etat-civil: mariée (conjoint suisse)

Avenue du Rond-Point 1
1006 Lausanne

Tél. privé: (021) 616 41 59

Tél. prof. : (021) 693 28 52

FORMATION:

- Juin 1985:** Baccalauréat série D (mathématiques et biologie), Lycée de Forbach (Moselle)
Juin 1986: Baccalauréat série C (mathématiques et physique), Lycée de Forbach (Moselle)
Juin 1991: Diplôme d'ingénieur de l'École Polytechnique Féminine (E.P.F.), Sceaux (Hauts-de-Seine)
Juillet 1996: Doctorat ès sciences techniques (EPFL, Lausanne).

EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE:

- Juillet 1988:** Entreprise Adidas-France à Dettwiller (Bas-Rhin).
Stage de sensibilisation au monde ouvrier réalisé, dans le cadre de la formation à l'E.P.F., à l'ancien atelier de fabrication de chaussures.
- Juillet 1989:** Service Informatique Général des Houillères du Bassin de Lorraine de Freyming-Merlebach (Moselle).
Visite de l'ensemble des installations et observation des outils utilisés.
- Fév.-avril 1990:** Département Électronique et Télécommunications des Houillères du Bassin de Lorraine de Freyming-Merlebach (Moselle).
Stage réalisé dans le cadre de la formation à l'E.P.F.. Étude de divers modes de transmission d'un signal vidéo et réalisation d'un support devant servir de base à l'installation d'un nouveau système de surveillance.
- Oct. 1990-janv. 1991:** INTERTECHNIQUE à Plaisir (Yvelines).
Projet réalisé, un jour par semaine, dans le cadre de la formation à l'E.P.F.. Recherche d'une modélisation et simulation des fonctions principales d'un régulateur à oxygène, utilisé par les pilotes d'avions civils en cas d'urgence.
- Mars-juin 1991:** École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département des Matériaux.
Projet de fin d'études réalisé au Laboratoire de Matériaux de Construction. Étude du comportement du bois sous climat variable. Caractérisation expérimentale de l'effet "mécano-sorptif", relatif au couplage entre l'application d'une sollicitation mécanique et hygrique sur le matériau bois.

Depuis oct. 1991: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département des Matériaux.
Assistante-doctorante au Laboratoire de Matériaux de Construction.
Poursuite de l'étude sur l'effet mécano-sorptif du bois. Mise en place
d'un dispositif d'essai spécifique à l'étude des échantillons de petites
dimensions. Développement d'un programme de simulation basé sur
l'étude du comportement des matériaux par des formulations
énergétiques. Programmation en Fortran.
Participation aux activités d'enseignement au niveau de travaux pratiques
et de séances d'exercices.

LANGUES:

Anglais: Niveau First Certificate of Cambridge University (1994)

Anglais technique: Bonnes connaissances (bibliographie de thèse exclusivement en anglais)

Allemand: Lu, parlé et écrit

Espagnol: Notions

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES:

P. Navi, V. Pittet-Gress. Cyclic tensile loading and creep-recovery test on thin wood specimens, *COST 508 Wood Mechanics. Workshop on: Service life assesement of wooden structures, Espoo, Finland, 1994.*

P. Navi, P.K. Rastogi, V. Gress et A. Tolou. Micromechanics of wood subjected to axial tension, *Wood Science & Technology, 29: 411-429, 1995.*

P. Navi, V. Pittet. Mechanosorptive effect deformation of thin wood specimens in grain direction, *COST 508 Wood Mechanics. Workshop on: Mechanical properties of panel products, Watford-Garston, UK, 1995.*

V. Pittet, P. Navi, C. Huet. Effet mécanosorptif observé sur le bois de faible épaisseur, *30ème Colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie: Les développements récents en rhéologie, Bordeaux. 325-334, 1995.*

Lausanne, juillet 1996