



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par **L'UNIVERSITE PAUL SABATIER – TOULOUSE III**  
Spécialité : **GENIE CIVIL**

---

Présentée et soutenue par **AMBA JEAN CHILLS**  
Le **21 Novembre 2008**

Caractérisation des gradients de propriétés d'une couche de  
mortier et influence sur la fissuration : Expérimentation et  
Modélisation

---

### JURY

***M. Alain SELLIER***  
***M. Benoît BISSONNETTE***  
***M. Jean-Louis GALLIAS***  
***Mme. Michèle CURT***  
***M. Gilbert PEIFFER***  
***M. Charles-Henri DETRICHE***  
***M. Jean-Paul BALAYSSAC***

***Président du jury***  
***Rapporteur***  
***Rapporteur***  
***Examinatrice***  
***Examineur***  
***Examineur***  
***Examineur***

---

Ecole doctorale : **Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés**  
Unité de recherche : **Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions**  
Directeurs de Thèse : **Charles-Henri DETRICHE, Jean-Paul BALAYSSAC**

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse, Charles-Henri Détriché et Jean-Paul Balayssac pour m'avoir prodigué des orientations, des conseils et des encouragements tout au long de la réalisation de ce travail sans jamais ménager leurs efforts. Qu'ils trouvent ici mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance.

Je souhaite également faire part de ma reconnaissance à la Société Weber et Broutin qui a financé cette étude et plus particulièrement l'ensemble du personnel du laboratoire recherche et développement de SERVAS qui m'ont chaleureusement reçu pour me fournir des renseignements précieux pour la préparation de ma campagne expérimentale. Je pense notamment à Michèle Curt, Fabrice Grandhaie, Serge Rimlinger, sans oublier Antoine, Marie Thérèse, Nadine, Cedric, Lydie, Annabella, Alexis, José, Momo ainsi qu'à l'ensemble des membres du laboratoire qui ont contribué à l'existence de conditions de travail exemplaires.

Je remercie également Ginette Arliguie et Bernard Husson pour m'avoir accueilli au sein du LMDC au moment où je débarquais nouvellement à Toulouse.

Je remercie vivement Benoît Bissonnette et Jean-Louis Gallias pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse, pour leurs remarques pertinentes, enrichissantes et constructives vis-à-vis des travaux effectués.

Un grand merci également à Alain Sellier d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse ainsi que pour ses remarques enrichissantes et avisées.

J'adresse mes sincères remerciements à Gilbert Peiffer, du groupe Saint Gobain qui m'a fait l'honneur de faire partie du jury et enrichir ce travail avec sa grande expérience.

Je tiens à remercier aussi l'ensemble des membres du LMDC pour ces années passées ensemble, plus particulièrement René Boujou, Bernard Attard, Marc Begué, Guillaume Lambaré et Richard pour leur aide, leur disponibilité et leur bonne humeur.

Je n'oublierais pas l'ensemble des doctorants du LMDC, plus particulièrement les collègues du bureau 316 : Guillaume, Nordine, Youcef, Jérôme, Rachida ainsi que Pierre-Yves, Fabrice,

Rackel, Beihn, Son, Tran et Kriengkai avec qui j'ai passé trois années merveilleuses. Enfin, mes remerciements sont à adresser à toute personne qui a contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail, qu'elle trouve ici ma profonde gratitude.

Je pense également à ma famille toute entière pour leur soutien, leur compréhension et leur patience et leur aide durant ces moments.

**AUTEUR :** AMBA Jean Chills

**TITRE :** Caractérisation des gradients de propriétés d'une couche de mortier et influence sur la fissuration : Expérimentation et Modélisation

**DIRECTEURS DE THESE :** Charles-Henri DETRICHE et Jean-Paul BALAYSSAC

**LIEU ET DATE DE SOUTENANCE :** Toulouse le 21 Novembre 2008

---

**RESUME :** Ce travail décrit l'ensemble des phénomènes qui gouvernent le comportement sur site des couches d'enduit au regard de la fissuration. On s'intéresse plus particulièrement aux mortiers industriels formulés à base de liants hydrauliques et aux gradients de propriétés qui sont induits par le séchage (gradients hydriques, gradients d'hydratation, gradients de porosité, gradients de déformations). On se focalise notamment sur l'analyse de l'impact de ces gradients de propriétés sur la susceptibilité à la fissuration de la couche de mortier.

Dans ce contexte, les différents tests expérimentaux développés pour la caractérisation des gradients de propriétés sont décrits et présentés. Les résultats obtenus montrent globalement que les gradients de propriétés sont très significatifs au voisinage de la surface de séchage.

Pour l'évaluation de la susceptibilité à la fissuration, des tests sont développés puis validés par une étude sur maquettes et sur plaques avec notamment le suivi des déformations dans la couche de mortier en présence d'un support adhérent. L'étude permet de mettre en évidence l'influence de facteurs tels que la formulation du mortier, l'épaisseur d'application de la couche de mortier ainsi que les conditions de conservation sur la susceptibilité à la fissuration du matériau.

Une approche numérique pour l'évaluation du comportement des couches de mortiers sur site au regard de la fissuration est aussi présentée. Une modélisation numérique par éléments finis est abordée par le biais d'un modèle multi-physique permettant de traiter les couplages Thermo Hydro Mécanique dans un contexte de mécanique non linéaire (théorie de l'endommagement). A partir de ce modèle une étude paramétrique est réalisée pour analyser l'effet des conditions de conservation ou de l'épaisseur de la couche de mortier sur l'échéance de fissuration.

Enfin, un outil d'aide pour l'évaluation du risque de fissuration des matériaux formulés est proposé en vue d'une exploitation industrielle.

---

**MOTS CLES :** Mortier ; séchage ; comportement mécanique ; gradients de propriétés ; contraintes ; retrait empêché ; fissuration ; modélisation ; transferts hydriques ; endommagement.

---

**DISCIPLINE ADMINISTRATIVE :** Génie civil

---

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions LMDC

135 avenue de Rangueil, 31077 TOULOUSE CEDEX 4

---

**ABSTRACT:** This work describes the phenomena that govern the behaviour of cement-based materials used as a thin bonded overlay. The work is mainly focused on cement-based industrial mortars, and on the property gradients linked to drying phenomenon (hydraulic, hydration, porosity and strain gradients). This work presents some experimental techniques developed to assess the sensitivity of cracking induced by these property gradients. In this context, several tests are used for the purpose of predicting the differential behaviour of material subjected to drying. For all the properties, the behaviour of the material differs significantly according to depth, particularly close to the drying face for both laboratory samples and large plates of mortar. The study shows the influence of parameters such as the mortar composition, the mortar thickness and the environmental factors on the cracking sensitivity of the material.

In the numerical investigation, a finite element method is used to simulate the overlay behavior in drying conditions. This simulation allows taking into account the coupling between thermal, hydrous and mechanical effects in a context of non linear mechanics. By this model, a parametric study allows analysing the effect of both environmental conditions and thickness of the mortar layer upon the cracking time.

Finally, an experimental device is proposed to assess the sensitivity of cracking of mortars layer applied on a substrate. This device was developed for industrial applications.

---

**KEY WORDS :** Mortar; drying; mechanical behavior; property gradients; stresses; restrained shrinkage; cracking; modeling; hydraulic transfers; damage.

---

# **TABLE DES MATIERES**

---

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>1</b>
<b>DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE ET INTRODUCTION.....</b>	<b>10</b>
<b>CONTEXTE DE L'ETUDE.....</b>	<b>10</b>
<b>OBJECTIFS DE LA THESE.....</b>	<b>13</b>
<b>PARTIE I : ASPECTS THEORIQUES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>15</b>
<b>I.1 LE CIMENT PORTLAND.....</b>	<b>15</b>
I.1.1 LES CONSTITUANTS DU CLINKER.....	15
I.1.2 REACTIONS D'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND.....	16
I.1.2.1 Hydratation du $C_3S$ .....	16
I.1.2.2 Hydratation du $C_2S$ .....	16
I.1.2.3 Hydratation du $C_3A$ .....	16
I.1.2.4 Hydratation du $C_4AF$ .....	17
I.1.3 CINETIQUE DU PROCESSUS DE L'HYDRATATION.....	17
I.1.4 DEGRE D'HYDRATATION.....	19
I.1.5 STRUCTURATION DE LA PATE DE CIMENT HYDRATEE.....	21
I.1.5.1 La phase solide.....	21
I.1.5.2 La structure poreuse.....	22
<b>I.2 LE CIMENT ALUMINEUX .....</b>	<b>23</b>
<b>I.3 LES SYSTEMES A BASE DE LIANTS BINAIRE ET TERNAIRE.....</b>	<b>26</b>
<b>I.4 LES AJOUTS POUR LA MODIFICATION DES PROPRIETES DES MATERIAUX CIMENTAIRES</b> <b>.....</b>	<b>29</b>
I.4.1 LES ADDITIONS MINERALES .....	29
I.4.2 LES ADJUVANTS ORGANIQUES.....	29
I.4.2.1 Les éthers de cellulose.....	31
I.4.2.2 Les latex .....	36
<b>I.5 LA DESSICCATION DES COUCHES MINCES DE MORTIER.....</b>	<b>42</b>
I.5.1 INFLUENCE DU SECHAGE.....	43
I.5.1.1 Mécanismes du séchage .....	43
I.5.1.2 Effet temporel et effet d'échelle.....	44
I.5.1.3 Conséquence sur la fissuration .....	45
I.5.1.4 Conséquence sur les propriétés mécaniques.....	46
I.5.2 INFLUENCE DU SUPPORT SUR LA DESSICCATION.....	47
<b>I.6 LES VARIATIONS DIMENSIONNELLES ET LES TECHNIQUES DE MESURE .....</b>	<b>49</b>
I.6.1 LES VARIATIONS DIMENSIONNELLES ENDOGENES .....	50
I.6.1.1 La contraction "Le Chatelier ".....	50

---

1.6.1.2 <i>Le retrait endogène</i> .....	50
1.6.1.3 <i>Le retrait thermique endogène</i> .....	51
I.6.2 LES VARIATIONS DIMENSIONNELLES EN CONDITION DE SECHAGE .....	51
1.6.2.1 <i>Le retrait plastique</i> .....	51
1.6.2.2 <i>Le retrait de carbonatation</i> .....	52
1.6.2.3 <i>Le retrait thermique exogène</i> .....	53
1.6.2.4 <i>Le retrait de séchage et les mécanismes physiques associés</i> .....	53
I.6.3 LE FLUAGE ET LA RELAXATION DES CONTRAINTES DANS LA COUCHE D'ENDUIT .....	55
I.6.4 LES TECHNIQUES DE MESURE DES VARIATIONS DIMENSIONNELLES .....	57
1.6.4.1 <i>Les mesures volumiques</i> .....	57
1.6.4.2 <i>Les mesures linéiques</i> .....	59
I.6.5 LES VARIATIONS DIMENSIONNELLES EN CONDITIONS EMPECHEES .....	61
1.6.5.1 <i>Essais surfaciques</i> .....	61
1.6.5.2 <i>Essais linéiques</i> .....	63
1.6.5.3 <i>Essais à l'anneau</i> .....	65
<b>I.7 CONCLUSION SUR LA SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>66</b>
<b>PARTIE II: CAMPAGNE EXPERIMENTALE ET ANALYSE DES RESULTATS .....</b>	<b>68</b>
<b>II.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>68</b>
<b>II.2 MATERIAUX ETUDIES : PRESENTATION ET CARACTERISATION.....</b>	<b>68</b>
II.2.1 FORMULATIONS UTILISEES .....	68
II.2.1.1 <i>Les mortiers à base de ciment Portland</i> .....	68
II.2.1.2 <i>Les mortiers industriels</i> .....	69
II.2.2 CARACTERISATION MECANIQUE ET PHYSIQUE DES MORTIERS .....	70
II.2.2.1 <i>Propriétés physiques des mortiers</i> .....	70
II.2.2.2 <i>Caractérisation mécanique des mortiers</i> .....	71
II.2.3 VARIATIONS DIMENSIONNELLES (NF P 15-433) .....	78
II.2.3.1 <i>Le retrait endogène sur matériau à l'état durci</i> .....	78
II.2.3.2 <i>Le retrait avec séchage et perte de masse due au séchage sur matériau à l'état durci</i> .....	79
II.2.3.3 <i>Le retrait de séchage sur matériau à l'état durci</i> .....	81
II.2.4 VARIATIONS DIMENSIONNELLES MESUREES A PARTIR DU JEUNE AGE .....	82
II.2.4.1 <i>Détermination des pertes en eau des mortiers</i> .....	83
II.2.4.2 <i>Les variations dimensionnelles en condition endogène</i> .....	84
II.2.4.3 <i>Les variations dimensionnelles en condition de séchage</i> .....	84
II.2.5 AVANCEMENT DE L'HYDRATATION .....	86
II.2.5.1 <i>Conductivité électrique en solution de la phase liante</i> .....	86
II.2.5.2 <i>Mesure de l'échauffement sur mortiers au moyen de la calorimétrie semi - adiabatique</i> .....	87
<b>II.3 CARACTERISATION DES GRADIENTS DE PROPRIETES DANS LA COUCHE DE MORTIER</b> .....	<b>88</b>

II.3.1 LES TECHNIQUES UTILISEES POUR LA CARACTERISATION DES GRADIENTS DE PROPRIETES .....	89
<i>II.3.1.1 La méthode des tranches</i> .....	89
<i>II.3.1.2 La technique des jauges noyées</i> .....	92
II.3.2 RESULTATS .....	92
<i>II.3.2.1 Les teneurs en eau mesurées sur tranches de mortiers</i> .....	92
<i>II.3.2.2 Distribution poreuse des mortiers</i> .....	95
<i>II.3.2.3 Evolution des variations dimensionnelles dans la couche de mortier</i> .....	97
II.3.3 LES PROFILS DE TENEUR EN EAU EVAPORABLE DANS LA COUCHE DE MORTIER.....	100
II.3.4 LES PROFILS D'HYDRATATION EN EAU LIEE DANS LA COUCHE DE MORTIER.....	101
II.3.5 LES PROFILS DE POROSITE DANS LA COUCHE DE MORTIER .....	101
II.3.6 LES PROFILS DE VARIATIONS DIMENSIONNELLES DANS LA COUCHE DE MORTIER.....	102
II.3.7 CONCLUSION .....	103
<b>II.4 SUSCEPTIBILITE A LA FISSURATION D'UNE COUCHE DE MORTIER APPLIQUEE SUR UN SUPPORT .....</b>	<b>103</b>
II.4.1 CONCEPTION DE LA MAQUETTE .....	103
<i>II.4.1.1 Caractéristiques du système support - grille utilisé</i> .....	104
<i>II.4.1.2 Caractérisation de l'interface</i> .....	104
<i>II.4.1.3 Instrumentation et protocole expérimental</i> .....	106
II.4.2 PRESENTATION DES RESULTATS.....	108
<i>II.4.2.1 Cas du mortier MA</i> .....	108
<i>II.4.2.2 Cas du mortier MB</i> .....	110
<i>II.4.2.3 Cas des mortiers WA et WB</i> .....	112
<i>II.4.2.4 Profils des déformations dans la couche de mortier en présence d'un support adhérent</i> .....	113
<i>II.4.2.5 Quantification des gradients de déformations dans la couche de mortier</i> .....	114
<i>II.4.2.6 Conclusion</i> .....	116
II.4.3 EXTENSION SUR DES PLAQUES .....	116
<i>II.4.3.1 Conditions d'essais</i> .....	117
<i>II.4.3.2 Conception et instrumentation de la plaque (maquette 2D)</i> .....	118
<i>II.4.3.3 Résultats obtenus</i> .....	120
<i>II.4.3.4 Influence des conditions de conservation : étude sur maquette (1D)</i> .....	127
<i>II.4.3.5 Influence des variations d'hygrométrie sur la fissuration</i> .....	130
<b>II.5 CONCLUSION SUR L'ETUDE EXPERIMENTALE.....</b>	<b>135</b>
<b>PARTIE III : APPROCHE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT DES COUCHES MINCES DE MORTIER.....</b>	<b>137</b>
<b>III.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>137</b>
<b>III.2 MODELISATION DU COMPORTEMENT HYDRIQUE DES MORTIERS.....</b>	<b>137</b>
III.2.1 LES TRANSFERTS HYDRIQUES DANS UN MATERIAU CIMENTAIRE .....	138
<i>III.2.1.1 Les transferts d'eau sous forme liquide</i> .....	138

III.2.1.2 <i>Les transferts d'eau sous forme de vapeur</i> .....	139
III.2.2 DESCRIPTION DU MODELE DE DIFFUSION D'EAU .....	139
III.2.3 PARAMETRES DE LA LOI DE SECHAGE .....	140
III.2.3.1 <i>Identification et validation des paramètres de séchage</i> .....	142
III.2.3.2 <i>Etude d'influence du paramètre A sur la cinétique de séchage</i> .....	145
III.2.4 MODELISATION DES PROFILS HYDRIQUES SUR L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE MORTIER.....	145
<b>III.3 MODELISATION DES VARIATIONS DIMENSIONNELLES EN PRESENCE D'UN SUPPORT NON ADHERENT .....</b>	<b>148</b>
III.3.1 MODELISATION DU RETRAIT DE SECHAGE .....	148
III.3.1.1 <i>Détermination du coefficient de contraction hydrique</i> .....	149
III.3.1.2 <i>Validation sur éprouvette 40×40×160 mm</i> .....	151
III.3.2 MODELISATION DU RETRAIT TOTAL AVEC PRISE EN COMPTE DU RETRAIT ENDOGENE .....	153
III.3.2.1 <i>Cas des mortiers MA et MB</i> .....	153
III.3.2.2 <i>Cas des mortiers WA et WB</i> .....	156
III.3.3 MODELISATION DES PROFILS DE DEFORMATIONS SUR L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE MORTIER .....	157
<b>III.4 MODELISATION DES VARIATIONS DIMENSIONNELLES EN PRESENCE D'UN SUPPORT ADHERENT .....</b>	<b>161</b>
III.4.1 PRISE EN COMPTE DU COMPORTEMENT DIFFERE DU MATERIAU .....	161
III.4.2 PRISE EN COMPTE DE L'ENDOMMAGEMENT SUR LE COMPORTEMENT DES COUCHES MINCES DE MORTIER .....	163
III.4.2.1 <i>Formulation générale du modèle d'endommagement</i> .....	164
III.4.2.2 <i>Evolution de l'endommagement</i> .....	165
III.4.2.3 <i>Identification des paramètres d'endommagement pour le mortier</i> .....	166
III.4.2.4 <i>Influence de la prise en compte de la grille dans la modélisation du support</i> .....	168
III.4.2.5 <i>Modélisation des variations dimensionnelles en présence d'un support adhérent : cas de la maquette (mortier- support)</i> .....	169
<b>III.5 ETUDE PARAMETRIQUE .....</b>	<b>183</b>
III.5.1 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE MORTIER .....	183
III.5.2 INFLUENCE DE LA VITESSE DE SECHAGE SUR LA FISSURATION.....	184
III.5.3 INFLUENCE DE LA VARIATION D'HYGROMETRIE SUR LA FISSURATION.....	185
<b>III.6 CONCLUSION.....</b>	<b>186</b>
<b>PARTIE IV: PROPOSITION D'UN OUTIL D'AIDE POUR L'EVALUATION DU RISQUE DE FISSURATION .....</b>	<b>188</b>
<b>IV.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>188</b>
<b>IV.2 PREPARATION DES EPROUVETTES COMPOSITES .....</b>	<b>188</b>
<b>IV.3 LE TEST DE FISSURABILITE SUR EPROUVETTES COMPOSITES .....</b>	<b>188</b>

---

<b>IV.4 RESULTATS .....</b>	<b>189</b>
<b>IV.5 MODELISATION DU TEST DE FISSURABILITE ET VALIDATION .....</b>	<b>190</b>
IV.5.1 MODELE ANALYTIQUE.....	190
IV.5.2 CALCUL PAR ELEMENTS FINIS.....	193
<b>IV.6 EXPLOITATION DU TEST .....</b>	<b>194</b>
<b>IV.7 CONCLUSION .....</b>	<b>196</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>197</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>201</b>
<b>ANNEXE- A : DESCRIPTION DES JAUGES UTILISEES .....</b>	<b>210</b>
<b>ANNEXE- B : CARACTERISTIQUES DU SUPPORT IPN ET DE LA GRILLE .....</b>	<b>214</b>
<b>ANNEXE- C : ANALYSE ATG SUR L'EPaisseur DE LA COUCHE DE MORTIER .....</b>	<b>215</b>
<b>ANNEXE- D : VARIATIONS DIMENSIONNELLES SUR MORTIER WEBER.....</b>	<b>216</b>
<b>ANNEXE- E : EVOLUTION DES GRADIENTS DE TEMPERATURE .....</b>	<b>217</b>
<b>ANNEXE- F : COURBES D'ISOTHERMES DE DESORPTION.....</b>	<b>218</b>
<b>ANNEXE- G : INSTRUMENTATION DE LA PLAQUE .....</b>	<b>219</b>

**DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE ET  
INTRODUCTION**



## DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE ET INTRODUCTION

### Contexte de l'étude

Les applications de mortiers industriels sont aujourd'hui très répandues dans le domaine de la construction. Pour répondre à la demande sans cesse croissante, les industriels proposent de plus en plus sur le marché une gamme de produits variés prêts à l'emploi, utilisables tant dans le secteur de la construction neuve que dans ceux de la réparation et de la réhabilitation. Ces produits couvrent de multiples applications telles que la préparation des chapes, les ragréages et rechargements, les jointoiements, les enduisages et lissages de parois, les renforcements ou les réparations d'éléments localement dégradés. Dans cette étude, on s'intéresse plus particulièrement aux structures de couches minces de mortier que nous allons désigner par le terme « enduit ». La figure 1 donne des exemples d'applications généralement rencontrés.



**Figure 1** – Structures de couches minces de mortier généralement rencontrées

La durabilité d'un enduit se traduit essentiellement par une fissuration minimisée ou évitée, et également par l'obtention d'une adhérence au support qui soit suffisante et qui ne se détériore pas dans le temps [Laurence 2001]. Mais concevoir et réaliser un enduit sur une structure ne relève pas seulement d'un savoir faire technique [Bernard 2002]. Il s'agit d'un problème complexe, qui fait intervenir des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux dont certaines sont encore mal connues [Martinola 2001]. Il s'agit donc d'un marché important qui justifie de la part des industriels des efforts et des investissements considérables pour améliorer et diversifier leur production.

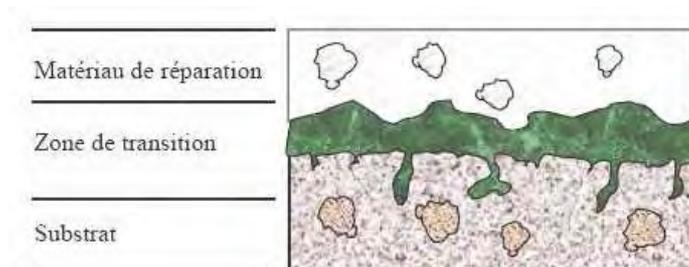
Cependant, l'évaluation du comportement de la couche de mortier se fait en général de façon presque exclusivement empirique à partir d'observations in situ de pathologies telles que l'apparition de fissuration plus ou moins importante ou le décollement. Toutefois l'impact de sollicitations extérieures telles que la dessiccation ou les effets thermiques sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques est encore très mal pris en compte. C'est pourtant l'ensemble de ces sollicitations qui constitue l'élément majeur dans le comportement des couches de mortier. En particulier les conditions thermiques et hygrométriques du milieu environnemental vont générer des variations dimensionnelles qui sont susceptibles d'induire un état de contraintes différentiel sur l'épaisseur de la couche de mortier [Laurence 2001]. Les interactions entre la couche de mortier et le support d'application sont d'autres éléments régulateurs [Nicot 2008]. En effet on lie deux matériaux qui ont des propriétés différentes, en particulier le support de pose présente généralement une rigidité plus importante que celle de la couche de mortier. Les variations dimensionnelles induites par les sollicitations environnementales vont être en partie ou totalement empêchées [Laurence 2001] [Bissonnette 1996]. Cette déformation gênée est à l'origine de contraintes de traction localisées dans la couche de mortier et de contraintes de traction et de cisaillement à l'interface qui peuvent entraîner des pathologies irréversibles [Beushausen 2007] [Granju 2004] [Martinola 2001] [Tran 2006].

Des exemples de fissurations observées sur des structures d'enduits sont représentées sur la figure 2. Ces pathologies ont un impact sur l'esthétique de l'ouvrage, mais également dans bien des cas sur son intégrité. Ainsi donc, la maîtrise de la fissuration constitue une problématique majeure pour assurer la durabilité des structures d'enduits puisque que celles-ci ont une influence directe sur l'étanchéité du support.



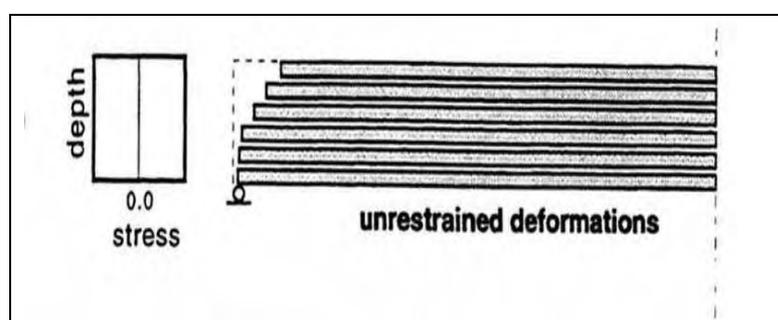
**Figure 2** – Fissuration observée sur des structures d'enduits

La performance de la couche d'enduit dépend donc non seulement de ses caractéristiques intrinsèques mais aussi de celle de l'interface support – enduit [Grasley 2002] [Tran 2006] [Nicot 2008]. Certains auteurs comme Emmons [Emmo 1994] cité par Molez [Molez 2003] ou Tony [Tony 2006] donnent une représentation schématique du modèle d'interface support - matériau de réparation en béton (voir figure 3). Pour ces auteurs, cette zone de transition peut être comparée à l'auréole de transition observée au niveau de l'interface pâte – granulat [Ollivier 2003].



**Figure 3** - Modèle d'interface dans un système substrat-matériau de réparation [Emmons 1994] cité par Molez [Molez 2003]

Détriché [Détriché 1983a] ou Kim [Kim 2004] évoquent également le fait que l'enduit n'est en général pas homogène, mais qu'il est constitué de couches de compositions différentes. Dans le même sens, Martinola [Martinola 2001] modélise la couche d'enduit comme un matériau stratifié composé de plusieurs sous-couches, chacune d'elles étant susceptible de subir des variations dimensionnelles d'une certaine amplitude, sous l'influence des sous-couches voisines (voir figure 4). Ceci met en évidence le phénomène de retrait différentiel sur l'épaisseur de la couche de mortier, résultant des gradients de propriétés qui se développent entre la surface de séchage et le cœur du matériau.



**Figure 4** - Modélisation des variations dimensionnelles libres [Martinola 2001]

Une étude antérieure menée au LMDC dans le cadre d'un projet de recherche financé par la société Weber et Broutin France a également permis de mettre en évidence l'existence de

gradients de propriétés physiques et mécaniques conséquents dans l'épaisseur de la couche de mortier. On a en particulier démontré que ces gradients étaient particulièrement importants dans la partie supérieure de la couche, c'est-à-dire près de la surface de séchage. Pour certains des mortiers, des différences dans la texture du matériau ont même été décelées.

Ceci signifie que les conditions de mise en place et de conservation, en relation avec les formulations, peuvent induire de forts gradients de propriétés dans le volume du matériau pouvant conditionner sa susceptibilité à la fissuration et le décollement. Ces gradients sont principalement dus:

- à la distribution non uniforme des teneurs en eau dans le volume du matériau,
- au développement différentiel de l'hydratation de la phase liante sur l'épaisseur de la couche,
- au développement des variations dimensionnelles (essentiellement le retrait différentiel) et à leurs conséquences sur la distribution des contraintes génératrices de fissuration.

## **Objectifs de la thèse**

L'objectif de ce travail est de mieux comprendre les phénomènes qui gouvernent le comportement sur site des couches d'enduit au regard du risque de fissuration. On s'appliquera en particulier à analyser l'impact des gradients de propriétés dans l'épaisseur de la couche de mortier sur cette susceptibilité à la fissuration. En effet à l'heure actuelle, la prise en compte de ces gradients de propriétés et de leurs conséquences est faite de façon empirique par les formulateurs. Ce travail se propose donc d'identifier et de quantifier ces gradients ainsi que leur relation avec la fissuration.

Les mortiers utilisés sont :

- des mortiers à base cimentaire Portland avec ou sans ajout de polymère,
- des mortiers industriels à base ternaire avec ou sans ajout de polymère.

Cet éventail de mortiers a été choisi pour garantir une variation importante des résistances mécaniques et de la déformabilité.

Le mémoire s'articule autour de quatre parties:

Une première partie est consacrée à la synthèse bibliographique. Nous présentons l'état de l'art ainsi que les différents phénomènes qui gouvernent le comportement des couches minces de mortier. Une attention particulière est portée sur les conséquences que génère le séchage non uniforme de la couche de mortier sur la structuration du matériau, plus précisément l'évolution des gradients de propriétés hydriques, mécaniques et d'hydratation.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale dans laquelle on se propose dans un premier temps d'identifier les propriétés physiques et mécaniques des matériaux. Par la suite, sont identifiées les propriétés du matériau en terme de variations dimensionnelles depuis la mise en œuvre jusqu'à la fissuration à travers un dispositif expérimental original développé spécialement pour ce travail. Un accent particulier est porté sur les moyens développés au cours de ce travail pour la quantification des gradients de déformations qui se développent dans la couche de mortier au cours de sa maturation.

Dans la troisième partie, une étude numérique destinée à mieux comprendre les différences de comportement dues aux conditions limites hydriques et mécaniques auxquelles sont soumises les couches minces de mortier est abordée. Ici on se focalise sur l'influence des variations d'hygrométrie, l'épaisseur de la couche de mortier et la nature du support sur lequel est appliqué le matériau. Le but recherché est le développement d'un outil d'aide à la prédiction de l'échéance de la fissuration du matériau.

Dans la quatrième partie de l'étude, nous proposons une méthodologie d'aide pour la formulation des produits. Celle-ci permet de classer les produits en fonction de leur susceptibilité à la fissuration. Cette partie détaille le dispositif expérimental utilisé, l'instrumentation et le protocole suivi pour cette analyse.

Enfin une dernière partie est consacrée à une conclusion générale et permet de dégager des perspectives pour une utilisation scientifique et industrielle des résultats de ce travail.

**Partie I : ASPECTS THEORIQUES ET  
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**



## Partie I : ASPECTS THEORIQUES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1 Le ciment portland

Les ciments utilisés dans le domaine de la construction sont constitués en majorité de clinker Portland auquel on ajoute généralement des composés mineurs (représentant moins de 5% de la masse de ciment) comme des sulfates alcalins, de la chaux libre et des sulfates de calcium pour contrôler la réaction d'hydratation du  $C_3A$ . Le gypse joue un rôle de stabilisateur de l'hydratation du ciment en évitant l'apparition de réactions chimiques précoces du  $C_3A$ .

#### I.1.1 Les constituants du clinker

Le tableau I.1 résume les notations chimiques et cimentières des principaux constituants anhydres du ciment portland.

**Tableau I.1** - Notations cimentières des principaux constituants du ciment Portland

Nom	Oxyde	Notation cimentière
Chaux	CaO	C
Silice	SiO <sub>2</sub>	S
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
Eau	H <sub>2</sub> O	H
Oxyde de soufre	SO <sub>3</sub>	S
Périclase	MgO	M
Oxyde de potassium	K <sub>2</sub> O	K

Ainsi donc, les différentes phases entrant dans la composition du clinker sont les suivantes.

- L'Alite ou le silicate tricalcique  $C_3S$  ( $3CaO.SiO_2$ ), est le constituant majoritaire entrant dans la composition du clinker ; environ 50 à 70% de sa masse.
- La Belite ou le silicate bicalcique  $C_2S$  ( $2CaO.SiO_2$ ), représente environ 10 à 30% de la masse du clinker.
- L'Aluminate tricalcique  $C_3A$  ( $3CaO.AlO_3$ ), représente environ 2 à 15% de la masse du clinker.
- L'Alumino-ferrite tétracalcique ou (Fero-aluminate tétracalcique)  $C_4AF$  ( $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ), qui représente environ 5 à 15% de la masse du clinker.

Le gypse  $CaSO_4.2H_2O$  est ajouté au mélange pour contrôler la prise.

## I.1.2 Réactions d'hydratation du ciment portland

Les réactions d'hydratation des différents composés du ciment sont complexes car celles-ci se déroulent avec des cinétiques différentes. Dans la plupart des ouvrages, les réactions d'hydratation des composés du ciment sont traitées séparément en considérant que chaque composé constitue une phase pure. Ce qui en réalité est faux car lors du processus d'hydratation, il existe des interactions entre les différentes phases [Taylor 1990] [Older 1972] [Ollivier 2003].

Nous résumons ici les grandes étapes décrivant l'hydratation des principales phases entrant dans la composition du clinker.

### I.1.2.1 Hydratation du C<sub>3</sub>S

Le C<sub>3</sub>S est le constituant majeur du ciment Portland artificiel et joue un rôle important dans la formation des hydrates et l'acquisition des résistances mécaniques. En effet au contact de l'eau, le C<sub>3</sub>S s'hydrate pour former les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et la portlandite (CH). Cette réaction est fortement exothermique et s'accompagne d'un dégagement de chaleur important. La stoechiométrie des C-S-H évolue tout au long de l'hydratation et est fortement influencée par la température, le rapport eau/ciment (E/C) et de la quantité d'impuretés (Cr, Ti, Sr) présentes dans les réseaux cristallins d'alite [LEA 2004]. On peut donc écrire de manière systématique une équation bilan des espèces mis en jeu [YE 2003].



### I.1.2.2 Hydratation du C<sub>2</sub>S

La réaction d'hydratation du C<sub>2</sub>S est semblable à celle du C<sub>3</sub>S mais avec une cinétique plus lente et une exothermie plus faible. La réaction d'hydratation peut s'écrire sous la forme simplifiée :



### I.1.2.3 Hydratation du C<sub>3</sub>A

La réaction d'hydratation du C<sub>3</sub>A est très rapide et fortement exothermique, ayant pour conséquence la formation en premier lieu des composés tels que le C<sub>4</sub>AH<sub>19</sub> et le C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>. Le C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> constitue la forme la plus stable qui est souvent à l'origine de la rigidification trop rapide de la pâte [LEA 2004].



Pour retarder la structuration de la pâte, on ajoute du gypse pour contrôler la réaction. La réaction en présence du gypse forme l'ettringite et s'écrit :



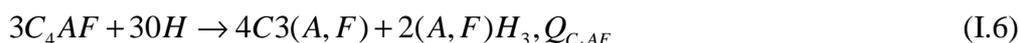
Après épuisement du gypse (équation (I.4)), la phase ettringétique devient instable et se dissout pour former du monosulfoaluminate selon :



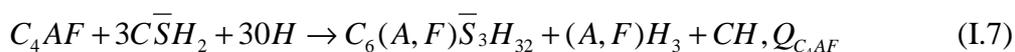
La quantité respective de  $C_3AH_6$ , d'ettringite et de monosulfoaluminate dans la pâte de ciment hydratée va donc dépendre de la quantité de gypse introduite.

#### I.1.2.4 Hydratation du $C_4AF$

L'hydratation du  $C_4AF$  est comparable à celle du  $C_3A$  à la différence que la vitesse de réaction et la chaleur dégagée sont plus faibles. Les produits formés contiennent de la ferrite  $Fe_2O_3$ . Les principales réactions d'hydratation du  $C_4AF$  sont les suivantes :



En présence du gypse :



#### I.1.3 Cinétique du processus de l'hydratation

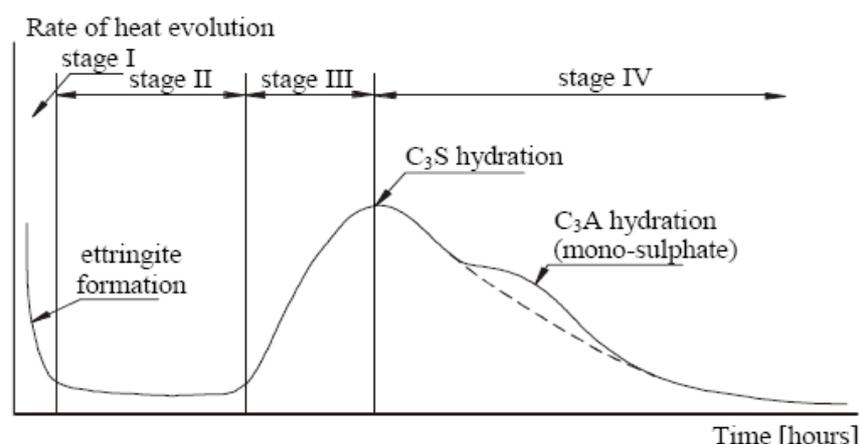
La cinétique de l'hydratation des phases  $C_3S$  et  $C_3A$  est généralement considérée comme la plus influente dans l'hydratation du ciment [LEA 2004]. La figure I.1 représente l'évolution typique du flux de chaleur dégagé lors de l'hydratation d'une pâte de ciment portland. Cette variation du flux thermique enregistrée lors de l'hydratation est généralement décrite dans la bibliographie. Mindess et Young [Mindess 1981] proposent cinq étapes successives décrites de la façon suivante:

1- une période de pré-induction (phase I) qui correspond au premier pic exothermique observé suite au passage en solution des anhydres dès leur contact avec l'eau. Elle concerne les premières minutes de la réaction.

2- une période d'induction ou période dormante (phase II), de 2 à 5 heures selon la réactivité du  $C_3S$ , au cours de laquelle on observe une augmentation de la couche protectrice de  $C_3S$  et une augmentation de la concentration en ions  $Ca^{2+}$ . Durant cette phase un très faible dégagement de chaleur est observé, traduisant une faible activité chimique.

3- une période d'accélération (phase III), marquée par la partie ascendante du second pic exothermique. Dans sa thèse, van Breugel [Breugel 1991] décrit ce mécanisme comme un transport d'ions et leur précipitation quasi-instantanée se traduisant par l'épaississement de la couche solide qui se forme autour des grains anhydres. L'accélération de l'hydratation peut être expliquée par la nucléation de  $Ca(OH)_2$  dans la solution saturée en ions  $Ca^{2+}$  et la croissance de C-S-H en périphérie du grain.

4- une période de décélération (phase IV), associée à la partie descendante du second pic exothermique. Dans cette phase, la couche d'hydrates qui enrobe les grains anhydres devient assez épaisse pour diminuer la diffusion des ions dans l'eau. Cette période de faible activité thermique peut s'étendre sur des années tant qu'il reste du ciment anhydre et de l'eau dans les pores capillaires.



**Figure I.1-** Courbe calorimétrique de l'hydratation d'une pâte de ciment Portland tiré de Mindess & Young [Mindess 1981] d'après Guang YE [YE 2003]

### I.1.4 Degré d'hydratation

Le degré d'hydratation du ciment est défini comme le rapport entre la masse hydratée au temps  $t$  et la masse initiale de ciment anhydre [Breugel 1991] [LEA 2004] :

$$\alpha(t) = \frac{m_{hyd}(t)}{m_i} \quad (I.8)$$

avec

- $\alpha(t)$  : le degré d'hydratation du ciment à l'instant  $t$
- $m_{hyd}(t)$  : la masse de ciment hydraté à l'instant  $t$
- $m_i$  : la masse initiale de ciment anhydre

Expérimentalement, deux méthodes permettent de caractériser le degré d'hydratation d'une pâte de ciment. La méthode directe basée sur la quantification du ciment ayant ou n'ayant pas réagi à l'instant  $t$ , et la méthode indirecte consistant à suivre l'évolution d'une propriété commune aux différentes réactions d'hydratation (par exemple l'exothermie de la réaction d'hydratation, l'accroissement de la quantité d'eau liée etc) [Mounanga 2003].

Parmi les méthodes indirectes développées, on peut citer:

- l'exothermie de la réaction d'hydratation:

Cette technique préconisée par Garcia [Garcia 2001] est reprise par Mounanga [Mounanga 2003] dans son travail de thèse. La technique permet de suivre l'évolution des réactions d'hydratation. Le degré d'hydratation est défini en supposant que les différentes réactions d'hydratation sont synchrones par la relation suivante :

$$\alpha(t) \approx \alpha(Q(t)) = \frac{Q(t)}{Q_\infty} \quad (I.9)$$

avec :

- $Q(t)$  : la quantité de chaleur dégagée à l'instant  $t$
- $Q_\infty$  : la quantité de chaleur dégagée pour une hydratation complète du ciment.

On peut la calculer par la relation suivante [Mitani 2003] [Taylor 1990].

$$Q_\infty = q_1(C_3S) + q_2(C_2S) + q_3(C_3A) + q_4(C_4AF) \quad (I.10)$$

avec  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  et  $q_4$  les chaleurs d'hydratation (J/g) des phases minéralogiques pures du clinker dont les valeurs sont présentées dans le tableau I.2 [Breugel 1991] [Taylor 1990].

**Tableau I.2** - Chaleurs d'hydratation des phases minérales du clinker

Chaleur d'hydratation (en J/g)		
	Van Breugel	Taylor
Q1	526	517
Q2	258	262
Q3	696	1144
Q4	258	418

Les écarts mesurés sur les quantités de chaleur dégagées par les phases aluminates sont probablement associés à des structures cristallographiques différentes des  $C_3A$  et  $C_4AF$  présents dans les deux ciments.

➤ la quantité d'eau chimiquement liée :  $\alpha(t) = \frac{W(t)}{W_\infty}$  (I.11)

avec :

$w(t)$  : quantité d'eau chimiquement liée, mesurée par perte au feu d'un échantillon de pâte de ciment entre 105°C et 550°C [Carré 2005]. Il est à noter que la température maximale peut être fixée à 1100°C dans la mesure où les échantillons ne contiennent pas de carbonates, par exemple dans le cas des ciments Portland constamment protégés de la carbonatation.

$w_\infty$  : quantité d'eau chimiquement liée correspondant à une hydratation complète du ciment ; cette quantité peut dans le cas d'un ciment Portland, être calculée à partir de la composition potentielle du ciment anhydre (Bogue).

Cette méthode est basée sur la quantification d'eau chimiquement liée à l'instant  $t$  et sur l'estimation de la quantité d'eau chimiquement liée correspondant à une hydratation complète du ciment [LCPC 2002].

➤ la résistance en compression :  $\alpha(t) = \frac{R_c(t)}{R_{c\max}}$  (I.12)

Des études menées par Torrenti [Torrenti 1992] cité par Feron [Feron 2003] sur l'évolution de la résistance en compression ont montré que celle-ci évolue linéairement en fonction du degré d'avancement de l'hydratation. Celui-ci peut donc être défini comme le rapport :

$$\alpha(t) = \frac{R_c(t)}{R_{c\max}}$$

avec :

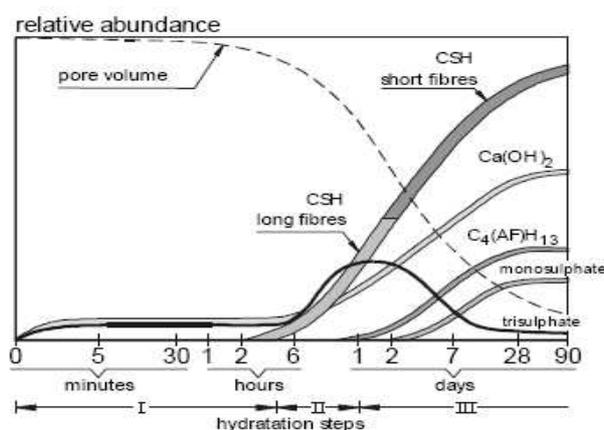
- $R_c(t)$  : la résistance en compression à l'instant  $t$
- $R_{cmax}$  : la résistance en compression finale

### I.1.5 Structuration de la pâte de ciment hydratée

Le développement de la microstructure dans la pâte de ciment comprend deux phases principales : La phase solide formée principalement de produits d'hydratation et la phase poreuse (structuration du réseau poreux) [Ollivier 2003].

#### I.1.5.1 La phase solide

Les trois principaux produits d'hydratation sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H), la portlandite (CH) et l'ettringite. La Figure I.2 présente, de façon résumée le développement des hydrates au cours du temps. Comme nous l'avons mentionné plus haut, les séquences d'hydratation des phases  $C_3A$  et  $C_3S$  sont prépondérantes. Lors de l'hydratation ces deux séquences ne se déroulent pas de façon indépendante mais bien au contraire sont soumises à des interactions. D'après van Breugel [Breugel 1991], l'activation thermique des réactions des silicates par la chaleur de réaction des aluminates entraîne un effet accélérateur de la prise et du durcissement. De même, l'élévation du pH et de la concentration en calcium due à la libération de chaux lors de l'hydratation du silicate tricalcique modifie sensiblement la vitesse de réaction de l'aluminate.



**Figure I.2-** Développement des hydrates dans la pâte de ciment [Locher 1976]  
d'après Guang Ye [YE 2003]

### I.1.5.2 La structure poreuse

La structuration progressive de la pâte de ciment du fait de l'hydratation s'accompagne aussi d'une diminution de la quantité d'eau initiale, ayant pour conséquence la création d'un réseau poreux évolutif. Cette structure poreuse peut être scindée en deux principales catégories qui sont [Taylor 1990]:

- les pores des hydrates ou pores du gel,
- les pores capillaires.

Les pores de gel sont une caractéristique intrinsèque des hydrates et dépendent peu du rapport eau/ciment. Le gel de C-S-H est la source principale de cette porosité. Et dans ce cas, on retrouve deux types de pores [Baroguel 1994]:

- les pores inter-cristallites situés entre les particules de gels,
- les pores intra-cristallites correspondant aux espaces entre les feuillets des C-S-H (la dimension caractéristique des espaces interfeuillets est de quelques dizaines d'angströms).

Les pores capillaires sont le résultat des reliquats des espaces intergranulaires puisque les produits d'hydratation ne remplissent pas tout le volume de la pâte de ciment. Cette porosité peut être considérée comme le volume occupé par l'eau évaporable [Ollivier 2003].

Les pores de taille supérieure à 50 nm abaissent la résistance et nuisent à l'imperméabilité. De même, ils influent sur le retrait et le fluage.

Les volumes de ces deux familles de pores dépendent de la porosité initiale et de l'avancement des réactions d'hydratation [Ollivier 2003].

Il faut noter que la différence entre la taille des pores de gel et les pores capillaire est dans une large mesure arbitraire, car le spectre de la taille des pores est un processus continu [Scrivener 1999]. Selon Mindess & Young [Mindess 1981], seuls les pores capillaires sont responsables de la perméabilité à l'eau.

Guang Ye [YE 2003] dans son étude bibliographique a donné une classification des pores, proposés dans la littérature. Le tableau suivant nous donne une classification des pores d'après Mindess et Young [Mindess 1981].

**Tableau I.3** - Classification des pores dans une pâte de ciment hydratée [Mindess 1981]

Nomenclature	diamètre	description	Propriétés influencées
Pores capillaires	50 nm à 0,5 µm	Grands capillaires	Résistance, perméabilité
	10 nm à 50 nm	Capillaires moyens	Résistance, perméabilité, retrait à forte humidité relative
Pores des hydrates	2,5 nm à 10 nm	Petits capillaires	Retrait à humidité relative moyenne de 50%
	0,5 nm à 2,5 nm	Micropores	Retrait, fluage
	<0,5 nm	Micropores (interfeuillets)	Retrait, fluage

## I.2 Le ciment alumineux

Plusieurs appellations sont ainsi utilisées pour désigner ce ciment : le ciment d'aluminates de calcium (CAC) ou le ciment alumineux fondu (HAC). Le constituant majoritaire est l'aluminate monocalcique  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  (CA en notation cimentaire). Bensted [Bensted 2002] a étudié plus en détail l'hydratation du ciment alumineux. Au cours de l'hydratation, la microstructure du ciment alumineux se développe à travers les espaces intergranulaires remplis d'eau. Ce mode d'hydratation est très différent de celui des grains silico-calciques du clinker Portland pour lequel les hydrates recouvrent le grain d'une couche assez dense limitant les cinétiques de réactions ultérieures [Bensted 2002] [Chotard 2003]. La croissance des hydrates de ciment alumineux laissant libre la surface restante du grain anhydre, la poursuite de l'hydratation et l'élévation des résistances mécaniques sont rapides.

On distingue trois principales réactions pouvant être découplées par gamme de température [Chotard 2003] [Feron 2002] [Bensted 2002] [Auvray 2003].

L'hydratation peut se faire en plusieurs étapes, comprenant la formation de produits intermédiaires  $\text{CAH}_{10}$ , et  $\text{C}_2\text{AH}_8$ .

- pour des températures inférieures à 15°C, le produit formé est le  $\text{CAH}_{10}$ . Il possède d'excellentes propriétés liantes :



- 15°C < T < 25°C :

Au delà de 15°C, les produits formés sont C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub> et le CAH<sub>10</sub>. Au fur et à mesure que la température augmente au voisinage des 25°C, le principal hydrate formé est le C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>.



- Pour des températures supérieures à 30°C les produits formés sont essentiellement du C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>



On peut donc remarquer que la réaction d'hydratation entre l'aluminate de calcium et l'eau à température élevée aboutit à la formation d'aluminate de calcium hydraté C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> et d'alumine hydratée AH<sub>3</sub>. Ainsi la température a une influence non négligeable sur l'hydratation des ciments alumineux. Dans leurs travaux, Smith et al. [Smith 2002] ont pu observer à partir des analyses ATG et des observations DRX l'influence de la température sur la formation des hydrates de pâtes de ciment alumineux au bout de 5 mois de conservation. Les températures de conservation étaient 5°C, 20°C, 40°C, et 60°C et le rapport E/C était égal à 0,33. Les résultats sont répertoriés sur le tableau I.4.

On peut constater que pour des températures de conservation inférieures à 40°C, la phase C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> stable ne se forme pas du tout même au bout de 5 mois.

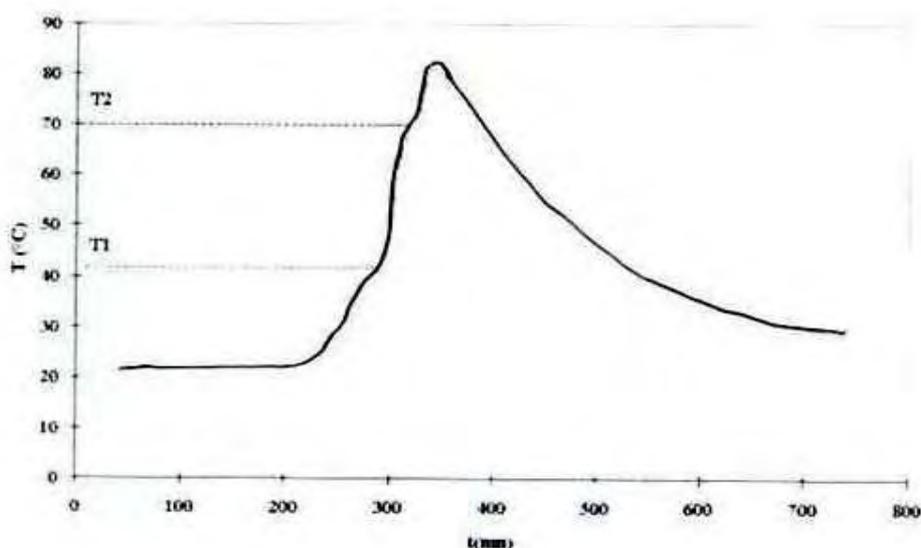
- la structure cristalline de l'aluminate de calcium hydraté passe du système hexagonal (CAH<sub>10</sub>) au système cubique centré (C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>),
- la porosité augmente,
- la résistance mécanique diminue.

Ces changements ont également été observés par Smith [Smith 2002].

La figure I.3 présente un exemple de courbe typique de l'échauffement d'un béton de ciment alumineux en conditions quasi-adiabatiques. Les températures T1 et T2 sont considérées comme des températures seuils qui caractérisent les changements de phases intervenant lors de l'hydratation du ciment [Feron 2002].

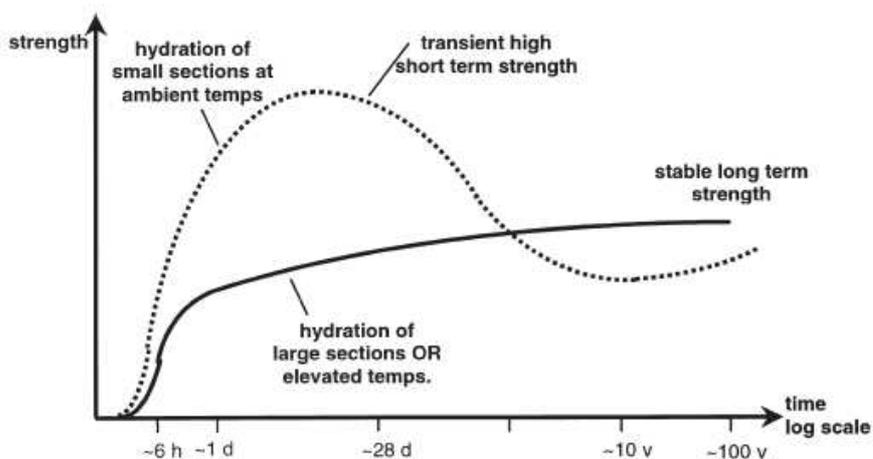
**Tableau I.4** - Type d'hydrates formés entres 1 jour et 5 mois pour des pâtes à base de ciment alumineux avec un rapport E/C = 0,33 : [Smith 2002]

Type of hydrates formed at different temperatures from 24 to 3500 h (5 months)			
Specimen	Time after mixing (h)	DTA (amorphous and crystallised phases)	XRD (crystallised phase)
05.033	55	CAH <sub>10</sub> and AH <sub>3</sub>	CAH <sub>10</sub>
	320	CAH <sub>10</sub> and AH <sub>3</sub>	CAH <sub>10</sub>
	700	CAH <sub>10</sub> and AH <sub>3</sub>	CAH <sub>10</sub>
	3500	CAH <sub>10</sub> , C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> and AH <sub>3</sub>	CAH <sub>10</sub> and C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub>
20.033	24	CAH <sub>10</sub> , C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> and AH <sub>3</sub>	CAH <sub>10</sub> and C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub>
	55	CAH <sub>10</sub> , C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> and AH <sub>3</sub>	CAH <sub>10</sub> and C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub>
	700	CAH <sub>10</sub> , C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> and AH <sub>3</sub>	CAH <sub>10</sub> and C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub>
	3500	CAH <sub>10</sub> , C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> and AH <sub>3</sub>	CAH <sub>10</sub> and C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> and AH <sub>3</sub>
40.033	28	C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> , C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> , AH <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> , C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>
	65	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>
	700	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>
	3500	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>
60.033	28	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>
	75	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>
	700	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>
	3500	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> and AH <sub>3</sub>

**Figure I.3** - Courbe d'échauffement d'un béton de ciment alumineux dans le temps (min) [Feron 2002]

La cinétique de la réaction dépend de la température et du mode de conservation. En effet, pour des températures élevées (environ 50°C), la conversion (changement de phase) se produit en quelques jours et les résistances sont continûment croissantes [Smith 2002] [Scrivener 1999] [Auvray 2003]. Cette température est naturellement atteinte dans le matériau, du fait des réactions exothermiques d'hydratation, si la pièce coulée est suffisamment massive. Par contre si l'élément est de dimension trop faible et qu'il est

conservé à température ambiante, alors la conversion peut se produire au bout de quelques années entraînant avec elle la chute des résistances mécaniques du matériau qui découle des transformations chimiques [Scrivener 1999]. La figure I.4 donne une représentation schématique de l'influence des dimensions de la structure sur l'évolution des résistances mécaniques à court et à long terme.



**Figure I.4** - Développement des résistances dans un échantillon de pâte de ciment alumineux préparée avec un rapport E/C = 0,4 [Scrivener 1999]

Les hydrates stables du ciment alumineux  $C_3AH_6$  et  $AH_3$  ont une densité élevée, ils occupent donc moins de place que les hydrates silico-calciques au même degré d'hydratation. La matrice a une porosité plus élevée, donc une résistance mécanique plus faible que celle du clinker Portland pour le même rapport E/C [Scrivener 1999].

### I.3 Les systèmes à base de liants binaire et ternaire

La réalisation de certains ouvrages nécessite l'emploi de matériaux avec des propriétés spécifiques. A cet effet, le ciment Portland peut être combiné avec d'autres liants ou des ajouts pour formuler des matériaux capables de répondre à des exigences particulières. Ces propriétés peuvent être la prise rapide, les hautes résistances au jeune âge, l'expansion et un faible retrait. C'est le cas par exemple des mélanges à base de liant binaire et ternaire. On peut citer par exemple les matériaux autonivelants [Yoshinobu 2006]; dans le domaine des enduits, de tels systèmes sont composés d'un système liant ternaire basé principalement sur un mélange de ciment Portland (PC), de ciment alumineux (CA) et de sulfate de calcium afin d'assurer une prise rapide [Yoshinobu 2006]. Ce système liant peut également être modifié par des additifs afin d'éliminer des bulles d'air ou d'obtenir des propriétés autonivelantes ou

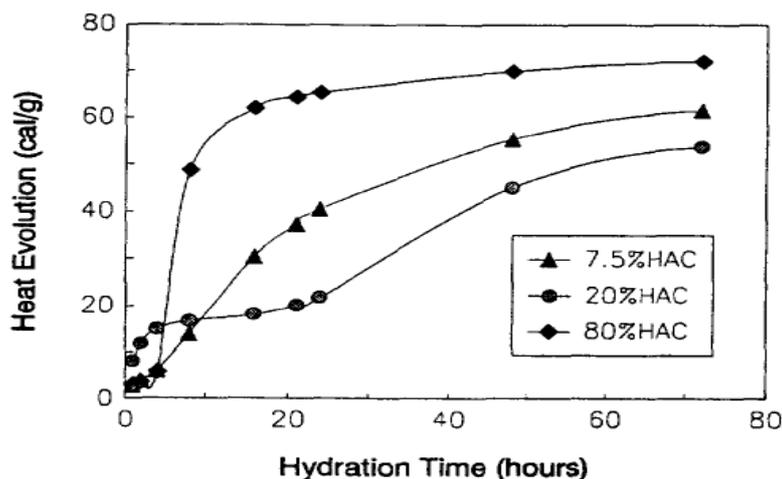
autolissantes [Yoshinobu 2006] [Plank 2007] [Do 2003]. Les produits d'hydratation de la phase liante sont majoritairement formés d'ettringite, laquelle est principalement due à l'hydratation des phases aluminates fournies par le ciment alumineux [Evju 2001].

Les formulations basées majoritairement sur le ciment alumineux réagissent plus rapidement en termes de propriétés mécaniques. Ping Gu [Gu 1997] a étudié le développement des résistances mécaniques au jeune âge de trois compositions binaires avec différentes proportions Ciment Portland/Ciment alumineux de (20/80), (80/20) et (92.5/7.5) pour un rapport E/C égal à 0.4. Il démontre ainsi que le système binaire (20/80), basé majoritairement sur le ciment alumineux, développe de grandes résistances durant les premières heures comparé aux deux autres (92.5/7.5 et 80/20). Durant les 8 premières heures, le mélange à forte teneur en ciment Portland (92.5/7.25) est moins résistant que les deux autres, par contre son comportement mécanique s'améliore sensiblement par rapport au mélange (80/20) mais au bout de 72 heures il reste médiocre en comparaison au comportement mécanique du système à dominance de ciment alumineux (voir Tableau I.5). La figure I.5 nous donne une idée sur l'évolution de la chaleur d'hydratation des trois mélanges. On note ainsi une corrélation avec les résultats présentés sur le Tableau I.5 [Gu 1997]. D'après l'auteur, les faibles résistances enregistrées avec la composition binaire (80/20) sont probablement dues au fait que l'hydratation du  $C_3S$  est retardée par la présence de ciment alumineux.

**Tableau I.5-** Résistance en compression des pâtes à base binaire (Ciment Portland/Ciment alumineux)  
[Gu 1997]

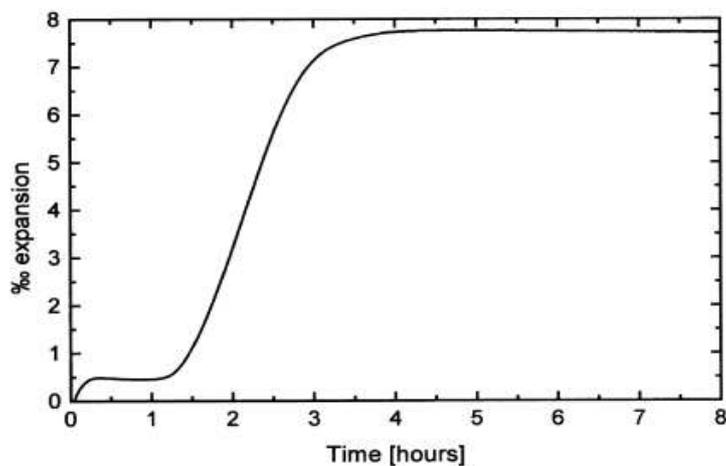
Hydratation Hours	92.5/7.25 (MPa)	80/20 (MPa)	20/80 (MPa)
1	—	0.7	—
2	—	0.8	—
4	—	1.2	3.5
8	0.7	1.7	25.5
16	4.5	2.8	36.1
21	5.8	2.7	36.8
24	8.2	2.7	43.8
48	16.2	2.6	40.7
72	23.5	10.7	46.7

Un mélange à base de ciment Portland, de ciment alumineux et de sulfate de calcium a été étudié par Evju et al. [Evju 2001]. Il apparaît grâce à des mesures de déformations au dilatomètre et de quantification par diffraction aux rayons X que, la phase ettringitique est également prépondérante et qu'elle a des propriétés expansives.



**Figure I.5** - Evolution de la chaleur d'hydratation des pâtes à base binaire (OPC/CAC) contenant différentes proportions de ciments alumineux (HAC) durant les 72 premières heures [Gu 1997]

La figure I.6 montre l'évolution des déformations durant les huit premières heures suivant la mise en œuvre d'une pâte à base ternaire composée de ciment alumineux, de ciment Portland et de l'hémihydrate- $\beta$  pour des proportions respectives de (50%, 25% et 25%). On constate que les déformations mesurées se traduisent essentiellement par l'expansion de la pâte de ciment.



**Figure I.6** - Dilatation d'un échantillon de pâte (à base ternaire) durant les 8 premières heures de l'hydratation [Evju 2001]

Le développement des résistances mécaniques au jeune âge des systèmes binaires et ternaires dépendrait fortement des paramètres tels que le ratio (OPC/CAC), l'hydratation avec la formation des phases d'hydrates comme l'ettringite, les C-S-H, la portlandite, le monosulfoaluminate ainsi que le rapport des phases  $CAH_{10}/C_2AH_8$  [Gu 1997] [Evju 2001].

## **I.4 Les ajouts pour la modification des propriétés des matériaux cimentaires**

### **I.4.1 Les additions minérales**

Les additions minérales sont des produits qui sont incorporés dans un matériau cimentaire pour modifier une ou plusieurs de ses propriétés. Les pigments, les agents de mouture, les cendres volantes et les fumées de silice sont des exemples d'ajouts minéraux utilisés pour améliorer les propriétés des matériaux cimentaires. La présence d'ajouts peut avoir des effets accélérateurs (fumée de silice) ou retardateurs (cendres volantes) [Waller 2003]. Dans les matériaux cimentaires, ils jouent le rôle de filler, augmentant la compacité du mélange granulaire en s'insérant entre les grains de ciment. Du fait de leur grande surface spécifique (en particulier pour les fumées de silice), ils servent en effet de sites de nucléation et de germination aux hydrates du ciment [Pascal 2002] [Auvray 2003].

### **I.4.2 Les adjuvants organiques**

Les adjuvants organiques sont généralement classés par la fonction qu'on leur attribue : rétenteur d'eau, entraîneur d'air, fluidifiant, inhibiteur de corrosion, imperméabilisant, agent anti-retrait.

En fonction des propriétés sur lesquelles ils agissent, on peut classer ces adjuvants en plusieurs groupes:

- les retardateurs de prise (sucres, hydroxyacides) qui ont une grande influence sur le degré d'hydratation,
- les entraîneurs d'air qui influent sur la résistance vis-à-vis du gel-dégel,
- les éthers cellulosiques, qui ont une influence sur l'hydratation, les propriétés mécaniques,
- les latex, qui ont une influence sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques,
- les agents hydrofuges de masse.
- les rétenteurs d'eau et les superplastifiants qui ont une grande influence sur la maniabilité et la porosité.

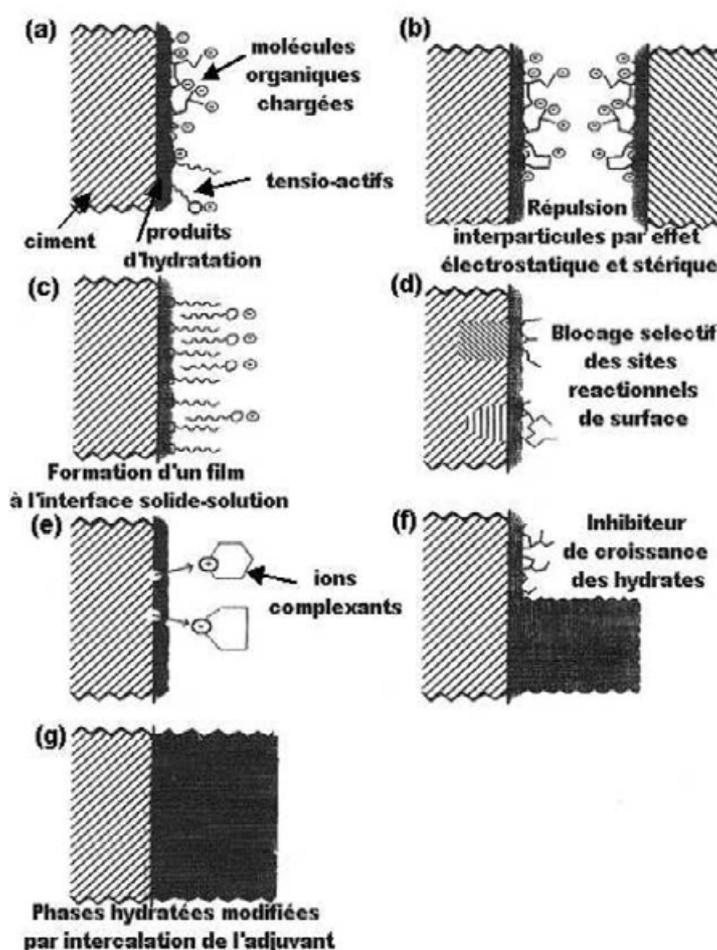
Le superplastifiant agit sur les différentes périodes de l'hydratation du ciment [Pascal 2002]. Dans la première phase, l'adsorption du superplastifiant sur les phases minérales modifie et peut empêcher la germination et la croissance des hydrates [Plank 2007]. Des groupements comme  $\text{SO}_3^-$  s'adsorbent préférentiellement sur les phases aluminates et concurrencent ainsi

les phases  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ils peuvent s'adsorber aussi sur la bassanite et retarder ainsi sa transformation en gypse [Pourchez 2007]. Dans la période dormante, ils sont adsorbés sur les constituants du ciment, ce qui réduit les forces d'interaction entre les particules et fluidifie ainsi le mélange [Young 1972]. La période dormante est étendue, la forme et la nature des hydrates peuvent être modifiées ainsi que leur réactivité. Durant la période d'accélération, les molécules de superplastifiant peuvent se loger dans les pores de la solution interstitielle et modifier la nature et la quantité des produits d'hydratation [Jolicoeur 1998]. Les modes d'action envisagés sont représentés sur la Figure I.7. Les mécanismes présentés servent à la compréhension des interactions pouvant s'établir entre des molécules organiques et le ciment [Ohama 1998] [Jolicoeur 1998].

- le mécanisme (a) illustre l'adsorption de molécules possédant des fonctions de type  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{COO}^-$  ou une fonction polaire tel OH,
- l'interaction (b), particulièrement adaptée au cas des superplastifiants, décrit l'adsorption des polymères chargés induisant un phénomène de répulsion intergranulaire,
- le schéma (c), approprié aux molécules tensioactives, traduit la formation de micelles à l'interface solide-solution,
- le mécanisme (d) renvoie à la chimisorption de polynaphtalène sulphonate sur des sites réactionnels spécifiques comme ceux des aluminates,
- le mécanisme (e) propose l'action de sucres ou d'hydroxy carboxyliques par complexation dans la solution interstitielle. Cette complexation peut alors retarder la précipitation d'hydrates comme la portlandite ou le C-S-H,
- le mécanisme (f) suggère que les adjuvants inhibent potentiellement la croissance des hydrates en s'adsorbant sur des sites cristallographiques spécifiques de croissance,
- enfin, le schéma (g) décrit l'insertion du polymère dans la structure de l'hydrate.

Les adjuvants peuvent être incorporés dans les mélanges cimentaires soit sous forme de poudre redispersable, soit sous forme liquide [Ohama 1995].

Les polymères confèrent plusieurs propriétés aux mélanges à base cimentaire. De manière générale, ils augmentent l'adhérence au support, facilitent aussi leur mise en place et augmentent leurs résistances mécaniques ainsi que leur résistance aux agressions chimiques [Bonin 2005] [Ohama 1998].



**Figure I.7** - Schématisation des différents modes d'actions pouvant se produire entre un adjuvant et une particule de ciment d'après Jolicoeur et al. [Jolicoeur 1998]

### I.4.2.1 Les éthers de cellulose

Les éthers cellulosiques sont des polymères dérivés de la cellulose (maillons d'anhydroglucose reliés par une liaison glycosidique). Dans l'industrie cimentaire, les éthers de cellulose sont utilisés, essentiellement pour leur propriété de rétention d'eau. Les éthers de cellulose les plus couramment utilisés comme adjuvants dans l'industrie des liants hydrauliques sont le méthyle hydroxyéthyle cellulose (MHEC) et le méthyle hydroxypropyle cellulose (MHPC).

#### I.4.2.1.1 Interaction avec l'eau

Une fois mélangés à l'eau, les éthers de cellulose vont interagir avec les molécules d'eau. Dans ce cas, des risques d'agglomération et d'apparition de grumeaux sont possibles si aucun

traitement de surface n'est effectué au préalable [Pourchez 2006a]. Un traitement de surface, avant la granulation, permet alors une meilleure dispersion de ces additifs dans les systèmes aqueux. Les schémas présentés sur les figures I.8 et I.9 montrent un exemple de formules semi-développées de motifs de MHPC et MHEC.

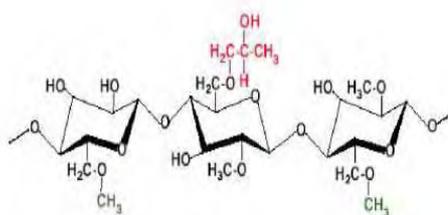


Figure I.8 - Formule semi-développée d'un motif de MHPC [Peschard 2002]

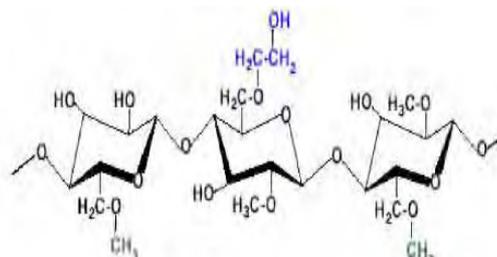


Figure I.9 - Formule semi-développée d'un motif de MHEC [Peschard 2002]

D'après plusieurs auteurs [Pourchez 2006a] [Khayat 1998] [Peschard 2002] [Bertrand 2002], les trois principaux modes d'action des éthers de cellulose avec l'eau sont les suivants:

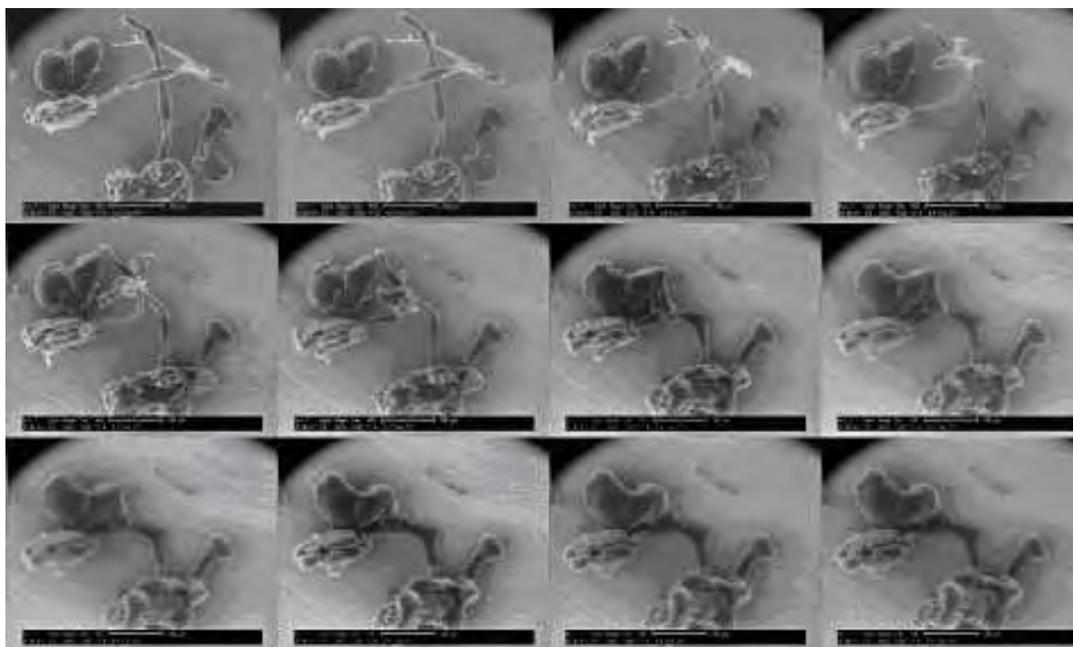
**Adsorption** : Les longues chaînes de polymère adhèrent à la surface des molécules d'eau, adsorbent et fixent une partie de l'eau du système et s'expansent. Cela augmente la viscosité de l'eau.

**Association** : Il peut apparaître des forces d'attraction entre les molécules adjacentes et les chaînes polymères, réduisant la mobilité de l'eau, pouvant ainsi causer la formation d'un gel et augmenter la viscosité.

**Entrelacement** : Pour les grandes concentrations d'éther de cellulose et sous l'effet des faibles cisaillements lors du malaxage, les chaînes polymères peuvent s'entrelacer. Il en résulte une augmentation de la viscosité apparente.

Dans l'eau, les éthers de cellulose peuvent se trouver sous la forme de gels plus ou moins visqueux selon leur concentration dans le milieu et la température [Sarkar 1995] [Khayat 1998]. C'est grâce à ces propriétés que l'ajustement de la rhéologie et de la maniabilité du mortier est possible [Peschard 2002]. Cela engendre aussi la propriété de rétention d'eau, empêchant ainsi un départ d'eau trop rapide, surtout lorsque les mortiers sont appliqués sur des supports poreux [Bertrand 2004]. Par ailleurs, plus la masse moléculaire de l'éther de cellulose est importante, plus la chaîne de polymère est longue, par conséquent plus la capacité de former des liaisons avec l'eau est grande ; il en résulte une plus forte rétention en

eau. Bertrand [Bertrand 2004] a observé la rétention d'eau in situ avec un microscope électronique à balayage environnemental (ESEM) (voir figure I.10).



**Figure I.10** - Images in situ en ESEM d'un éther de cellulose gonflant en présence d'eau [Bertrand 2004]

#### **I.4.2.1.2 Interaction avec le ciment et influence sur l'hydratation**

Les différents modes d'action des polysaccharides avec les particules de ciment ne font pas l'unanimité parmi les auteurs cités par Peschard [Peschard 2002]. Plusieurs théories sont ainsi avancées pour tenter d'expliquer les interactions éthers de cellulose-ciment. Parmi elles on peut citer :

**La théorie de l'adsorption** : Les chaînes polymère s'adsorbent sur les grains de ciment notamment les aluminates de calcium hydratés.

**La théorie de la précipitation** : En présence de polysaccharide, il y aurait formation d'hydrates insolubles à la surface des anhydres (précipitation de sels insolubles, produits par les adjuvants organiques après réaction avec les ions calcium).

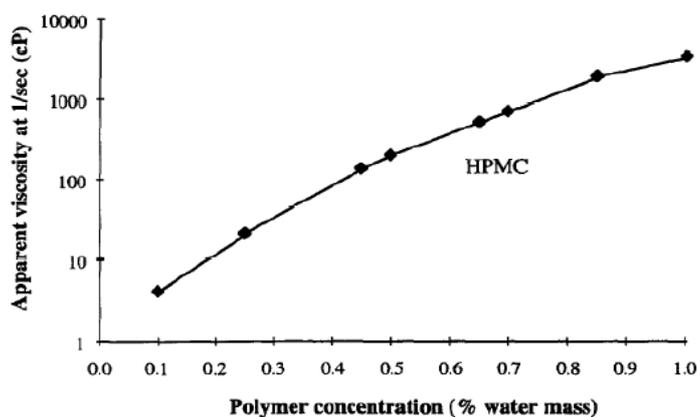
**La théorie de la formation de complexes** : Certaines fonctions des éthers de cellulose pourraient former des complexes avec les ions de la phase aqueuse tels que les ions calcium.

**La théorie de la germination** : La germination et/ou la croissance des cristaux à la surface des phases anhydres de ciment peuvent être gênés par l'adsorption de molécules organiques.

### I.4.2.1.3 Influence sur les propriétés du mortier frais

Les éthers de cellulose sont des agents épaississants. La figure I.11 décrit la viscosité d'un mélange aqueux avec différents pourcentages de MHPC. L'augmentation de la concentration en MHPC augmente la viscosité du mélange (Figure I.11) [Khayat 1996] [Khayat 1998]. Il augmente sa viscosité, sa maniabilité en retardant l'hydratation et donc le temps de prise [Khayat 1996].

Ces constats sont les mêmes que ceux effectués pour la rhéologie de mélanges eau-polysaccharide [Pourchez 2006]. Selon cet auteur, cette augmentation de la viscosité apparente est due à l'adsorption des molécules d'eau sur le polymère (liaisons hydrogène). Jenni [Jenni 2003] fait état de l'apparition de films d'éther de cellulose (MHEC) dans un enduit et ce dès le malaxage. Ces films sembleraient se former à l'intérieur et sur les parois des bulles d'air entraîné pendant le malaxage et seraient solubles dans l'eau en cas d'une nouvelle immersion du matériau. Ohama [Ohama 1998] a également observé la formation de films, mais ceux-ci seraient imperméables à l'eau.



**Figure I.11** - Influence de la concentration en polymère sur la viscosité apparente du mélange aqueux [Khayat 1996]

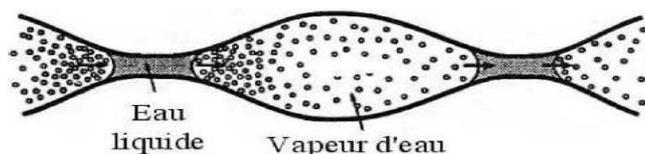
Le matériau frais est donc plus visqueux, cohésif et collant. Ces effets s'intensifient avec la teneur en polysaccharide. Il est également observé une augmentation de la quantité d'air entraîné par action des tensioactifs qui réduisent la tension superficielle de l'eau [Ohama 1984]. Cependant l'effet le plus connu, et d'ailleurs celui pour lequel le MHEC et les éthers de cellulose sont généralement utilisés, est la rétention d'eau. En effet, à faible taux de cisaillement, la phase aqueuse a la capacité de maintenir les particules de ciment en suspension ce qui diminue les risques de ségrégation et de sédimentation [Khayat 1998]. A fort taux de cisaillement, la résistance apparente du mélange diminue ce qui pourrait

s'expliquer par le désenchevêtrement des chaînes de polymères et la rupture de leurs liens [Ohama 1998].

#### I.4.2.1.4 Influence sur les propriétés du mortier durci

L'incorporation d'éther de cellulose dans les matériaux cimentaires entraîne une diminution des résistances mécaniques. Il a également été montré que la porosité du matériau augmente sensiblement avec l'ajout des éthers de cellulose [Ohama 1984] [Silva 2001]. Dans certains cas, on observe que l'ajout de cet adjuvant augmente la contrainte de rupture et la déformation en traction.

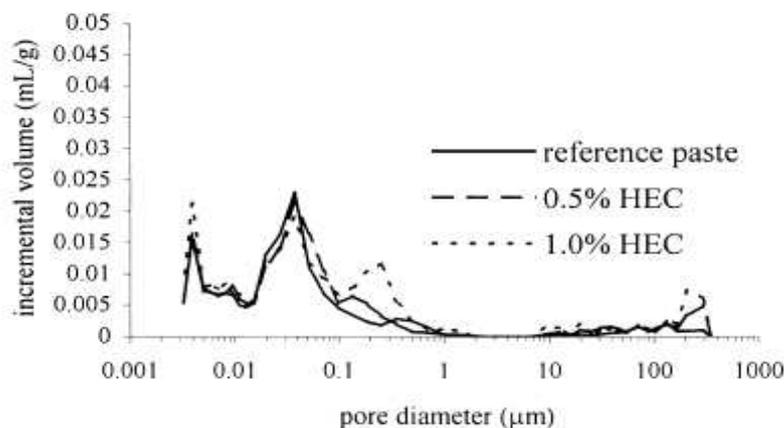
Les MHEC ont la propriété de créer un réseau de micropores avec une faible quantité d'ajout [Klemm 1997]. En effet les éthers cellulosiques engendrent un réseau poreux spécifique composé de bulles d'air (de 100  $\mu\text{m}$ ) connectées les unes aux autres par de fins canaux (de 0,1 à 1  $\mu\text{m}$ ). Avec une telle morphologie, ce réseau impose un régime hydrique mixte de flux capillaire et de diffusion de vapeur d'eau (figure I.12) [Malatrait 1992]. Ceci permet d'expliquer, d'une part la plus faible perméabilité à l'eau liquide des mortiers adjuvantés, car la cinétique du régime hydrique contrôlé par les bulles d'air est plus rapide que la cinétique du régime hydrique des mortiers non adjuvantés. D'autre part, l'autre conséquence est la plus forte perméabilité à la vapeur d'eau des mortiers adjuvantés car la cinétique du régime hydrique contrôlé par les canaux est plus rapide que pour les mortiers classiques.



**Figure I.12** - Modèle du réseau poreux dans un mortier contenant un éther de cellulose d'après Malatrait [Malatrait 1992]

Ce réseau est spécifique des éthers utilisés ; par exemple les MHPC induisent un volume poreux important comparé à des HEC (hydroethyl cellulose). Concernant ces derniers, leur incorporation conduit à l'apparition d'une nouvelle classe de pores par comparaison à un mortier ne contenant pas de HEC (figure I.13) [Silva 2001]. Les éthers de cellulose ont donc une influence sur la quantité, la taille, la mobilité de l'air entraîné et créent un réseau de bulles d'air. Pourchez [Pourchez 2007] a mesuré la taille de ce réseau de bulles. Elles mesurent entre

50 et 250  $\mu\text{m}$  et sont stabilisées durant les premières heures par la formation d'un film de polymère à l'interface air-eau [Jenni 2005].



**Figure I.13** - Distribution porosimétrique de la pâte de ciment en fonction de la teneur en HEC D'après Silva et al. [Silva 2001]

Les éthers celluliques influent sur d'autres propriétés du matériau frais et durci, comme le retrait, l'adhérence ou encore la fissuration [Pourchez 2006a] [Bertrand 2002].

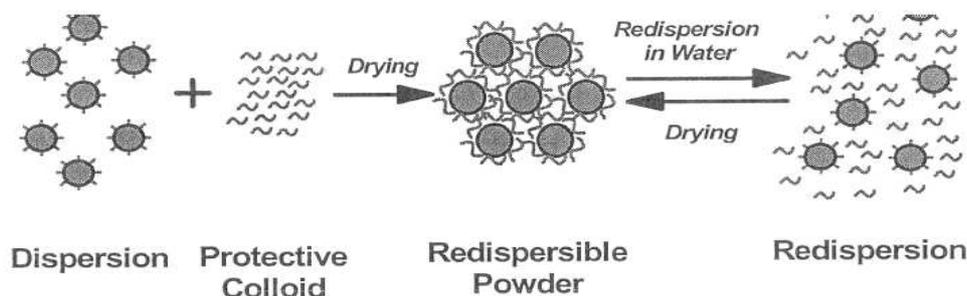
#### I.4.2.2 Les latex

Les latex sont des dispersions colloïdales stables de polymère dans un milieu aqueux. Normalement, les latex sont instables dans de telles conditions du fait des mouvements browniens et des forces de Van der Waals. Il est donc nécessaire de les stabiliser par l'ajout d'autres polymères, hydrophiles non chargés ou chargés. Ils peuvent être sous forme liquide ou sous forme de poudre.

L'un des avantages est la possibilité de les mélanger par avance aux différents composants du mortier pour obtenir des sacs préformulés et ainsi pouvoir les stocker plus facilement. Plusieurs types de latex sont utilisés dans l'industrie des mortiers [Ohama 1998] :

- Les copolymères Styrène-Butadiène (SBR)
- Les Chlorures de Polyvinyle (PVDC)
- Les Acrylonitrile-Butadiène (NBR),
- Les Polychloropènes (CR),
- Les Ester Polyacryliques (PAE),
- Les Acétate de Polyvinyle (PVAC),
- Les copolymères de Polyvinyle Ethylène-Acétate (EVA)

Les mortiers modifiés aux latex sont utilisés dans de nombreux domaines de la construction en raison de leurs caractéristiques mécaniques, de leur plus grande déformabilité, adhérence au support, imperméabilité et durabilité [Jenni 2005].



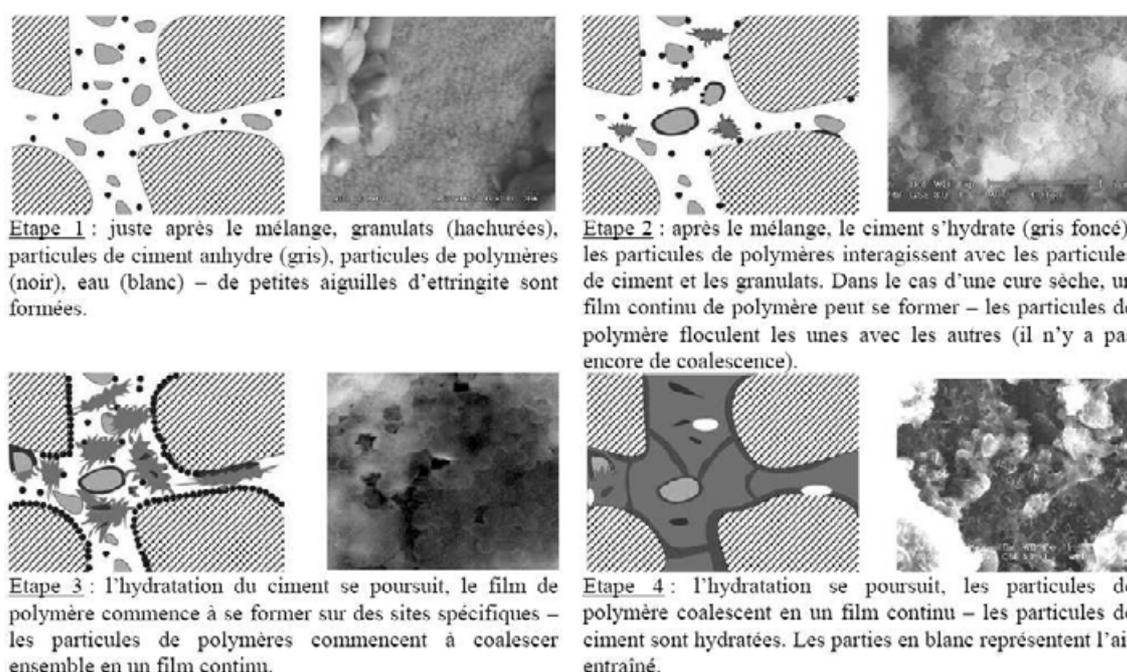
**Figure I.14** - Principe de stabilisation d'un latex. Cas de l'éthylène acétate de vinyle d'après Bonin [Bonin 2005]

#### I.4.2.2.1 Les latex, interactions avec la matrice cimentaire et l'eau

Lorsque le mortier contenant un latex est mélangé avec l'eau, l'hydratation du ciment se fait en même temps que la formation d'une phase pure de polymère correspondant à la coalescence des particules de polymères au moment de l'appauvrissement en eau de la matrice cimentaire [Gemert 2004]. Ohama [Ohama 1998] propose un modèle d'interactions entre la matrice cimentaire et un latex (figure I.15). Quand le latex est mélangé au ciment, les particules de latex sont alors réparties de manière homogène dans la pâte. Durant l'hydratation, un gel de ciment hydraté se forme sur les grains de ciment anhydre et quelques particules de polymère se fixent sur ce dernier. Au fur et à mesure de l'hydratation, les particules de polymère encore dispersées sont de plus en plus confinées dans les pores capillaires. Plus l'eau est consommée, plus les particules de polymère coalescent pour former un film continu qui interpénètre la matrice cimentaire [Su 1996]. Putterman décrit un modèle similaire [Putterman 1999]. Ce modèle a été complété par Gemert [Gemert 2004] en précisant la chronologie des étapes dans le temps et en identifiant les différents composés formés. Juste après le mélange, les particules de ciment et de polymères sont dispersées dans l'eau, l'hydratation du ciment commence (figure I.15). Dans une seconde étape, une partie des particules de polymères se dépose sur la surface des grains de ciment et sur les granulats. Une partie du polymère peut coalescer pour former un film continu qui enveloppe partiellement ou totalement les grains de ciment. Ce recouvrement retarde partiellement ou complètement l'hydratation du grain. Dans une troisième étape, l'hydratation se poursuit, la floculation et la formation d'un film sont possibles si la cure est « sèche ». Cela influence l'hydratation et le

développement de la résistance au jeune âge. Dans la phase liquide, les hydrates précipitent, se combinent au polymère et des particules de celui-ci restent isolées dans la matrice. Dans la dernière étape, l'hydratation et la formation du film se terminent. Le film se forme au sein des hydrates au fur et à mesure que la quantité d'eau diminue dans les pores de la solution. C'est lors de cette phase que la plus grande partie de la déformabilité et de la résistance sont obtenues par le mortier [Gemert 2004] (figure I.15).

Les conditions de cure sont très importantes, les meilleures propriétés étant obtenues par une cure sèche suivie d'une cure humide. Cette cure permet aux particules de polymère restantes de compléter le film par une nouvelle floculation et une nouvelle coalescence [Ohama 1984].



**Figure I.15** - Modèle d'interactions entre la matrice cimentaire et un latex lors de l'hydratation du ciment d'un mortier modifié à base de latex [Gemert 2004]

Les latex diminuent le taux d'hydratation du ciment à cause de la dispersion du polymère et de son absorption, mais aussi à cause du système de stabilisation utilisé. Goto [Goto 2006] a étudié plusieurs latex (latex acrylique et éthylène/acétate entre autres) avec des stabilisations différentes dans une solution diluée de ciment [Goto 2006].

Les différents latex influent plus ou moins sur les périodes de germination et de croissance et sur le degré d'hydratation du ciment [Goto 2006] [Su 1996]. En effet, la teneur en portlandite diminue avec l'ajout de latex, ce qui peut être assimilé à une diminution de l'hydratation de la phase liante du matériau [Ollitrault 1998]. Par contre, avec une cure humide et une quantité adéquate de SBR, l'hydratation est accélérée et le taux d'hydratation augmente. Cela modifie

la nature et la stabilité de certains hydrates. L'ettringite formée est par exemple plus stable [Whang 2006]. Il est également à noter que selon le latex utilisé, l'hydratation peut être concurrencée par les produits de décomposition de ce dernier qui réagissent avec les ions calcium [Gomes 2005].

#### **I.4.2.2.2 Influence sur les propriétés du mortier frais**

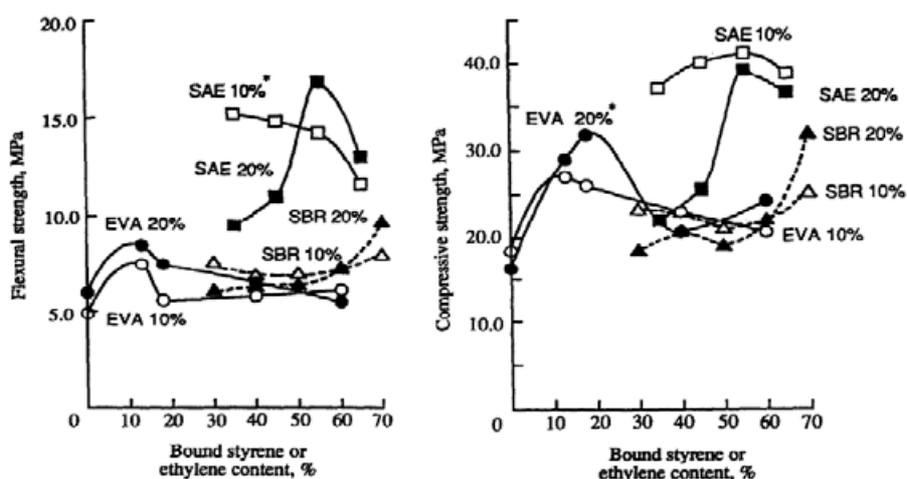
L'ajout de latex améliore la maniabilité du mélange ; le mortier nécessite alors moins d'eau pour une même consistance [Su 1995] [Barluenga 2004]. Le polymère lui-même ou le surfactant qui le stabilise réduit la ségrégation [Su 1995]. Le système de stabilisation (surfactant ou émulsifiant) a tendance à entraîner de l'air dans le mortier frais. Une quantité d'air excessive génère une réduction des valeurs de résistances. La proportion volumique d'air entraîné des mortiers modifiés latex se situe entre 5 et 20 % et celle des bétons modifiés latex autour de 2 % [Ohama 1998] [Su 1995]. Pour des pâtes de ciment, elle diminue avec l'augmentation du taux de latex [Chung 2004]. Les latex augmentent la rétention d'eau du fait des propriétés hydrophiles des particules colloïdales et du fait de la formation du film de polymère qui empêche le départ d'eau [Ohama 1998] [Capener 2004]. Cependant, vis-à-vis de l'évaporation, il semble que la présence de latex augmente plus ou moins la cinétique et la quantité d'eau évaporée selon le type de latex introduit. Le temps de début de prise est augmenté avec l'augmentation du rapport P/C (Polymère/ciment) [Pascal 2002].

#### **I.4.2.2.3 Influence sur les propriétés mécaniques**

Pour des pâtes de ciment, la ténacité et la résistance en flexion augmentent avec le taux de latex ajouté. Pour une même maniabilité, les résistances en flexion et en traction augmentent tandis que la résistance en compression reste identique à celle du mortier non adjuvanté. En revanche, si le rapport E/C est maintenu constant, les résistances diminuent [Shaker 1997] [Ohama 1998] [Pascal 2002] [Barluenga 2004] [Goto 2006]. La nature et le nombre de substituants ont une influence sur ces résistances. En général, plus la proportion de latex est grande, plus ces résistances sont élevées jusqu'à l'ajout d'une quantité seuil où cet effet est inversé (figure I.16). Les conditions de cure ont également une influence sur les résistances en flexion et en compression [Bertrand 2002].

Ces augmentations sont à relier à l'amélioration globale de la liaison entre les grains de ciment par le latex, à la formation du film de polymère et au pontage des micro-fissures par le polymère [Ohama 1998] [Shaker 1997] [Pascal 2002] [Jenni 2005]. Goto [Goto 2006] précise

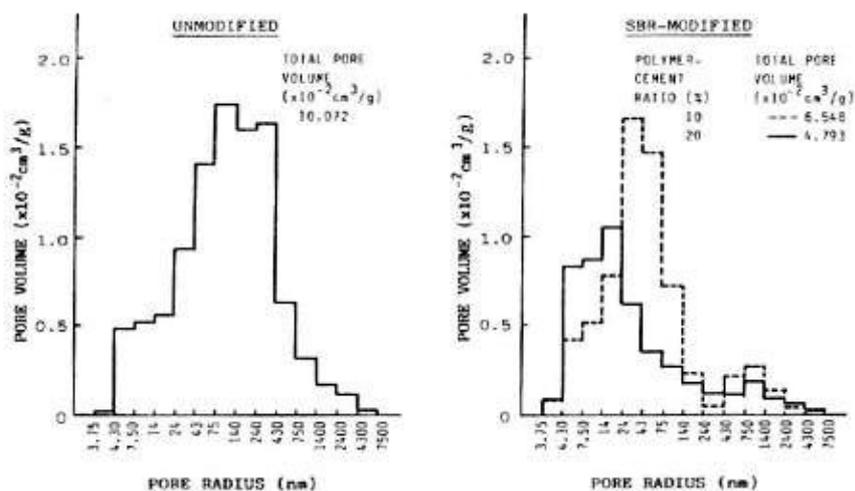
bien que les améliorations des propriétés mécaniques dépendent de la nature du latex et du système de stabilisation, du ciment, des granulats et des proportions du mélange (rapport P/C, rapport E/C, quantité d'air occlus par exemple). En général, la déformabilité des mortiers adjuvantés augmente et leur module d'élasticité diminue [Ohama 1998] [Barluenga 2004] [Goto 2006] [Do 2003].



**Figure I.16** - Résistance en flexion et en compression de mortiers modifiés latex [Ohama 1995]

#### I.4.2.2.4 Influence sur la porosité

Généralement, la porosité totale tend à diminuer avec une augmentation du rapport P/C [Ohama 1987]. Le nombre de pores de grande taille ( $> 0,2 \mu\text{m}$ ) diminue dans ces mortiers, contrairement au nombre de petits pores ( $< 75 \text{ nm}$ ) qui augmente considérablement (figure I.17) [Ohama 1987]. Ces deux points contribuent aux diminutions de la perméabilité et à la meilleure longévité des mortiers modifiés latex. Vallée observe que sur une pâte de ciment, la porosité totale diminue avec l'introduction de latex, mais que la distribution des pores n'est pas fondamentalement modifiée [Vallée 1999]. Selon cet auteur, le latex comble indifféremment toutes les catégories de pores. Avec un latex styrène-butadiène, pour un certain taux de polymère (P/C entre 7,5 et 10 % en masse), le volume apparent des pores capillaires diminue et la répartition des tailles des pores se décale vers les petits diamètres [Ohama 1987]; ce qui est également souligné par Pascal [Pascal 2002] ou Ollitrault [Ollitrault 1998].

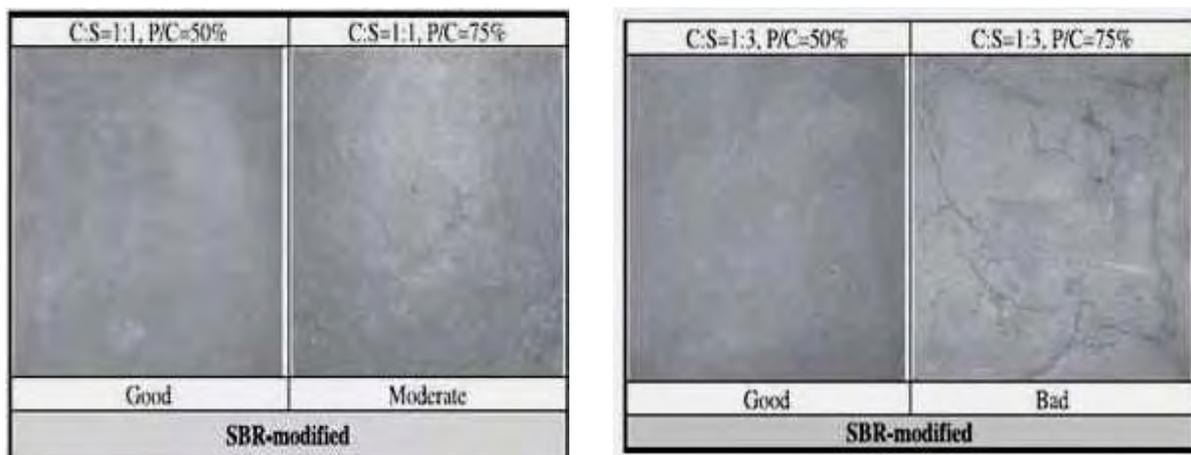


**Figure I.17** - Distribution porosimétrique d'un mortier en présence ou non de latex SBR  
[Ohama 1987]

#### I.4.2.2.5 Influence sur la fissuration

Les latex sont généralement incorporés aux mélanges cimentaires dans le but d'améliorer les caractéristiques des matériaux à l'état durci, en particulier leur comportement vis-à-vis de la fissuration, ce qui est très important dans le cas des applications de couches minces de mortier pour des travaux de réparation ou de finition [Yoshinobu 2006] [Do 2003]. Do [Do 2003] a évalué l'influence des plusieurs polymères sur la sensibilité à la fissuration de mortiers pour ragréage de sols. Pour cela, les mortiers sont appliqués sur un support en béton. Pour faciliter la mise en œuvre, un superplastifiant ainsi qu'un agent antimousse ont été incorporés au mélange. L'influence de la proportion de liant ainsi que le taux de polymère (P/C) a également été étudiée. La figure I.18 présente le cas du mortier adjuvanté avec un polymère SBR.

On remarque qu'indépendamment de la proportion de sable, un fort pourcentage de polymère SBR conduit à l'obtention des revêtements de moins bonne qualité ; il existerait donc un pourcentage seuil en polymère au-delà duquel les propriétés du matériau deviennent médiocres, notamment vis-à-vis de la fissuration. Ces observations ont également été faites par Ohama [Ohama 1998].



**Figure I.18** - Influence des pourcentages en polymère SBR et de sable sur la résistance à la fissuration des mortiers [Do 2003]

### I.5 La dessiccation des couches minces de mortier

Dès sa mise en œuvre et tout au long de sa période de durcissement, le mortier est sujet à une diminution de sa quantité d'eau libre qui subsiste dans le réseau poreux sous l'influence conjointe du milieu ambiant et du support sur lequel il est appliqué. Détriché et al. [Détriché 1983a] évaluent cette dessiccation comme étant le rapport de la perte en eau du matériau à chaque instant à sa quantité initiale d'eau de gâchage. Cette perte en eau  $\Delta E$  se compose le plus généralement d'une partie  $\Delta E_e$  due à l'évaporation, d'une partie  $\Delta E_a$  due à la perte par autodessiccation et d'une partie  $\Delta E_s$  due à la succion, en proportions variables. La quantité d'eau présente à chaque instant dans un volume élémentaire  $V$  de mortier entourant un point quelconque  $M$  de l'enduit peut donc s'écrire :

$$E(x, t) = E - [\Delta E_{e(x,t)} + \Delta E_{s(x,t)} + \Delta E_{a(x,t)}] \quad (\text{I.17})$$

où  $E$  est la quantité d'eau de gâchage supposée uniforme dans le matériau, les pertes en eau par évaporation  $\Delta E_e$ , par succion  $\Delta E_s$  et par autodessiccation  $\Delta E_a$  étant fonction du temps, mais aussi de la position du point considéré, repéré par sa distance  $x$  à la face libre.

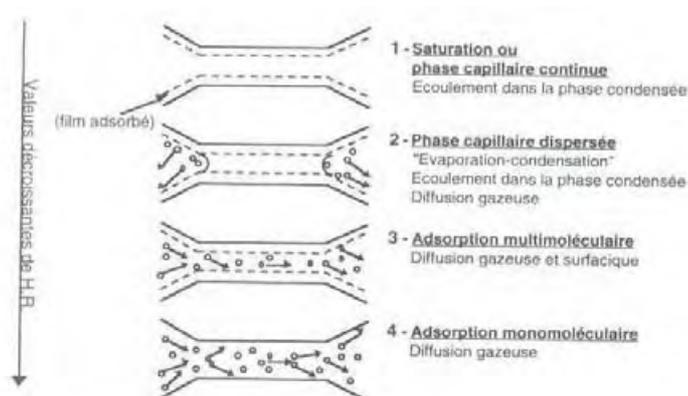
Dans le même sens, Grasley et al. [Grasley 2002] ainsi que Martinola et al. [Martinola 2001] montrent que si le mortier frais est placé dans une atmosphère non saturée, il perd une partie de son eau par évaporation suivant les faces exposées. Cette perte en eau est fortement dépendante du degré d'humidité relative du milieu environnemental et de la formulation du matériau [Bissonnette 1999].

### I.5.1 Influence du séchage

Les transferts d'humidité dans les matériaux cimentaires sont la conséquence du déséquilibre thermodynamique qui existe entre le milieu ambiant (qui est dans un état d'hygrométrie non saturé) et le volume du matériau (qui est initialement dans un état d'hygrométrie saturé). La prise en compte des transferts hydriques au sein du mortier est d'une grande importance du fait que la teneur en eau contenue dans le matériau affecte considérablement l'évolution des déformations (retrait et fluage). Le séchage s'effectue généralement de façon non uniforme entre la surface et le cœur du matériau et s'accompagne le plus souvent d'effets structuraux, du fait du gradient de déformations induit. Par conséquent, la connaissance des mécanismes de séchage s'avère primordiale [Granger 1997a] [Granger 1997b] [Benbou 2002].

#### I.5.1.1 Mécanismes du séchage

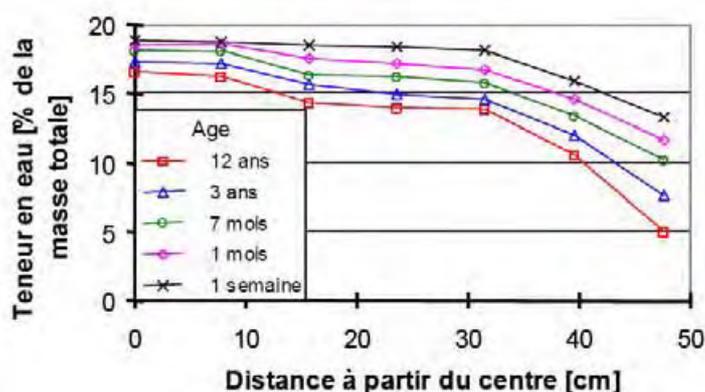
Juste après sa mise en œuvre, le matériau peut être considéré comme étant dans un état saturé. La phase liquide peut être considérée comme étant continue ; dans ce cas le transport de l'eau se fait de manière prépondérante sous forme d'un mouvement de liquide sous l'effet d'un gradient de pression capillaire. On parle dans ce cas d'écoulement 'capillaire' [Laurence 2001] [Baroguel 1994]. Cette phase ne dure que très peu de temps surtout si le matériau subit très tôt le phénomène de séchage [Détriché 1983b] [Tamin 1986]. La plupart du temps, la phase liquide est discontinue. De ce fait, il y a coexistence d'une phase gazeuse et d'une phase liquide engendrant ainsi deux modes de transport d'humidité. Le transport de l'eau se fait également sous forme vapeur par diffusion et ce de façon plus intense à mesure de la désaturation de l'espace poreux [Laurence 2001]. Pour des humidités relatives très basses, ce sont les transferts sous forme gazeuse qui prédominent. La figure I.19 donne une représentation simplifiée des transferts hydriques qui se produisent dans un matériau poreux [Baroguel 1994].



**Figure I.19** - Représentation schématique des mécanismes de transport de l'eau au sein de la pâte de ciment [Baroguel 1994]

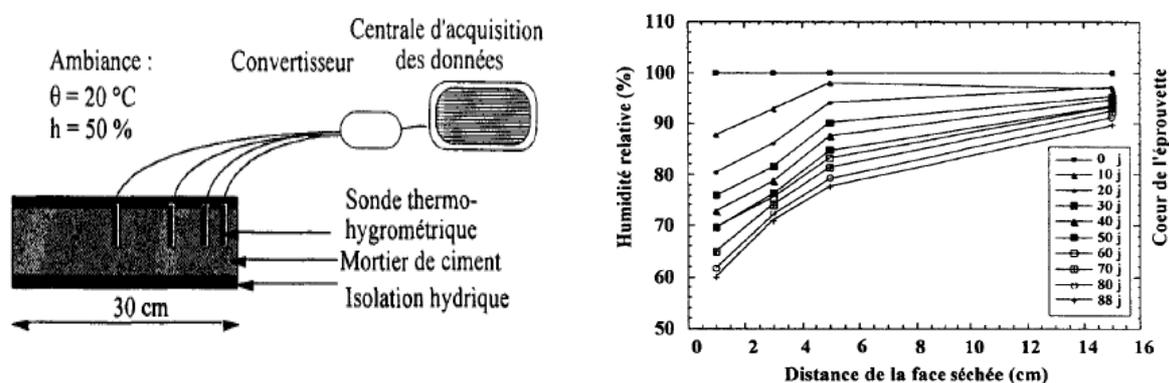
### I.5.1.2 Effet temporel et effet d'échelle

Le phénomène de séchage dans les matériaux cimentaires est très lent et il peut durer des siècles avant que l'équilibre hydrique entre la surface et le cœur du matériau ne soit atteint [Granger 1997a] [Torrenti 1997] [Acker 1990]. Cela va générer des gradients de teneur en eau depuis la surface vers le cœur du matériau. Acker et al. [Acker 1990] ont mesuré à l'aide de capteurs l'évolution de la teneur en humidité sur un bloc de béton imposant (prisme de dimension  $100 \times 100 \times 200$  cm) séchant de façon unidirectionnelle sur une longueur de 1 m, pendant 12 ans. On constate sur la figure I.20 une distribution fortement différentielle de la teneur en eau entre la surface et le cœur de du bloc de béton. Ainsi après 12 années de séchage l'équilibre hydrique est loin d'être atteint (voir figure I.20).



**Figure I.20** - Distribution de la teneur en eau dans l'éprouvette à différents âges d'après Acker et al. [Acker 1990]

Les mêmes constatations ont été faites par Khelidj et al. [Khelidj 1998] pour la caractérisation des gradients d'humidité sur une éprouvette cylindrique de béton soumise à un séchage unidirectionnel dans un local climatisé ( $20^{\circ}\text{C}$  et  $50\%$  H.R.). Les détails du dispositif expérimental et les profils en humidité relative sont présentés sur la figure I.21.

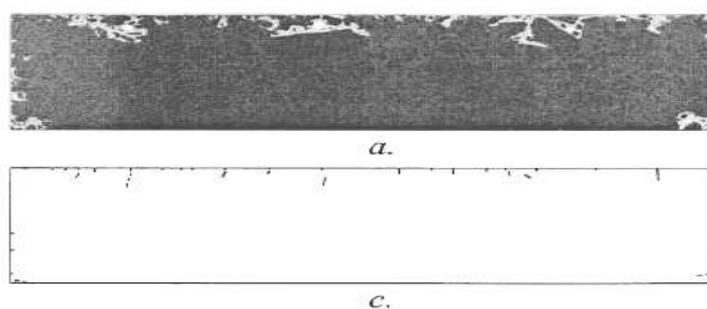


**Figure I.21** - Dispositif de mesure de l'humidité relative à différentes profondeurs dans le volume du matériau et évolution des profils d'humidité à différents âges d'après Khelidj et al. [Khelidj 1998]

On observe là également une distribution fortement différentielle de la teneur en humidité relative sur la hauteur de l'éprouvette, notamment au voisinage de la surface de séchage où les gradients sont assez significatifs.

### I.5.1.3 Conséquence sur la fissuration

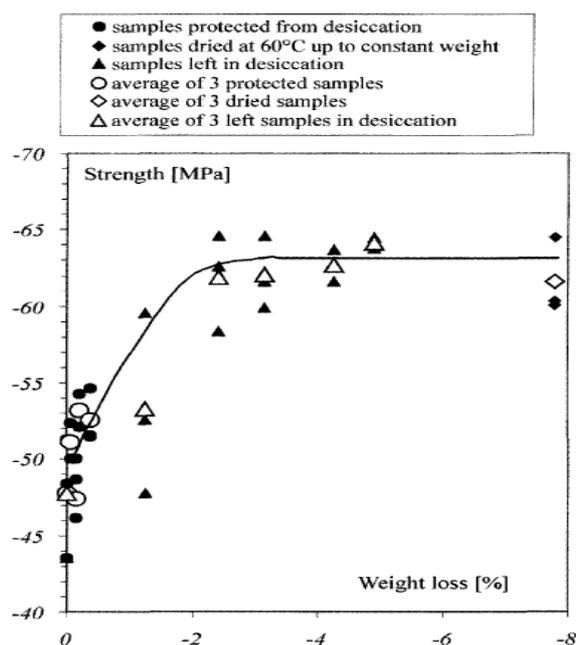
Les gradients de teneur en eau entre la surface de séchage et le cœur du matériau vont avoir pour conséquence le développement des déformations différentielles. Cela provoque une autorestriction de la déformation de retrait [Laurence 2001]. La surface de l'élément est soumise à des contraintes de traction, alors que le cœur est comprimé; cela peut provoquer une fissuration de peau [Granger 1997a]. Les observations au microscope optique à fluorescence et au microscope électronique à balayage (MEB) permettent d'observer la microstructure du matériau à différentes échelles d'observation [Granger 1997b] [Colina 2000]. L'analyse de répliques au MEB permet d'observer la micro-fissuration en peau d'éprouvette. Bisshop et al. [Bisshop 2002] ont observé la microstructure des éprouvettes de mortier soumises au séchage. Ces observations mettent en évidence l'existence de fissures induites par la dessiccation [Bisshop 2002]. Dans le cas des pièces massives, ces ouvertures peuvent atteindre plusieurs millimètres. L'ouverture des fissures induites par le séchage dépend fortement de l'amplitude du retrait et de la géométrie de la structure [Laurence 2001]. La technique des répliques permet ainsi d'observer une empreinte protégée par un film en plastique insensible au vide du MEB (Voir figure I.22).



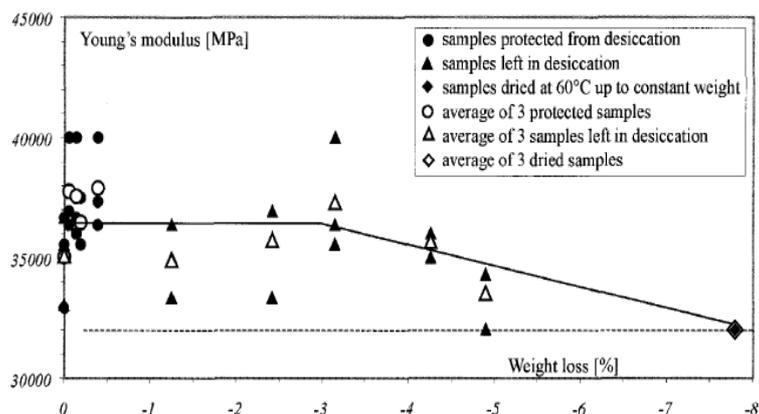
**Figure I.22** - Microfissures induites par la dessiccation observée au microscope (MEB) par Bisshop et Van Mier [Bisshop 2002]

### I.5.1.4 Conséquence sur les propriétés mécaniques

La fissuration induite par la dessiccation du mortier peut être à l'origine de la diminution de ses propriétés mécaniques telles que la résistance mécanique (compression et traction), ou le module d'Young [Yurtdas 2004] [Colina 2002] [Yssorche 1995]. D'après Benboudjema [Benbou 2002], les mesures expérimentales de ces propriétés sont sensibles aux conditions de conservation hydrique de l'éprouvette. D'après Xi et al [Xi 1994], la fissuration induite par le séchage peut avoir des effets d'inhibition de l'hydratation au jeune âge qui peut s'accompagner d'une diminution des propriétés mécaniques. Yurtdas et al. [Yurtdas 2004] ont évalué les effets du séchage sur le comportement mécanique d'un mortier ordinaire. Les auteurs concluent que sous l'effet du séchage, les résistances en compression augmentent (voir figure I.23) et dans le même temps, le module d'Young ainsi que le coefficient de poisson diminuent considérablement avec la perte de masse (voir figure I.24). Les tests sont effectués sur des échantillons soit soumis au séchage, soit protégés contre la dessiccation, soit conservés dans l'eau.



**Figure I.23** - Influence du séchage sur la résistance en compression d'un mortier d'après Yurtdas et al. [Yurtdas 2004]



**Figure I.24** - Influence du séchage sur le module d'Young d'un mortier d'après Yurtdas et al. [Yurtdas 2004]

### I.5.2 Influence du support sur la dessiccation

Les travaux effectués par Détriché et al. [Détriché 1983b] montrent que la nature ainsi que l'état hydrique du support sur lequel est appliqué le mortier d'enduit ont une grande influence sur la dessiccation. Ici le phénomène d'absorption d'eau par le support est mis en avant. Le mortier est appliqué sur six supports de différentes natures dont cinq sont poreux et un seul est non poreux.

Le mortier étudié possède les caractéristiques suivantes : un rapport pondéral ciment/sable de (1/3) ; et un dosage en ciment (CPA 55 R) de 500 kg/m<sup>3</sup> de sable sec.

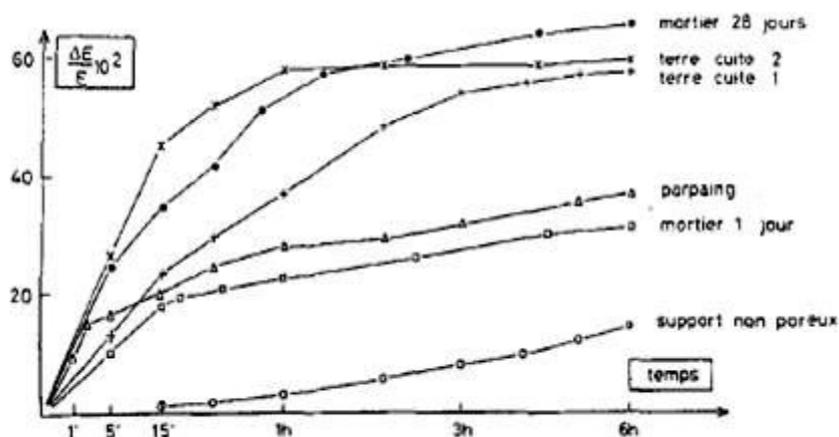
Les supports poreux non saturés utilisés sont les suivants :

- deux terres cuites de référence TC1 et TC2 (diamètres moyens des capillaires respectivement égaux à 0,26 et 2,5 μm);
- deux échantillons de mortier de rapport ciment/sable = 1/3 âgé de 1 et 28 jours au moment du contact;
- un échantillon prélevé dans un aggloméré de ciment.

Les courbes donnant les pertes de masse relatives des différents systèmes bicouches en fonction du temps sont données sur la figure I.25. On constate que :

- la dessiccation totale du mortier est plus importante en présence d'un support poreux, comparé à un support non poreux, sans doute à cause de l'influence combinée des phénomènes de séchage et de succion.

- les supports à gros capillaires (parpaing, TC2) provoquent des dessiccations initiales importantes comparées aux supports à capillaires fins. Cette dessiccation s'atténue avec le temps.
- la perte en eau progresse davantage au contact des supports à capillaires les plus fins (TC1 et mortier à 28 jours); en effet les cinétiques des pertes de masses sont importantes dans le temps.
- En ce qui concerne les supports constitués par un mortier, les courbes observées découlent du fait que le vieillissement du mortier s'accompagne d'une diminution du diamètre de ses capillaires par progression de l'hydratation et du séchage du matériau.



**Figure I.25** - Dessiccation du mortier au contact de divers supports  
[Détriché 1983a]

En conclusion, la dessiccation initialement intense au contact des supports à gros capillaires progressera peu par suite de la diminution rapide du nombre de capillaires de rayon inférieur au rayon moyen des pores du mortier.

La présence d'un support poreux a pour effet l'absorption d'une fraction de l'eau de gâchage. Cela a pour conséquences la diminution de la part de la dessiccation par évaporation et une augmentation de la perte en eau totale. Enfin, plus la couche de mortier est mince, plus la part de la succion dans la dessiccation finale est grande et plus la dessiccation s'effectue tôt. Lorsque l'épaisseur de la couche augmente les départs d'eau sont retardés; ils s'effectuent alors en plus grande partie dans le matériau au cours de son durcissement [Détriché 1983b].

## I.6 Les variations dimensionnelles et les techniques de mesure

Même en l'absence de chargements mécanique, les matériaux cimentaires manifestent des variations dimensionnelles. Celles-ci sont le résultat de phénomènes tels que :

- la diminution de la quantité d'eau initiale à cause des phénomènes de dessiccation (évaporation de l'eau libre et succion capillaire) qui se manifestent dès la mise en œuvre du matériau sous certaines conditions extérieures comme la température ou l'hygrométrie extérieure [Détriché 1983a] [Torrenti 1997].
- l'avancement de l'hydratation qui a pour conséquence, en plus du dégagement de chaleur, l'augmentation progressive des résistances mécaniques due à la structuration progressive de la pâte de ciment, donc l'autodessiccation du fait de la diminution de l'humidité relative dans le réseau [Baroguel 1999].
- le fluage qui se manifeste au jeune âge par le phénomène de relaxation des contraintes dans les zones les plus sollicitées [Granger 1997b] [Benbou 2002] [Sellier 2006].

Ces variations dimensionnelles se manifestent par des augmentations ou des diminutions des dimensions des pièces (ouvrées). Tous ces phénomènes engendrent des contraintes dans la couche de mortier [Sabathier 2004] [Weiss 1999]. Ainsi le comportement mécanique d'une couche de mortier peut être décrit à tout moment par la notion de déformation totale qui traduit l'état du système vis-à-vis des sollicitations mécaniques, de retrait, thermiques, de fluage et de relaxation des contraintes. Cette déformation totale s'exprime de la manière suivante [Martinola 2001] [Grasley 2002].

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_R(t) + \varepsilon_{El}(t) + \varepsilon_{fl,RI}(t) + \varepsilon_{Th}(t) \quad (I.18)$$

avec :

$\varepsilon_R$  : déformation engendrée par le retrait ou le gonflement hygrométrique,

$\varepsilon_{El}$  : déformation élastique instantanée,

$\varepsilon_{fl,RI}$  : déformation différée due au fluage, généralement concomitant au phénomène de relaxation des contraintes dans le matériau lorsque le retrait est empêché,

$\varepsilon_{Th}$  : déformation générée par les variations thermiques.

### I.6.1 Les variations dimensionnelles endogènes

Les variations dimensionnelles en condition endogène sont celles qui se produisent sans échange d'humidité avec le milieu extérieur. Les principaux mécanismes qui gouvernent ces phénomènes sont la contraction 'Le Chatelier', le retrait thermique et le retrait d'autodessiccation [Mitani 2003].

#### I.6.1.1 La contraction "Le Chatelier "

La contraction Le Chatelier désigne la diminution de volume du matériau due à la formation d'hydrates. En effet, lors de l'hydratation du ciment le volume absolu des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes de l'eau et du ciment anhydre consommés lors des réactions d'hydratation, provoquant ainsi une diminution du volume absolu occupé par les phases liquide et solide.

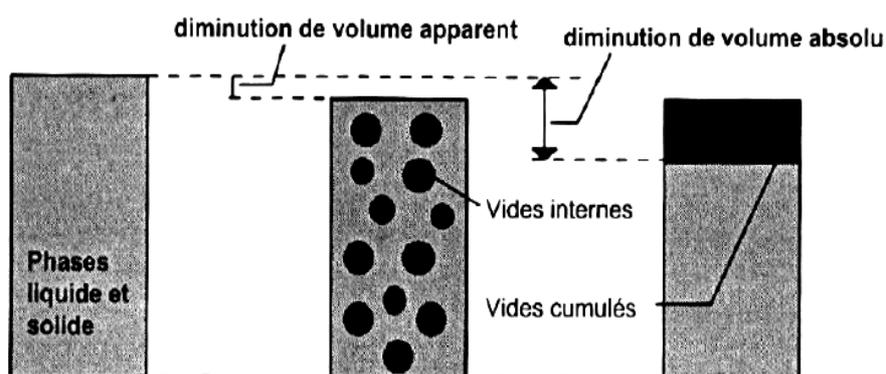


Figure I.26 - Présentation des volumes apparent et absolu [Garcia 2001]

#### I.6.1.2 Le retrait endogène

La formation des hydrates nécessite de l'eau qui, initialement, occupe l'espace poreux du système eau-ciment anhydre. Au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit, l'eau se raréfie dans les pores capillaires, et le volume qu'occupait l'eau liquide est progressivement remplacé par un gaz dont la pression diminue faisant ainsi apparaître des interfaces liquide-gaz (ménisques), ce qui provoque la mise en compression du squelette solide donc son raccourcissement. Il y a donc séchage interne du matériau [Baroguel 1999] [Hua 1995].

### **I.6.1.3 Le retrait thermique endogène**

Les réactions d'hydratation étant exothermiques, celles-ci s'accompagnent d'un dégagement de chaleur important qui peut provoquer dès le début de prise une dilatation alors que le matériau est encore déformable. Cette chaleur se dissipe au fur à mesure de l'avancement de l'hydratation entraînant le refroidissement du matériau. Ce retour du matériau à la température ambiante a pour conséquences le développement des contraintes dans le volume du matériau à mesure que celui-ci se contracte [Bernard 2002].

### **I.6.2 Les variations dimensionnelles en condition de séchage**

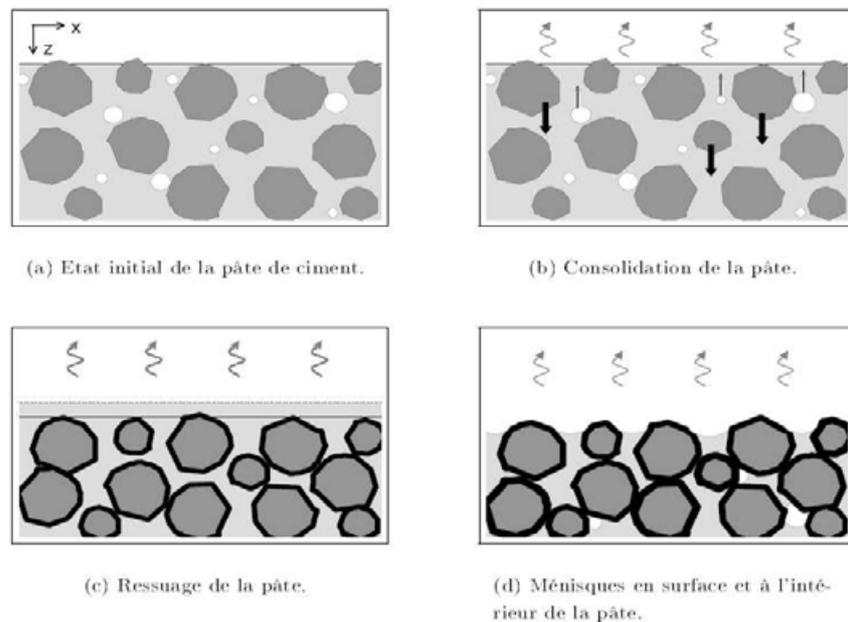
Les variations dimensionnelles en condition de séchage sont celles qui se produisent avec un échange d'humidité avec le milieu extérieur. Sous l'effet du séchage, la teneur en eau du réseau poreux d'un matériau cimentaire diminue au cours du temps, s'accompagnant alors d'une contraction du squelette solide. C'est le phénomène de retrait hydrique qui a lieu à l'état frais comme à l'état durci [Sabathier 2004] [Détriché 1983a] [Sakata 1983]. Les variations dimensionnelles liées aux changements de l'état hydrique du matériau comprennent : le retrait plastique avant et pendant la prise, le retrait d'autodessiccation et le retrait de séchage après la prise.

#### **I.6.2.1 Le retrait plastique**

Le retrait plastique est défini comme la contraction du béton en phase plastique consécutive au séchage. Le mécanisme du retrait plastique est décrit par plusieurs auteurs [Turcry 2004] [Détriché 1983b] [Mokarem 2002]. Avant la prise, une partie de l'eau du mortier frais peut s'évaporer ou être absorbée par le support. Ce départ d'eau génère des tensions capillaires dans le matériau qui se traduisent par une réduction du volume occupé par la pâte, c'est le retrait plastique. Il se produit lorsque le flux d'eau évaporée au niveau de la surface est supérieur au flux d'eau ressuée, ceci se produit surtout au moment de la pré-prise où l'on observe une nette diminution du ressuage [Laurence 2001]. Le mécanisme du retrait plastique d'une pâte de ciment est schématisé sur la figure I.27.

Le départ d'eau génère des tensions capillaires dans le matériau qui se traduisent alors par une diminution de volume qui peut conduire à une fissuration précoce (fissuration de peau), d'autant plus qu'avant la prise, le mortier (d'enduit) n'a pas encore développé une grande résistance à la traction. Les fissures de retrait plastique sont peu profondes. La durée de ce retrait est d'autant plus courte que l'autodessiccation est rapide, parce que l'hydratation crée

des produits solides qui augmentent la consistance de la pâte et diminuent la connectivité de la phase liquide [Mokarem 2002]. Pour limiter le retrait plastique, une solution consiste à avoir recours à des adjuvants rétenteurs d'eau comme l'usage des éthers de cellulose [Sabathier 2004].



**Figure I.27** - Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment [Turcry 2004]

### I.6.2.2 Le retrait de carbonatation

Lors de la réaction de carbonatation, les composés calciques issus de l'hydratation, principalement la Portlandite, réagissent avec le dioxyde de carbone de l'air pour donner du carbonate de calcium et de l'eau conformément au schéma réactionnel simplifié suivant :



La transformation cristallographique de la Portlandite en calcite s'accompagne d'une légère diminution du volume. La carbonatation agit surtout en surface à cause de la présence de gaz carbonique dans l'air [Mitani 2003]. La réaction de carbonatation varie avec l'humidité du matériau (l'optimum de la cinétique de carbonatation se trouve aux alentours de 65%) [Baron 1982] [Baron 2002]. La diffusivité peut aussi être influencée par la présence de fissures.. Dans la plupart des cas, ce retrait est négligeable voire nul [Feron 2002].

### **I.6.2.3 Le retrait thermique exogène**

En général dans le cas d'applications de couches minces de mortier, la chaleur d'hydratation au jeune âge a un effet limité car les épaisseurs concernées permettent une dissipation rapide de cette chaleur. Ce sont plus les variations de température extérieure qui ont une incidence importante [Détriché 1983b] [Sabathier 2004]. La différence de coefficient de dilatation thermique entre l'enduit et le support joue aussi un rôle important sur le comportement en place du matériau. De grands écarts de températures au cours de l'année et des changements brusques et importants peuvent ainsi causer la dégradation prématurée des structures réparées [Buffo 2007] [Sabathier 2004] [Laurence 2001].

### **I.6.2.4 Le retrait de séchage et les mécanismes physiques associés**

Le retrait de séchage est lié au départ de l'eau libre du matériau cimentaire par évaporation. Ce départ cause un déséquilibre dans le matériau qui se traduit alors par un retrait [Laurence 2001] [Adnan 2007] [Weiss 1999]. Ce retrait fait intervenir les différents états de l'eau, liquide et gazeux [Acker 1988] [Baroguel 1994]. Selon la nature de l'eau évaporée, un mécanisme spécifique à chaque type d'eau va engendrer une partie du retrait de dessiccation de la matrice. Donc le retrait de séchage (en phase durcie) est la conséquence du départ d'eau vers l'extérieur par évaporation ce qui fait décroître l'humidité interne dans le volume du matériau. Il dépend des conditions d'ambiance et des conditions d'exposition à cette ambiance ainsi que de la vitesse de migration de l'eau par diffusion dans le réseau poreux [Mokarem 2002] [Détriché 1983b] [Granger 1997a].

Au départ, juste après sa mise en œuvre, le matériau est considéré comme étant dans un état saturé. Progressivement, la quantité d'eau présente initialement dans les pores diminue ayant pour conséquence la déformation du squelette solide. Les mécanismes de retrait de séchage sont intimement liés aux différentes formes de l'eau dans la pâte de ciment [Tamin 1986] à savoir l'eau des capillaires, l'eau absorbée et l'eau des micropores.

De nombreux auteurs ont décrit les modèles de mécanismes qui gouvernent le retrait de séchage des matériaux cimentaires [Powers 1968] [Wittmann 1982] [Young 1988]. Toutefois, le retrait de dessiccation ne résulte pas d'un mécanisme unique, mais plutôt de la combinaison de plusieurs mécanismes [Benbou 2002] [Gallias 1982].

- La dépression capillaire (voir figure I.28): elle résulte de l'équilibre liquide- vapeur dans la porosité capillaire du matériau. La variation de la dépression capillaire est décrite par les lois de Kelvin et Laplace.

$$p_l - p_v = \frac{RT}{Mv} \ln(H) \quad (\text{Kelvin}) \quad (\text{I.20})$$

$$p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta \quad (\text{Laplace}) \quad (\text{I.21})$$

avec :  $\sigma$  = tension superficielle à l'interface liquide/vapeur

$p_l$  = pression dans le liquide

$p_v$  = pression dans la phase gazeuse

$\theta$  = angle de mouillage

$r$  = rayon du pore qui contient le ménisque d'eau

$v$  = Volume massique de l'eau

$M$  = masse molaire de l'eau

$R$  = constante des gaz parfaits

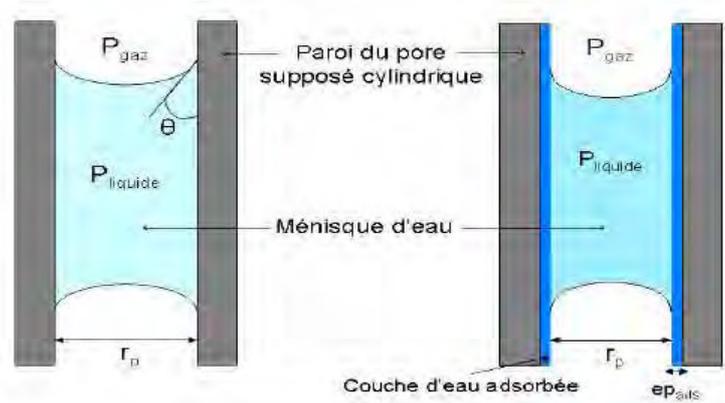
$T$  = température

$H$  = humidité relative

Ce mécanisme s'appuie sur l'apparition de ménisque à l'interface des phases eau liquide – vapeur au sein de la porosité capillaire. D'après plusieurs auteurs, la distribution des pores aurait une influence importante sur le retrait de dessiccation. Ainsi dans un état d'hygrométrie intermédiaire, il existe un rayon d'accès de pore  $r_a$  au dessous duquel tous les capillaires d'un rayon inférieur à  $r_a$  sont remplis d'eau, alors que tous les capillaires ayant un rayon supérieur à  $r_a$  sont vides. Cela aurait pour effet le développement des tensions dans la phase liquide et la mise en compression du squelette solide.

- La pression de disjonction : elle se développe dans les zones où l'adsorption d'eau se trouve gênée. C'est le résultat de la combinaison des forces de Van Der Waals, des forces d'interaction de la double couche électrique due aux variations de l'hygrométrie ambiante et de forces structurales [Lura 2003] [Hua 1995].

- Le mécanisme de variation de la tension superficielle du squelette solide du fait de la dissymétrie des forces d'attraction que subissent les atomes au voisinage de la surface se traduisant ainsi par une variation dimensionnelle du squelette solide. Ce mécanisme croît sensiblement avec la surface spécifique du matériau [Lura 2003] [Hua 1995].

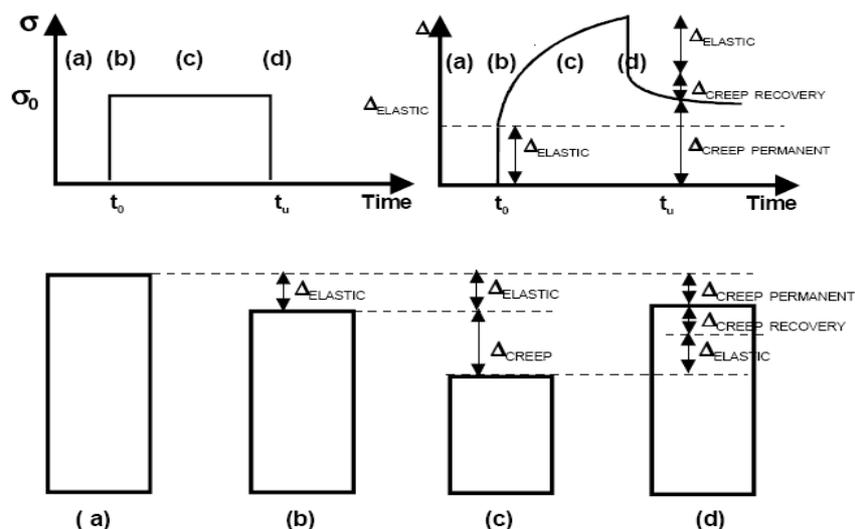


**Figure I.28** - Schéma simplifié du ménisque et de couche d'eau adsorbée dans un pore capillaire d'après Monge [Monge 2007]

### I.6.3 Le fluage et la relaxation des contraintes dans la couche d'enduit

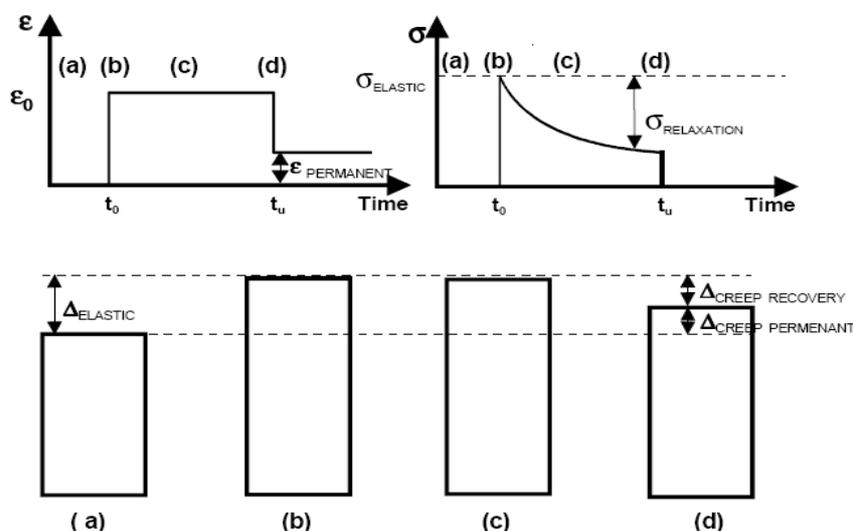
Le phénomène de fluage se manifeste surtout lorsque le matériau est soumis à des variations dimensionnelles empêchées. Les matériaux à base cimentaire présentent un comportement viscoélastique [Weiss 1999] [Bissonnette 1995] [Pigeon 2003]. Lorsqu'ils sont soumis à une contrainte soutenue, leur déformation initiale résultante est désignée par déformation instantanée et si la contrainte est maintenue, la déformation augmente avec le temps. Le fluage est donc défini comme la déformation différée que subit le matériau sous charge constante au-delà de la déformation instantanée [Benbou 2002].

Le principe du phénomène de fluage est illustré sur la figure I.29 [Weiss 1999].



**Figure I.29** - Schématisation du phénomène de fluage d'après Weiss [Weiss 1999]:  
 (a) Longueur initiale, (b) Déformation élastique, (c) Déformation de fluage, (d) Déformation permanente de fluage après déchargement

Le principe du phénomène de relaxation des contraintes est également illustré sur la figure I.30 [Weiss 1999].



**Figure I.30** - Schématisation du phénomène de relaxation des contraintes d'après Weiss [Weiss 1999]:  
 (a) Longueur initiale, (b) Déformation élastique, (c) Déformation attribuée à la relaxation,  
 (d) Déformation permanente de fluage après déchargement

Dans les conditions où il n'y a pas d'échanges hygrométriques ou thermiques, on parle de fluage propre. Dans le cas contraire, on considère que le retrait de séchage se superpose au fluage [Bissonnette 1995]. Le fluage est alors défini comme la différence entre la déformation totale et la déformation due au retrait d'un échantillon identique conservé dans les mêmes conditions et non chargé. Le supplément de fluage observé lors du séchage est appelé fluage de séchage.

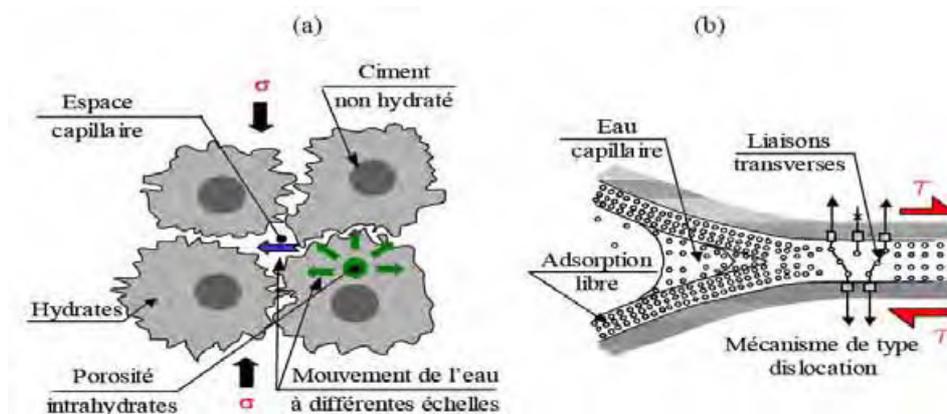
Dans le cas des travaux de rechargements minces, le fluage peut s'avérer bénéfique en soulageant les contraintes induites par les variations dimensionnelles empêchées [Bissonnette 1995]. Le fluage augmente la capacité de déformation du matériau de rechargement ce qui lui permet de mieux s'adapter aux conditions d'exposition.

Benboudjema [Benbou 2002] décrit dans sa thèse les différents mécanismes qui gouvernent le fluage. Dans tous les cas, l'eau apparaît comme étant le mécanisme moteur à l'origine du fluage. Ainsi, le fluage propre et le fluage de séchage à long terme, peuvent être tous les deux décomposés en deux parties, sphérique et déviatorique [Sellier 2006].

- Le fluage à court terme serait gouverné par la migration de l'eau absorbée dans la porosité capillaire [Benbou 2002] [Monge 2007].

- Le fluage à long terme serait généré par le glissement entre les feuillets de C-S-H [Ulm 1999] [Benbou 2002].

Le schéma illustrant les deux phénomènes est représenté sur la figure I.31.



**Figure I.31** - Mécanisme de fluage (a) à court terme et (b) à long terme proposé par Ulm et al. [Ulm 1999] représenté par Benboudjema [Benbou 2002]

#### I.6.4 Les techniques de mesure des variations dimensionnelles

Plusieurs auteurs dans leurs travaux ont largement présenté les méthodes de mesure permettant d'accéder aux déformations des matériaux cimentaires. Parmi elles on peut citer les méthodes de mesures volumiques et les méthodes de mesure linéiques.

##### I.6.4.1 Les mesures volumiques

Les mesures volumiques sont généralement employées pour la quantification des variations dimensionnelles des matériaux cimentaires en conditions endogènes [Mitani 2003] [Hammer 2006] [Justness 1996] [Loukeli 1999].

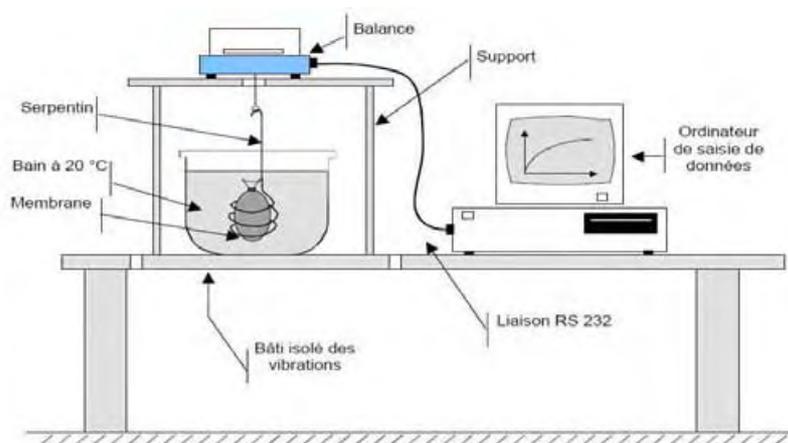
Au cours de leurs travaux Justness et al. [Justness 1994] ont conçu un dispositif expérimental permettant de caractériser les matériaux cimentaires vis-à-vis des variations volumiques en conditions endogènes aux jeunes âges. Le principe de ces mesures consiste à enregistrer les variations dimensionnelles d'un échantillon de pâte de ciment isolé du milieu extérieur par une membrane souple étanche, plongée dans un liquide thermostaté. La mesure se fait soit par suivi du niveau du liquide d'immersion (évoqué précédemment), soit par pesée hydrostatique. Un dispositif basé sur le même principe est proposé par Mitani [Mitani 2003] dans ses travaux de thèse (voir figure I.32).

Pour l'exploitation des mesures, la réduction de volume de l'éprouvette à un instant  $t$  peut s'exprimer par la relation suivante :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{(m_{eau(t)} - m_{eau(0)})}{(m_{air} - m_{eau(0)})} \quad (I.22)$$

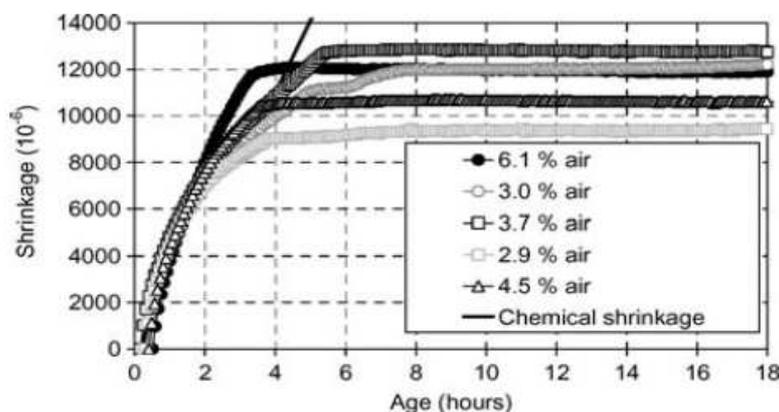
avec :

- $V_0$  le volume initial de l'éprouvette
- $\Delta V$  la réduction de volume de l'éprouvette à l'instant  $t$ ,
- $m_{eau(t)}$  la masse de l'éprouvette dans l'eau à l'instant  $t$ ,
- $m_{eau(0)}$  la masse de l'éprouvette dans l'eau au début de la manipulation,
- $m_{air}$  la masse de l'éprouvette dans l'air au début de la manipulation



**Figure I.32** - Banc de mesure des variations volumiques par pesée hydrostatique utilisé par Mitani [Mita 2003]

Se basant sur ce principe, Hammer et al. [Hammer 2006] ont mesuré l'évolution des variations dimensionnelles volumiques dans une pâte de ciment classique (CEM 1 42,5R) avec un rapport eau/ciment=0,35 contenant un agent entraîneur d'air. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure I.33.



**Figure I.33** - Déformations mesurées en conditions endogènes d'une pâte de ciment contenant un entraîneur d'air [Hammer 2006]

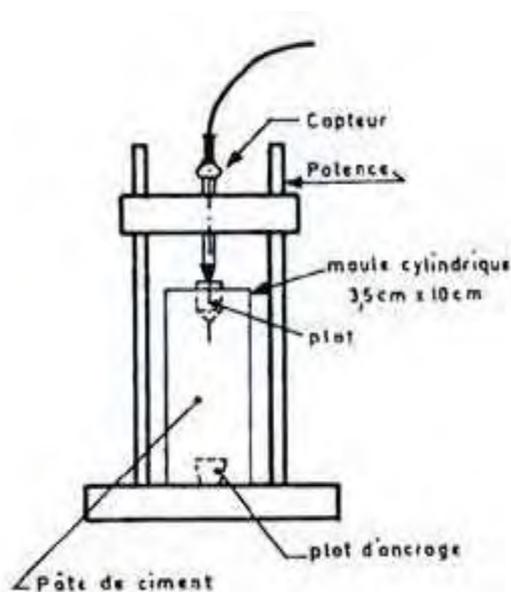
### I.6.4.2 Les mesures linéiques

Les mesures linéiques ont fait et font l'objet d'études de la part de plusieurs chercheurs. Le principe de cette mesure consiste à enregistrer les variations dimensionnelles d'une éprouvette dans une direction donnée. Les mesures peuvent être effectuées sur matériau durci [Baroguel 1994] [Kamen 2006], ou sur matériau frais ; on parle souvent dans ce cas de retrait en phase plastique [Turcry 2004].

#### I.6.4.2.1 Les mesures sur matériau à l'état durci

Les éprouvettes sont placées dans un moule rigide, totalement protégées de la dessiccation et conservées dans une ambiance saturée pour subir une cure humide puis démoulées au bout de 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont soit recouvertes de papier aluminium autocollant pour les protéger de la dessiccation (déformations endogènes) soit exposées aux conditions hygrométriques du milieu ambiant (déformations totales). La figure I.34 montre un exemple d'outil de mesure [Lura 2003] [Buil 1979].

La longueur au moment du démoulage est prise comme longueur de référence [Baroguel 1994].



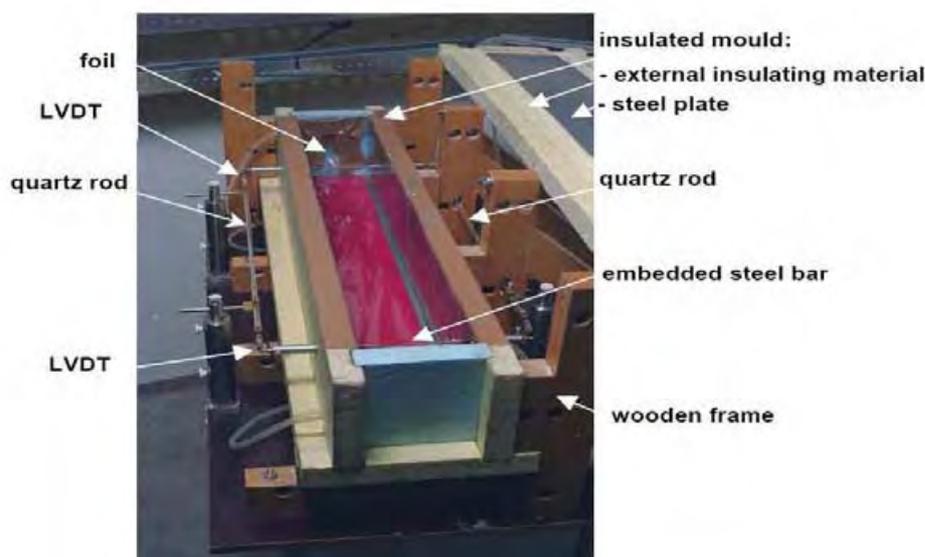
**Figure I.34** - Dispositif expérimental utilisé pour la mesure des déformations des matériaux cimentaires en phase durcie [Buil 1979]

#### I.6.4.2.2 Les mesures sur matériau depuis l'état frais

La mesure des déformations linéaires du matériau à l'état frais est généralement réalisée en plaçant l'échantillon dans un moule rigide et en minimisant les frottements. Suivant les cas,

l'éprouvette peut soit être totalement protégée contre la dessiccation, les déformations mesurées correspondent dans ce cas au retrait endogène total (phase plastique et phase durcie) soit libre de sécher sur une ou plusieurs faces, les déformations mesurées correspondent dans ce cas au retrait total du matériau. Le suivi des déformations peut se faire soit dans la direction principale de séchage, soit dans une autre direction.

Deux approches sont généralement utilisées selon que le dispositif de mesure est en contact ou non de l'éprouvette. La première utilise en général des capteurs de déplacement de type LVDT [Jensen 1995]. Les variations dimensionnelles sont alors mesurées au moyen de capteurs solidaires de tiges qui sont directement noyées dans le matériau [Lura 2003] [Turcry 2004] [Détriché 1983b]. La figure I.35 montre un exemple d'outil de mesure basée sur les capteurs LVDT [Lura 2003].



**Figure I.35** - Dispositif expérimental pour la mesure des variations dimensionnelles endogènes [Lura 2003]

La seconde exploite des mesures indirectes en utilisant par exemple la réflexion des ondes électriques, des ondes magnétiques ou des capteurs lasers. Ainsi Brad [Brad 2005] a utilisé un dispositif de mesure des variations dimensionnelles basée sur l'emploi des capteurs lasers. Le principe de la mesure est présenté sur la figure I.36.

Cependant pour ces types de mesures (directes ou indirectes), une attention particulière doit être apportée par exemple au contact entre les points ou les instruments de mesure et l'échantillon, ainsi qu'au frottement du mortier sur le moule [Adnan 2007] [Turcry 2004].

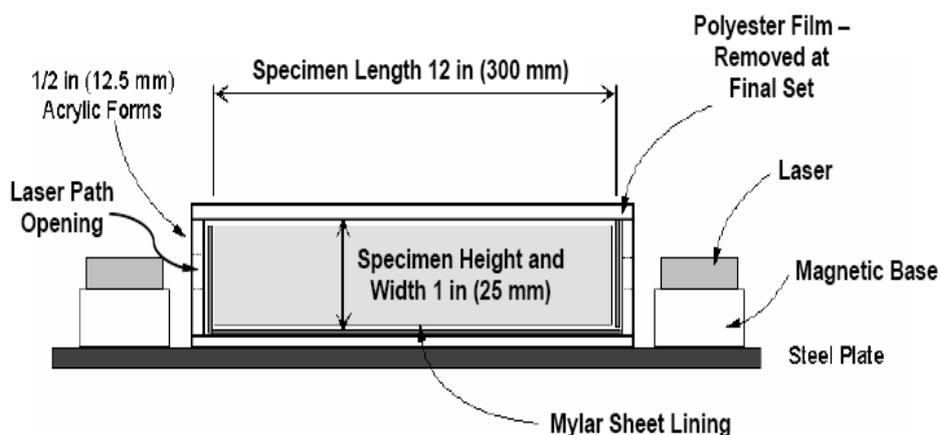


Figure I.36 - Dispositif expérimental utilisé par Brad [Brad 2005]

### I.6.5 Les variations dimensionnelles en conditions empêchées

Dans les applications de mortier en couche mince, le matériau est mis en œuvre au contact d'un support le plus souvent poreux. Dans ce cas le matériau ne peut plus se déformer librement au cours de sa maturation [Weiss 1999] [Banthia 1996] [Bentur 2003]. Cette adhérence au support a pour conséquence le développement de contraintes (généralement de traction) dans la couche du mortier pouvant entraîner la fissuration [Bernard 2002] [Bernard 2003] [Laurence 2001]. Ces sollicitations de traction subissent un effet différé (principalement aux jeunes âges) ayant pour effet la diminution des contraintes générées par la gêne du support, ce qui est bénéfique pour le matériau [Molez 2003]. Il s'agit ici de la relaxation des contraintes [Bissonnette 1995] dont l'amplitude dépend fortement des conditions de cure, de la formulation, de l'âge du chargement et du niveau de charge [William 2007].

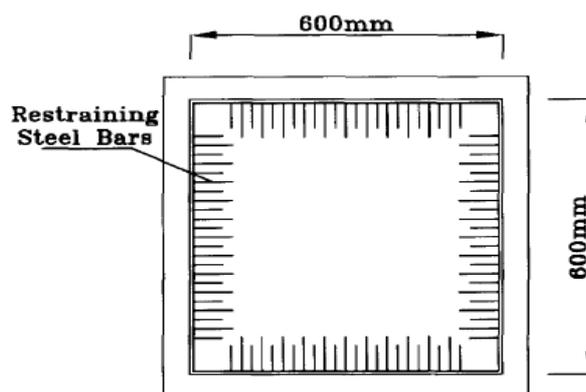
En laboratoire, les performances d'un matériau cimentaire vis-à-vis de la fissuration méritent une attention particulière. En effet, celles-ci ne peuvent pas être évaluées efficacement sur la base d'analyse des variations dimensionnelles en l'absence d'un support adhérent [Bissonnette 1995]. Face à cette difficulté, plusieurs auteurs ont développé des outils de mesure permettant de prendre en considération, en plus des variations dimensionnelles obtenues, les effets différés générés par les phénomènes de fluage et de relaxation des contraintes [Bentur 2003] [Grasley 2002].

#### I.6.5.1 Essais surfaciques

Les essais surfaciques permettent d'évaluer l'aptitude du matériau à se déformer lorsqu'il est appliqué sur un support qui lui impose une restriction dans le plan. Dans ce cas, le blocage

peut se faire soit sur les bords, soit en fond de moule par l'intermédiaire d'un frottement uniforme généré par un support rigide avec une surface de contact rugueuse ou crantée [Yokoyama 1994] [Banthia 1993].

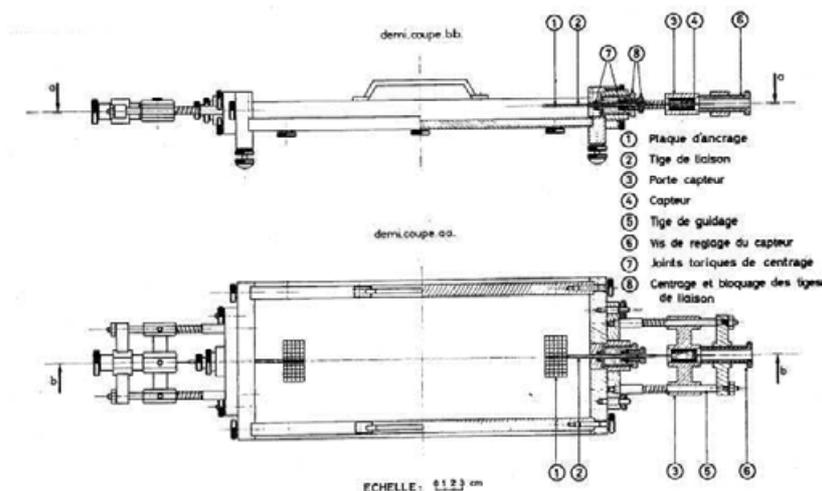
Un exemple de dispositif d'essai du retrait empêché sur plaque est présenté sur la figure I.37 [Yokoyama 1994].



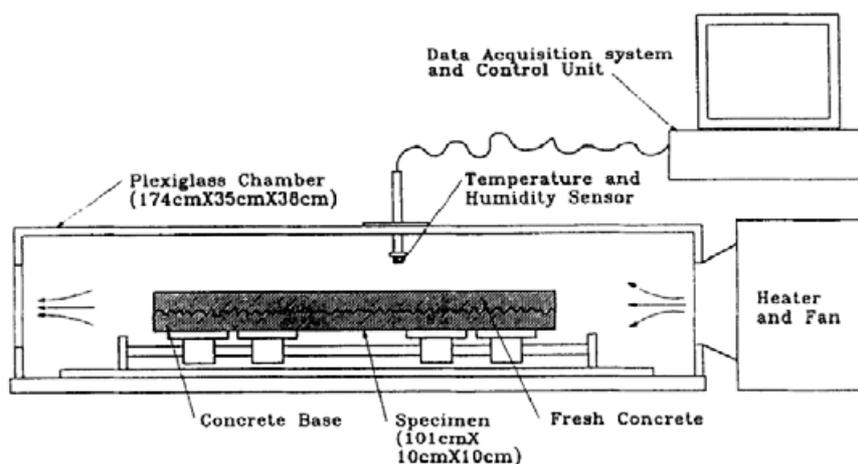
**Figure I.37** - Dispositif de mesure du retrait empêché sur plaques [Yokoyama 1994]

L'essai est utilisé pour évaluer les performances d'une dalle de mortier contenant des fibres polymères, coulée sur une plaque en métal. La restriction est assurée par des barres d'aciers soudées directement aux bords de la plaque. La fissuration est évaluée par la mesure de la taille des fissures, l'échéance de l'apparition des fissures, leur nombre, etc.

Le dispositif développé par Détriché [Détriché 1978] permet également de mesurer les variations dimensionnelles des couches minces de mortier. Pour cela, le moule est équipé de tiges d'ancrages reliées à des capteurs de déplacement. Le schéma du dispositif est présenté sur la figure I.38. Une adaptation du dispositif a été réalisée par Nicot [Nicot 2008] pour caractériser les variations dimensionnelles des couches minces de mortier sur support poreux. De la même façon, Banthia [Banthia 1996] a développé un dispositif qui permet de mesurer le retrait empêché d'une réparation en béton. Le matériau est ainsi coulé sur un substrat en béton mûri (voir figure I.39). L'ensemble est soumis à une température de 38°C et à 5 % HR. L'observation de la fissuration est effectuée à l'aide d'un microscope.



**Figure I.38** - Dispositif de mesure du retrait développé Détriché et adapté par Nicot pour la mesure du retrait empêché en présence d'un support poreux [Détriché 1978] [Nicot 2008]



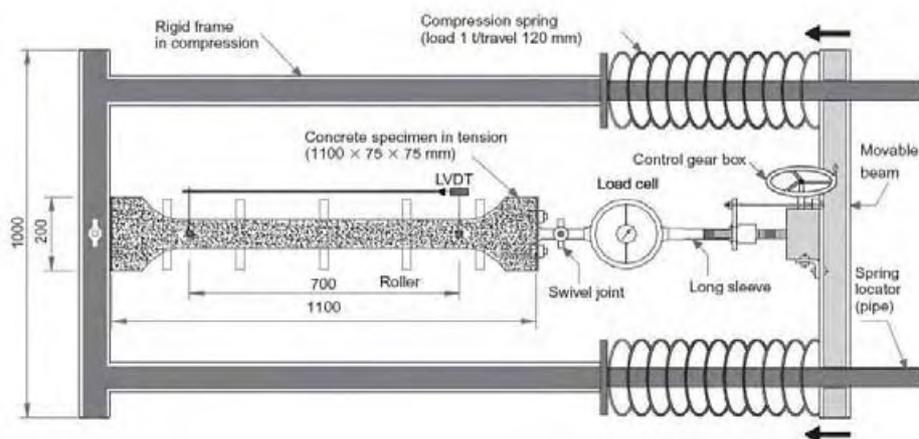
**Figure I.39** - Dispositif de mesure du retrait empêché développé par Banthia [Banthia 1996]

### I.6.5.2 Essais linéiques

Dans ce type d'essais, le matériau est mis en place sur un banc horizontal en faisant en sorte qu'une de ses extrémités reste fixe. Le banc est complété par un dispositif d'application de la charge permettant de restreindre les déplacements linéiques. Ainsi, au fur et à mesure que le matériau se déforme, le dispositif d'asservissement mécanique exerce une force opposée à ce mouvement [Aly 2007] [Beushausen 2007].

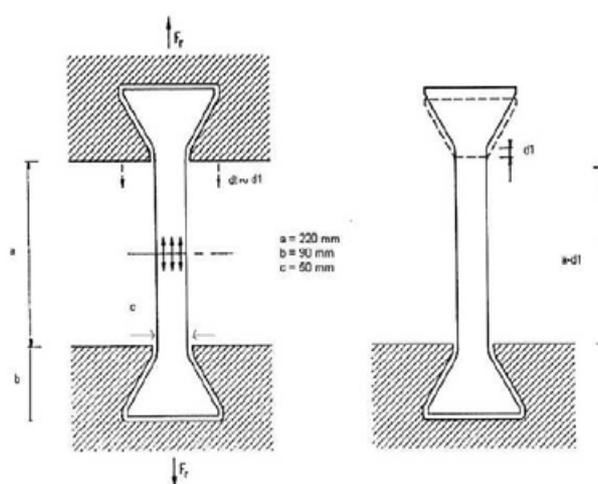
Le principal inconvénient de ce type d'essai est que, d'une part, il nécessite un système d'asservissement complexe et que d'autre part le blocage mécanique ne peut s'exercer qu'après la prise du matériau [Bentur 2003]. Ce paramètre doit en outre être déterminé au préalable afin de définir le moment où l'on débute l'essai. Enfin, la question de l'accroche

demeure importante puisqu'elle conditionne la distribution des contraintes dans le mortier, ainsi que les effets de bords éventuels dus à la géométrie des éprouvettes [Bentur 2003].



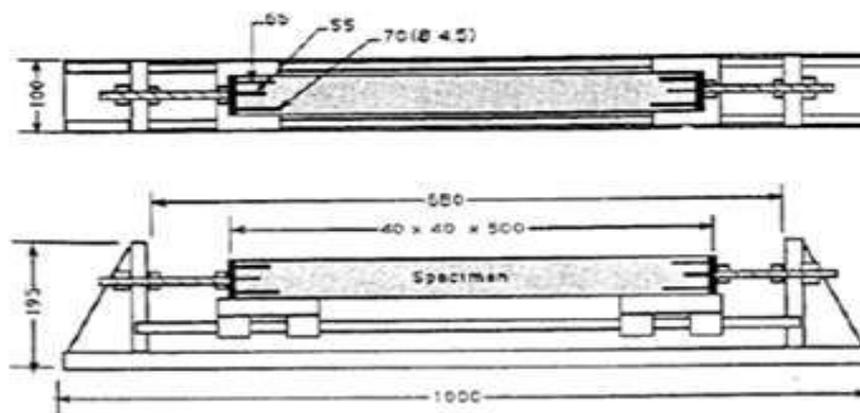
**Figure I.40** - Dispositif de retrait empêché [Aly 2007]

Le même principe de mesure est utilisé par Rosario Veiga [Veiga 2007] pour tester la susceptibilité à la fissuration de différents mortiers. La forme des éprouvettes de l'essai est la même que précédemment, mais dans ce cas elles sont placées verticalement.



**Figure I.41** - Dispositif longitudinal basé sur le modèle de Lejeune utilisé par A. Rosario Veiga et al. [Veiga 2007]

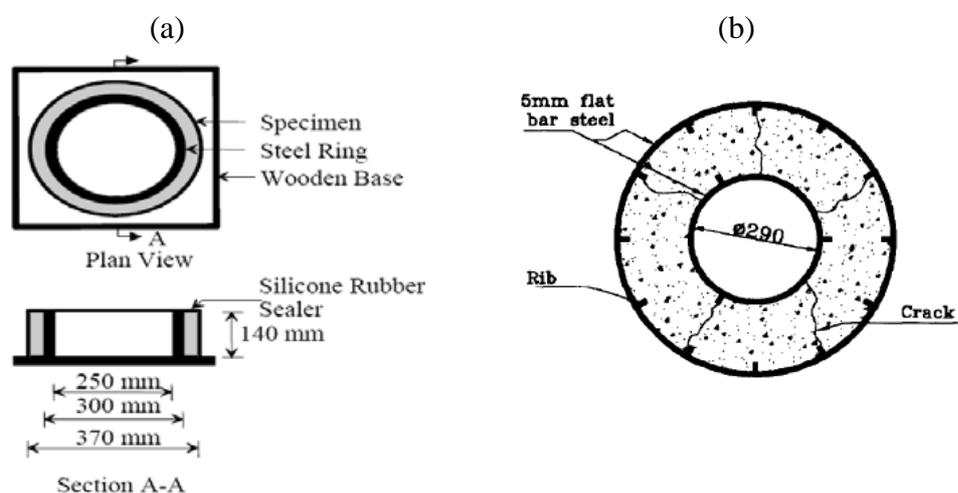
Des essais qualitatifs longitudinaux sont aussi effectués par Banthia (figure I.42) [Banthia 1993] et Bentur [Bentur 2003]. L'éprouvette est fixée par ses extrémités après démoulage et la fissuration est suivie par un microscope parcourant la surface de l'éprouvette.



**Figure I.42** - Dispositif longitudinal développé par Banthia pour le suivi de la fissuration due au retrait empêché [Banthia 1993]

### I.6.5.3 Essais à l'anneau

L'essai à l'anneau est parmi les plus utilisés pour caractériser la susceptibilité à la fissuration des matériaux cimentaires. Le mortier est coulé autour d'un anneau (qui peut suivant les cas être actif ou passif). La forme imposée par cet essai et la faible déformabilité de l'anneau génèrent du retrait empêché et donc la fissuration de l'anneau de mortier.



**Figure I.43** - (a) Représentation schématique de l'essai empêché à l'anneau [Weiss 1999]  
(b) représentation de la fissuration radiale [Bentur 2003]

L'évaluation de la performance du mortier est évaluée en analysant l'échéance d'apparition de la fissuration, le nombre de fissures, leur ouverture et leur taille. On peut évaluer les déformations au moyen de jauges noyées dans le matériau ou collées sur l'extérieur de l'anneau central. La mesure des déformations de l'anneau en acier permet d'évaluer la contrainte moyenne dans le mortier (essai ASTM C1581). L'épaisseur et la rugosité des

anneaux peuvent aussi varier, ainsi que l'épaisseur de la couche de mortier. On distingue actuellement deux configurations d'essai suivant le type d'anneau utilisé. Les essais à base d'anneaux actifs et les essais à base d'anneaux passifs [Adnan 2007]. Avec un anneau « passif », la déformation de l'anneau n'est pas compensée. La géométrie de l'anneau conditionne d'ailleurs l'apparition de la fissuration [Weiss 2001] [Bentur 2003] [Monge 2007].

## **I.7 Conclusion sur la synthèse bibliographique**

La synthèse bibliographique nous a permis d'appréhender la complexité des phénomènes qui régissent le comportement des structures de couches minces de mortiers. En effet de nombreux mécanismes sont mis en jeu (hydratation, dessiccation, développement des contraintes, influence du support). L'action combinée de tous ces phénomènes a pour résultat la sollicitation de la couche mince de mortier vis-à-vis des contraintes liées non seulement aux conditions d'exploitation, mais aussi à l'évolution de la structure du matériau mis en œuvre.

Dans un premier temps, nous avons examiné les principales étapes du processus de l'hydratation des ciments et des produits qui leur sont associés. Dans cette partie, nous nous sommes intéressé plus en détail à l'hydratation du ciment Portland et des ciments alumineux qui sont le plus souvent utilisés comme liants de base dans l'industrie et la technologie des mortiers (pour des applications d'enduit). Il apparaît donc que l'état de l'eau dans le matériau et la structure poreuse, donc les propriétés mécaniques, sont fortement dépendants de l'hydratation.

Dans cette étude bibliographique, un accent particulier a été mis sur l'utilisation des liants binaires et ternaires (ciment Portland, ciment alumineux et certains ajouts) qui permettent d'obtenir des matériaux avec des propriétés spécifiques. L'emploi d'adjuvants confère de meilleures propriétés au mortier, notamment celles concernant la mise en œuvre et la tenue sur site, en revanche, leur utilisation peut parfois dégrader les propriétés mécaniques des matériaux avec la diminution des résistances en compression ou la chute du module d'Young. Ceci requiert une vigilance particulière quant à leur emploi dans la formulation des mortiers.

Dans un second temps, nous avons étudié le phénomène de dessiccation des couches minces de mortiers. Il apparaît que la dessiccation du mortier résulte principalement des effets combinés de l'évaporation vers le milieu ambiant, de la succion induite par le support ainsi que par le processus d'hydratation. Le séchage est un phénomène complexe qui peut se produire durant des années jusqu'à ce que l'équilibre hydrique entre le matériau et le milieu

environnant soit atteint. Ce déséquilibre hydrique se traduit par des gradients de teneurs en eau entre la surface et le cœur de la structure, générant ainsi des gradients de déformations et dans certains cas des gradients d'hydratation. Ces gradients peuvent induire la microfissuration, en particulier au jeune âge, qui peut être à l'origine de la dégradation de certaines propriétés du matériau tels que le module d'Young, le coefficient de poisson et dans certains cas les résistances mécaniques.

Par la suite, nous avons recensé de façon succincte les variations dimensionnelles qui prennent place dans les couches minces de mortiers dès leur mise en place. A cet effet, plusieurs techniques de mesures ont été présentées et une classification a été faite suivant les conditions de conservation, les conditions de mise en œuvre et le vieillissement du matériau. Une attention particulière a été portée à l'étude des variations dimensionnelles en conditions empêchées, les applications d'enduits étant toujours effectuées sur un support ; l'étude de l'association revêtement-support avec la prise en compte des déformations et des contraintes qui se développent (retrait, fluage, relaxation) est donc de première importance.

En se basant sur les observations ci dessus, il apparaît que les principaux phénomènes qui régissent le comportement des couches minces de mortiers sont :

- la composition du mortier,
- la nature et l'état hydrique du support sur lequel est appliqué le mortier,
- les conditions d'exposition.

Les gradients de propriétés qui découlent de la combinaison de tous ces phénomènes ont donc un rôle prépondérant sur le comportement du matériau sur site. En outre l'existence de gradients de propriétés sur l'épaisseur de la couche est susceptible d'accentuer le risque de fissuration de la couche de mortier.

L'objectif du travail que nous allons développer par la suite va consister à caractériser l'intensité de ces gradients et à les prendre en compte dans les outils de prédiction de la fissuration.

**Partie II : CAMPAGNE EXPERIMENTALE  
ET ANALYSE DES RESULTATS**



## **Partie II: CAMPAGNE EXPERIMENTALE ET ANALYSE DES RESULTATS**

### **II.1 Introduction**

Il s'agit de décrire dans ce chapitre les différentes étapes importantes qui nous ont permis de caractériser et de quantifier la susceptibilité à la fissuration des couches minces de mortier en présence d'un support adhérent. Le but est d'obtenir des informations sur la fissuration induite par les gradients de propriétés qui se développent dans le volume du matériau, ayant subi dès sa mise en œuvre, des sollicitations sous l'influence du milieu environnant. A cet effet, nous présentons les techniques expérimentales développées et utilisées pour caractériser le processus d'endommagement et de dégradation des structures de couches minces de mortier. Il s'agit ici de systèmes composites constitués d'une base métallique faisant office de support sur laquelle est appliquée une couche mince de mortier.

### **II.2 Matériaux étudiés : Présentation et caractérisation**

#### **II.2.1 Formulations utilisées**

Dans cette section, nous allons donner une description des matériaux utilisés. Nous nous intéressons plus particulièrement aux matériaux destinés aux applications pour ragréages et chapes. L'objectif est de mieux comprendre les mécanismes qui régissent le comportement sur site de ce type de matériaux. On sait que le retrait de séchage est l'un des principaux facteurs qui influencent le comportement du matériau sur site [Détriché 1983] [Feron 2002] [Gallias 1982]. L'amplitude du retrait peut être minimisée par l'emploi d'ajouts comme des polymères, des liants composés (voir partie II). Afin de couvrir une large gamme en termes d'amplitude de retrait, 4 formulations ont été retenues dans cette étude. Il s'agit entre autres de deux mortiers à base de ciment Portland (MA et MB) et de deux mortiers industriels (WA et WB). Les compositions de ces 4 mélanges sont données respectivement dans les tableaux II.2 et II.3.

##### **II.2.1.1 Les mortiers à base de ciment Portland**

Les compositions des deux mortiers à base de ciment Portland (MA et MB) sont données dans le tableau II.2. Ces formulations sont proches de celles proposées par Olivier Laurence [Laurence 2001] dans ses travaux de thèse pour des mortiers destinés aux travaux de réparations.

### - Le ciment

Le ciment utilisé dans ces mélanges est un CEM I 52.5 R de l'usine de Martres Tolosane (Haute Garonne) commercialisé par Lafarge. Le détail de sa composition chimique est donné dans le tableau II.1.

**Tableau II.1** - Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé

<b>Composition chimique</b>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	NaO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
%(masse)	63,99	19,89	5,64	2,47	1,77	3,13	0,07	0,4	0,21	0,1
Perte au feu	1,73									
<b>Composition de Bogue</b>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF						
%(masse)	53,7	17,9	9,5	6,9						

### - Le sable

Le sable utilisé pour la formulation des mortiers (MA et MB) est du sable normalisé tel que décrit par la norme EN 196-1.

### - Le superplastifiant

Pour faciliter la maniabilité et la mise en œuvre du matériau, un superplastifiant (Glénium 27) a été ajouté au mélange (eau de gâchage).

### - Le polymère

Le polymère utilisé dans cette étude est un latex EVA (PolyVinyle Ethylène-Acétate) du commerce.

**Tableau II.2** - Composition des mortiers MA et MB

	<b>Ciment</b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b>Sable</b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b>Eau</b> (l/m <sup>3</sup> )	<b>Polymère</b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b>Superplastifiant</b> (l/m <sup>3</sup> )	<b>E/C</b>
	CPA CEM I 52,5 R	Sable normalisé		EVA	Glénium 27	
<b>MA</b>	680	1360	292		3,40	0,43
<b>MB</b>	653	1306	280	79	3,26	0,43

#### II.2.1.2 Les mortiers industriels

Les mortiers industriels étudiés sont des mélanges à base ternaire. Ces mortiers ont été fournis par la société Weber et Broutin. Les compositions des deux mortiers à base de liant ternaire (WA et WB) sont données dans le tableau II.3.

**Tableau II.3** - Composition (% massique) des mortiers WA et WB

	<b>Liant ternaire</b> (Ciment Portland + Ciment Alumineux + gypse)	<b>Filler + Sable siliceux</b> (0,08-3 mm)	<b>Adjuvants</b>	<b>Polymère</b>
<b>WA</b>	37,0	50	13	0
<b>WB</b>	35,5	48	12,5	4
<b>Fibres de verre recouvertes</b> <b>Eau de gâchage</b> : 20% de la masse des constituants secs				

## II.2.2 Caractérisation mécanique et physique des mortiers

Cette section est dédiée à apporter des renseignements quantitatifs en ce qui concerne les caractéristiques mécaniques et physiques des matériaux étudiés. Les essais sont effectués sur des matériaux qui sont conservés dans une salle à température et hygrométrie contrôlée (température  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et HR (%) =  $65 \pm 5$ ). Les caractéristiques suivantes ont été mesurées:

- La masse volumique apparente
- La porosité totale
- Le module d'Young en traction
- Les résistances en traction
- Les résistances en flexion et en compression

### II.2.2.1 Propriétés physiques des mortiers

La détermination des masses volumiques apparentes et des porosités accessibles à l'eau a été effectuée conformément aux prescriptions de la méthode [AFPC-AFREM \[AFREM 1997\]](#). Chaque valeur obtenue est la moyenne des résultats de trois essais réalisés sur des cubes de 40 mm de côté prélevés sur trois éprouvettes différentes de 40×40×160 mm de dimensions et provenant d'une même formulation. Les résultats obtenus pour des échéances de 7 et 28 jours sont présentés dans le tableau II.4. On constate que l'addition du polymère dans le mélange a pour effet de diminuer la porosité ouverte ainsi que la masse volumique apparente des matériaux (MB et WB). Le polymère aurait donc tendance à combler les vides ou à bloquer partiellement l'accès à la porosité intergranulaire en diminuant le pourcentage de gros capillaires. Toutefois, l'ajout du polymère avec un pourcentage de 4% diminue la densité apparente des matériaux à l'état durci.

**Tableau II.4** - Caractéristiques physiques des mortiers

	Porosité ouverte à l'eau (%)		Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	
	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
<b>MA</b>	22,3	20,3	2050	2060
<b>MB</b>	21,7	19,4	2020	2030
<b>WA</b>	34,2	31,6	1830	1824
<b>WB</b>	33,1	31,1	1787	1766

## II.2.2.2 Caractérisation mécanique des mortiers

### II.2.2.2.1 Comportement en flexion et en compression

Pour les 4 formulations, les résistances en flexion et en compression ont été déterminées sur des prismes de 40×40×160 mm suivant les prescriptions décrites par la norme [EN 196-1](#). Les évolutions des résistances moyennes en flexion et en compression sont présentées dans le tableau II.5 et sur les figures II.1 et II.2. Les essais sont réalisés aux échéances de 1, 3, 7, 14 et 28 jours. Chaque valeur est le résultat de la moyenne de 3 essais, avec un coefficient de variation inférieur à 5%.

Comme le montrent les figures, on remarque qu'à 1 jour, les résistances de nos mortiers sont du même ordre de grandeur. Après cette échéance, les résistances des mortiers à base de ciment Portland (MA et MB) évoluent de façon plus significative que celles des mortiers industriels (WA et WB) et celles-ci tendent à se stabiliser au bout de 28 jours en particulier les résistances en compression.

Les formules contenant du polymère ont des résistances en flexion plus grandes que les mortiers de référence qui ne contiennent pas de polymère (MA et WA).

En ce qui concerne la résistance en compression, l'ajout du polymère n'a pas de conséquences significatives sur l'évolution des résistances mécaniques surtout pour le mortier MB. Les matériaux ont développé des résistances en compression allant de 33 à 63 MPa à 28 jours.

Tableau II.5 - Résistances mécaniques moyennes des matériaux

Matériau	Age (jours)	Nombre d'éprouvettes	Résistances mécaniques			
			$R_f$ (Mpa)		$R_c$ (Mpa)	
			Moyenne	Coefficient de variation (%)	Moyenne	Coefficient de variation (%)
MA	1	3	4,9	6	26,9	1
	3	3	8,4	4,7	52,1	2
	7	3	9,3	2,6	54,6	1,2
	14	3	9,6	4,2	60,8	2,1
	28	3	10,2	5,3	62,5	2,7
MB	1	3	4,97	0,8	22,7	1,4
	3	3	8,25	2,7	50,35	2
	7	3	10,13	4,7	56,98	1
	14	3	10,52	2,6	59,26	0,5
	28	3	10,98	2,2	60,21	1,8
WA	1	3	4,66	5,1	26,96	1,9
	3	3	5,25	5,6	32,8	1,9
	7	3	5,44	6,1	34,6	3
	14	3	5,49	5,7	37,2	2,7
	28	3	5,5	4,4	39	1
WB	1	3	5,19	4,4	20,36	1,8
	3	3	6,35	1,9	28,00	1
	7	3	7,55	5,4	33,37	1,2
	14	3	8,48	2,8	33,63	4,4
	28	3	8,8	1,5	33,9	0,5

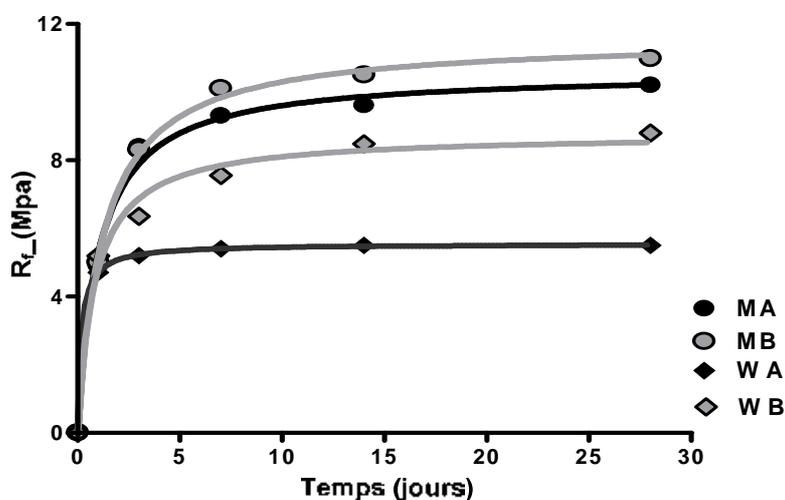


Figure II.1- Résistances en flexion des différents mortiers

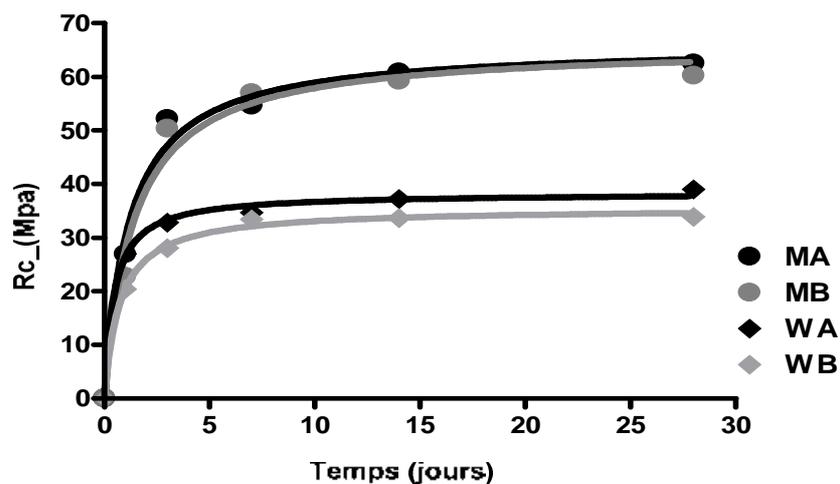


Figure II.2- Résistances en compression des différents mortiers

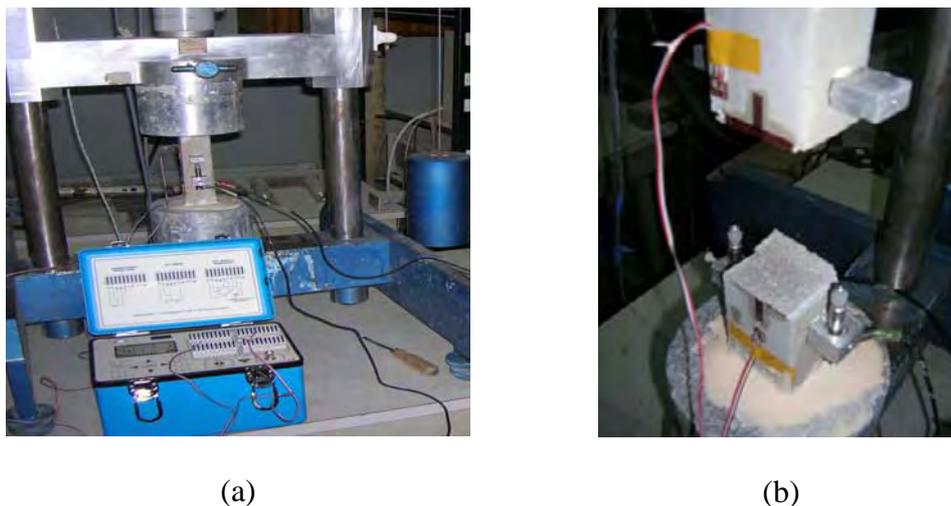
#### II.2.2.2.2 Comportement et module d'Young en traction

Au contact d'un support et sous l'effet du retrait empêché, les couches minces de mortiers subissent en général des sollicitations de traction [Détriché 1983a] [Bissonnette 1995]. Par conséquent, la connaissance de l'évolution au jeune âge de la résistance en traction du matériau s'avère nécessaire voire incontournable.

Dans cette étude, le comportement en traction est caractérisé au moyen d'essais de traction directe et de flexion sur des prismes  $40 \times 40 \times 160$  mm.

#### - Essais de traction directe sur mortiers

L'essai de traction directe a permis de déterminer à la fois la résistance en traction et le module d'Young des matériaux. La configuration de l'essai est illustrée sur la figure II.3. Les tests sont réalisés sur des éprouvettes de mortier de dimensions  $40 \times 40 \times 160$  mm entaillées. La profondeur des entailles est choisie de telle sorte que la rupture se produise au niveau de la section réduite. Dans notre cas, nous avons adopté une profondeur d'entaille de 2 mm. La section réduite devient donc  $36 \times 36$  mm<sup>2</sup>. Les efforts sont transmis au matériau par l'intermédiaire des embases qui sont collées sur les deux extrémités de l'éprouvette. La liaison éprouvette-embases est assurée au moyen d'une colle à prise rapide. Les mesures des déplacements au niveau du matériau sont effectuées au moyen de deux capteurs de déplacement LVDT montés en parallèle sur l'éprouvette (voir figure II.3).

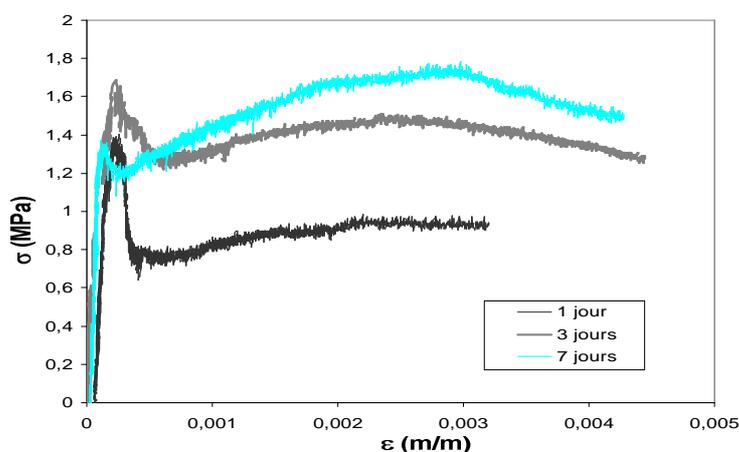


**Figure II.3-** a) Configuration de l'essai de traction directe  
b) mode de rupture d'une éprouvette

Dans un premier temps, nous avons effectué des essais de traction avec asservissement par déplacement du signal moyen des deux capteurs. Les vitesses suivantes ont été utilisées:

- 1  $\mu\text{m}/\text{min}$  pour des déplacements de 0 à 0,01 mm
- 10  $\mu\text{m}/\text{min}$  pour des déplacements de 0,01 à 0,3mm

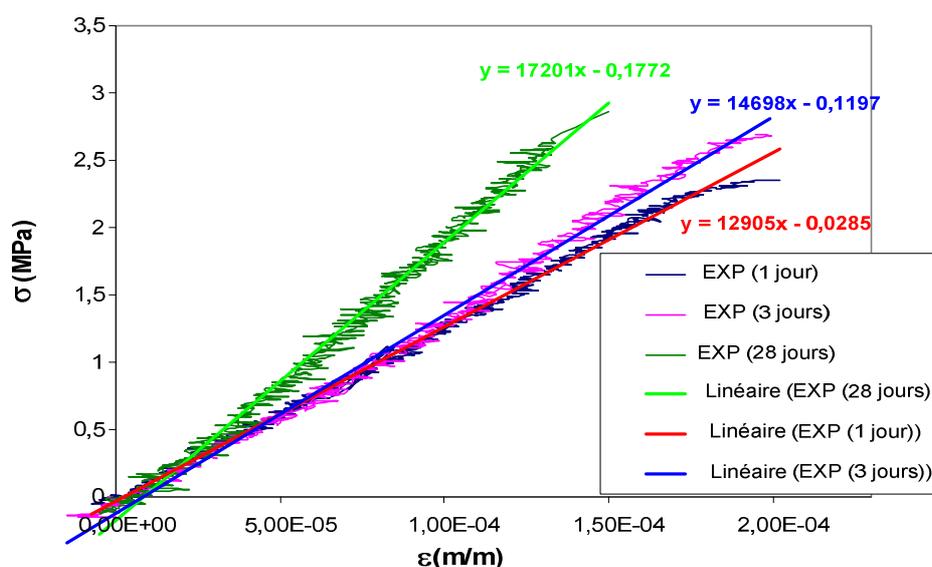
La figure II.4 nous donne un exemple de courbes contrainte-déformation ( $\sigma - \epsilon$ ) pour le mortier industriel sans polymère WA. La courbe ( $\sigma - \epsilon$ ) est déduite de la courbe ( $F - \delta$ ) enregistrée lors de l'essai de traction. La figure II.4 montre qu'après fissuration, la reprise des efforts dans la partie post pic est essentiellement assurée par les fibres.



**Figure II.4-** Courbes expérimentales  $\sigma - \epsilon$  pour le mortier WA

Par contre, le comportement adoucissant n'a pu être caractérisé sur les mortiers à base de ciment Portland (MA et MB) pour lesquels nous avons observé une rupture brutale. Partant de cette constatation, nous avons décidé de conduire l'essai de traction directe avec un asservissement par force avec mesure des déplacements pour une vitesse de chargement de 0,4 KN/min. Les mesures des déplacements (au niveau du matériau) sont effectuées au moyen de deux capteurs de déplacement LVDT montés en parallèle sur l'éprouvette (voir figure II.3). Nous avons réalisé des essais sur deux types d'éprouvettes entaillées de 40×40×160 mm ou 20×40×160 mm de dimensions. Dans les deux cas, les courbes ( $\sigma - \epsilon$ ) obtenues sont assez proches et les valeurs des contraintes à la rupture sont du même ordre de grandeur. Les figures II.5 et II.6 nous donnent des exemples de courbes contrainte-déformation obtenues pour les mortiers MA et WA. Le module d'Young en traction est donné par le coefficient directeur de la régression linéaire effectuée sur la courbe ( $\sigma - \epsilon$ ).

Les résistances en traction ainsi que les modules d'Young (en traction) des mortiers sont regroupés dans le tableau II.6. On remarque que les mortiers MA et MB développent des résistances en traction plus fortes que les mélanges WA et WB. Les modules d'Young en traction sont également plus importants pour le cas des mortiers MA et MB. Pour les mélanges MB et WB contenant du polymère, on observe une légère diminution des caractéristiques en traction par rapport à celles des mélanges non adjuvantés en polymère MA et WA. On note également des coefficients de variation plus importants (d'un matériau à un autre) que celles obtenues en compression.



**Figure II.5** - Courbes  $\sigma - \epsilon$  pour le mortier MA : déduction du module d'Young en traction

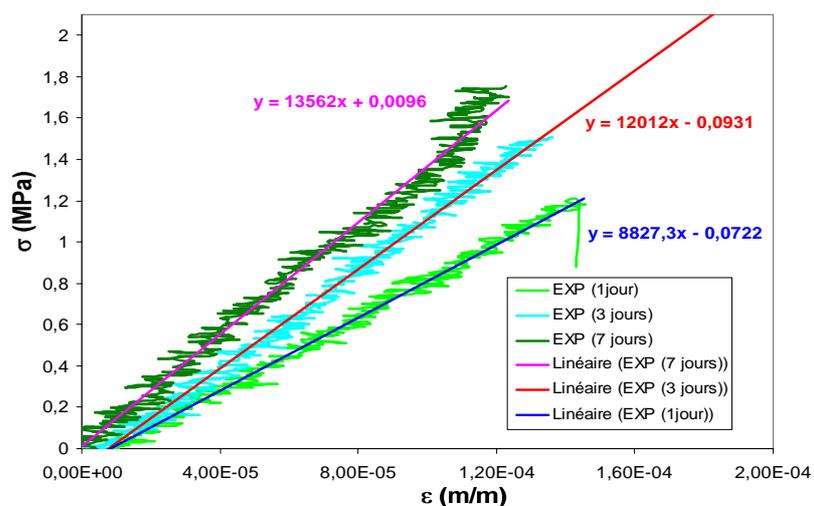
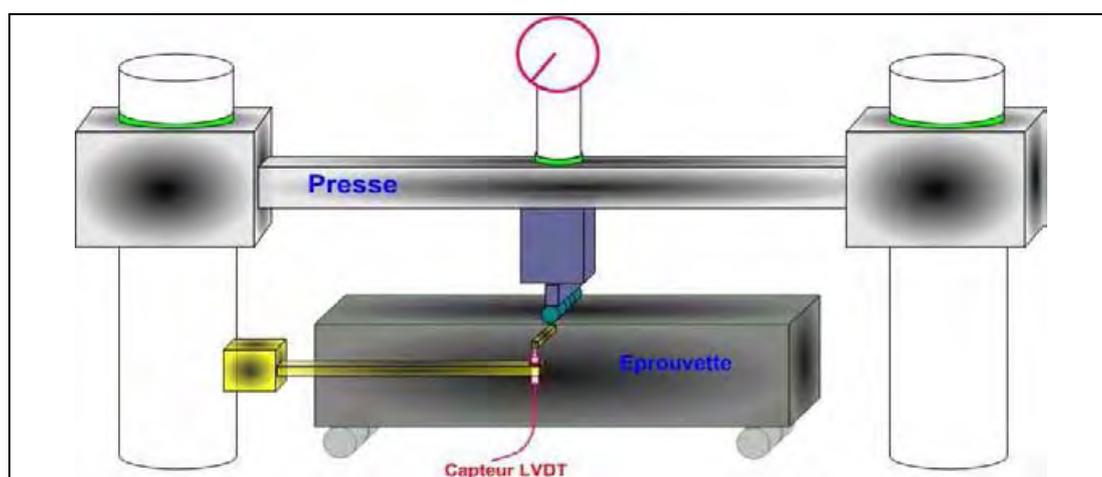

 Figure II.6 - Courbes  $\sigma - \varepsilon$  pour le mortier WA : déduction du module d'Young en traction

Tableau II.6 - Résistances et module d'Young en traction des matériaux

Matériau	Age (jours)	Nombre d'éprouvettes	Caractéristiques en traction		
			$R_t$ Moy (Mpa)	$E_t$ Moy (Mpa)	Coefficient de variation (%)
MA	1	4	1,8	12905	28,4
	3	4	2,1	14698	16,5
	7	4	2,7	15447	38,2
	28	4	3,1	17440	27,2
MB	1	4	1,8	11600	14,3
	3	4	1,9	14000	20,2
	7	4	2,5	14650	17,2
	28	4	2,9	15000	18,4
WA	1	4	1,2	8827	23,2
	3	4	1,5	12012	21,3
	7	4	1,7	13562	26,4
	28	4	1,8	13888	19,2
WB	1	4	1,2	8630	21,3
	3	4	1,4	11800	18,5
	7	4	1,7	12900	22,2
	28	4	1,9	13000	17,6

### - Essais de flexion sur mortiers

Comme nous l'avons vu avant, la caractérisation du comportement adoucissant des mortiers MA et MB via l'essai de traction directe est délicate. Pour contourner cette difficulté nous avons choisi de caractériser ce comportement en flexion. A cet effet, nous avons effectué des essais de flexion trois points sur des prismes  $40 \times 40 \times 160$  mm à des échéances de 1, 3 et 7 jours. La flèche est mesurée grâce à un capteur LVDT qui est positionné à mi portée de l'éprouvette. Le dispositif de mesure est représenté sur la figure II.7. L'essai est asservi en déplacement avec une vitesse de 0,03 mm/min.



**Figure II.7** - Principe de l'essai de flexion 3 points sur éprouvette de mortier

Les courbes force - flèche des mélanges MA et MB pour des échéances de 1, 3 et 7 jours sont présentées sur la figure II.8. On note que le mortier MB est plus déformable, avec également des résistances en flexion plus faibles. Ceci est en contradiction avec les résultats obtenus sur des tests de flexion suivant la norme [EN 196-1](#). Au-delà d'un jour, on ne voit pas de différence significative sur le comportement post-pic des deux mortiers.

Les courbes force - flèche des mélanges WA et WB pour des échéances de 1, 3 et 7 jours sont présentées sur la figure II.9. On note qu'à 1 jour, les deux mortiers WA et WB ont des comportements avant pic et post pic quasi similaires. Au-delà de 1 jour, on ne voit pas de différence significative dans le comportement post-pic des deux mortiers et les forces de rupture ne varient que très peu. Cela peut être dû au fait que les mortiers WA et WB développent de fortes résistances durant les premières heures après leur mise en œuvre et que celles-ci augmentent très peu dans le temps. Dans la partie post pic, la reprise des efforts est essentiellement assurée par les fibres.

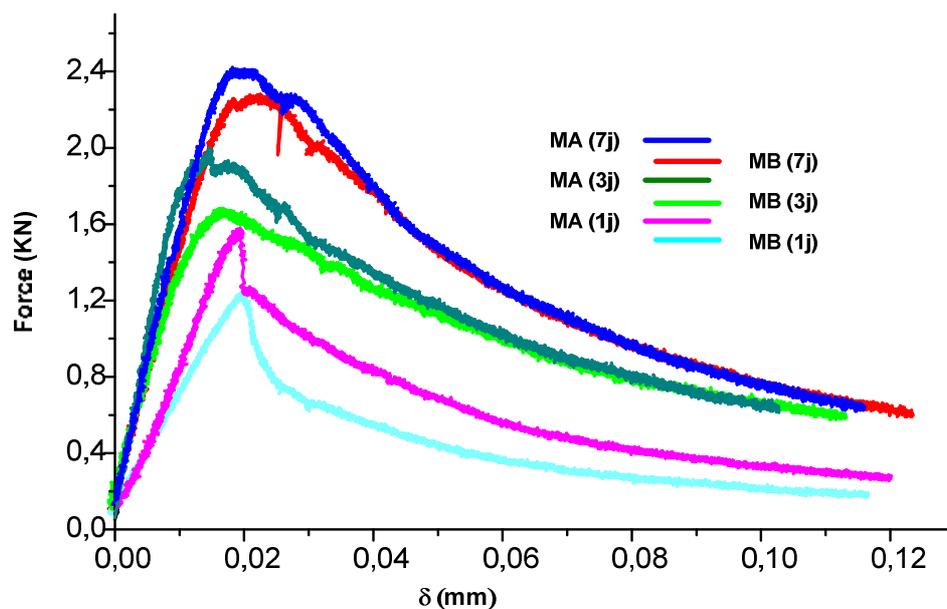


Figure II.8 - Courbes expérimentales Force –  $\delta$  pour les mortiers MA et MB

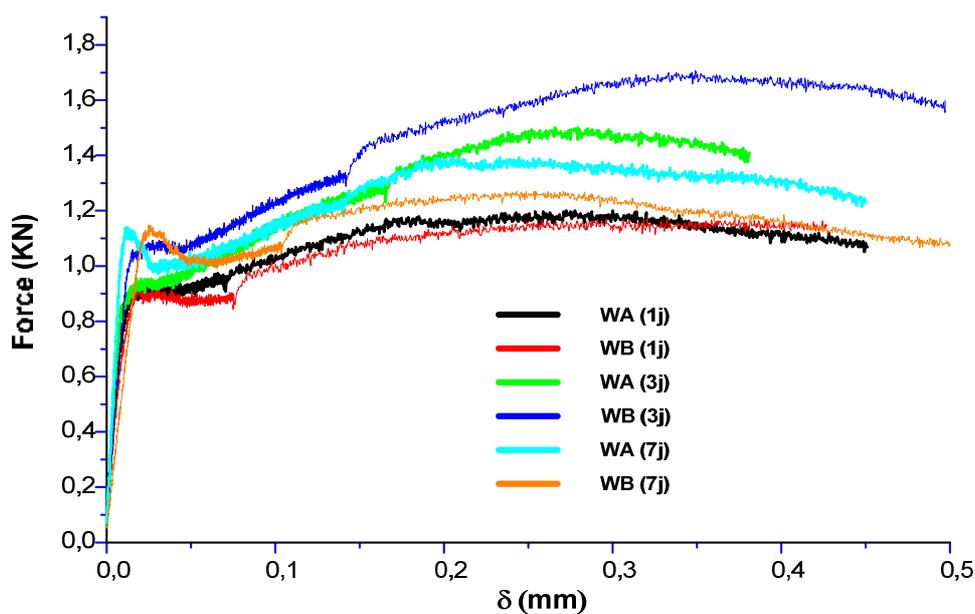


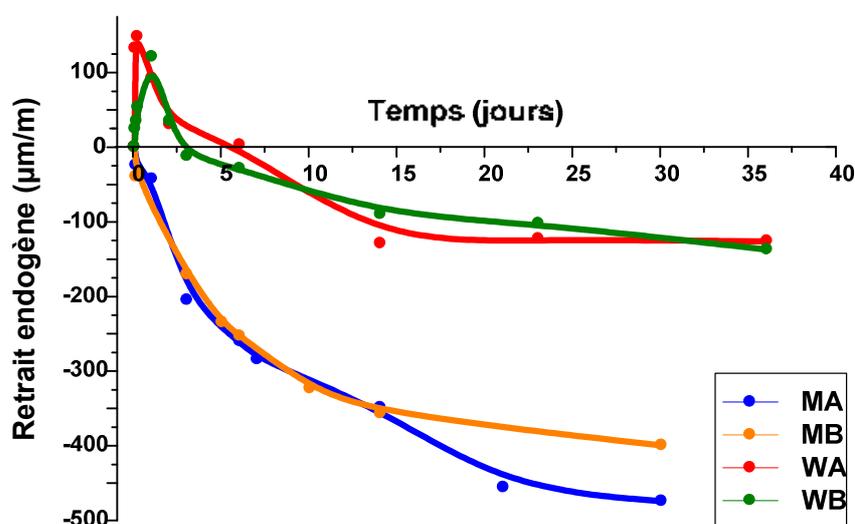
Figure II.9 - Courbes expérimentales Force –  $\delta$  pour les mortiers WA et WB

## II.2.3 Variations dimensionnelles (NF P 15-433)

### II.2.3.1 Le retrait endogène sur matériau à l'état durci

Le retrait endogène est mesuré sur trois prismes de dimensions 40×40×160 mm qui sont protégés du séchage au moyen de papier aluminium auto-adhésif. Le démoulage des éprouvettes a lieu au bout de 24 heures après le coulage pour les mortiers (MA et MB) et 7

heures après le coulage pour les mortiers (WA et WB). Les mesures sont effectuées au retractomètre suivant la norme [NF P 15-433](#).



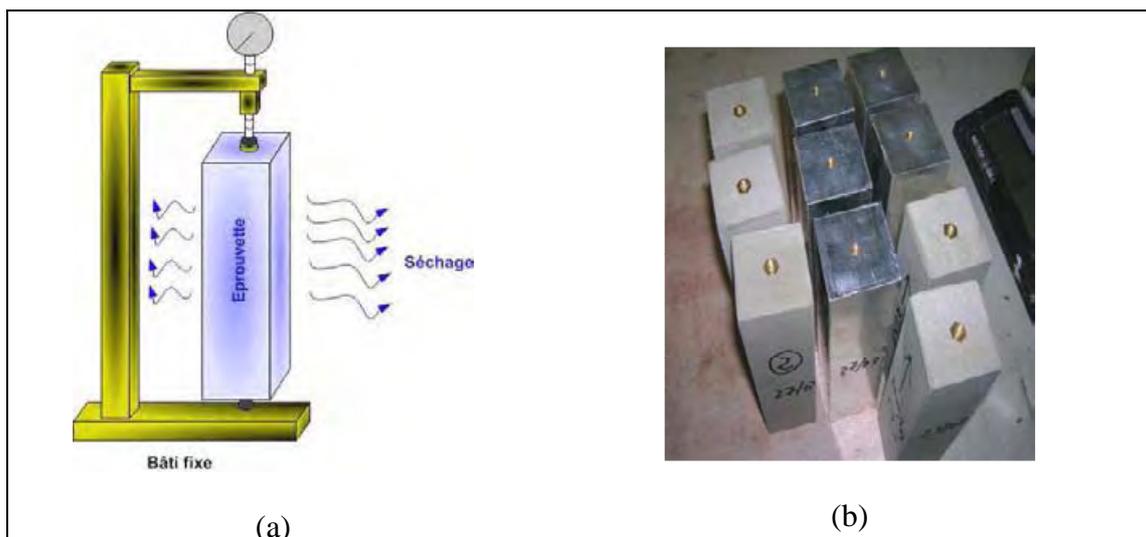
**Figure II.10** - Evolution du retrait endogène des différents mortiers

Les résultats présentés sur la figure II.10 montrent une phase de gonflement durant les premières heures suivant le démoulage pour les mortiers WA et WB. Cette phase peut être essentiellement attribuée à la formation de l'ettringite lors de l'hydratation du liant. Passé cette étape, on remarque que les mortiers font du retrait. Toutefois, comparé aux mortiers classiques, le retrait de ces mortiers est moins important.

### II.2.3.2 Le retrait avec séchage et perte de masse due au séchage sur matériau à l'état durci

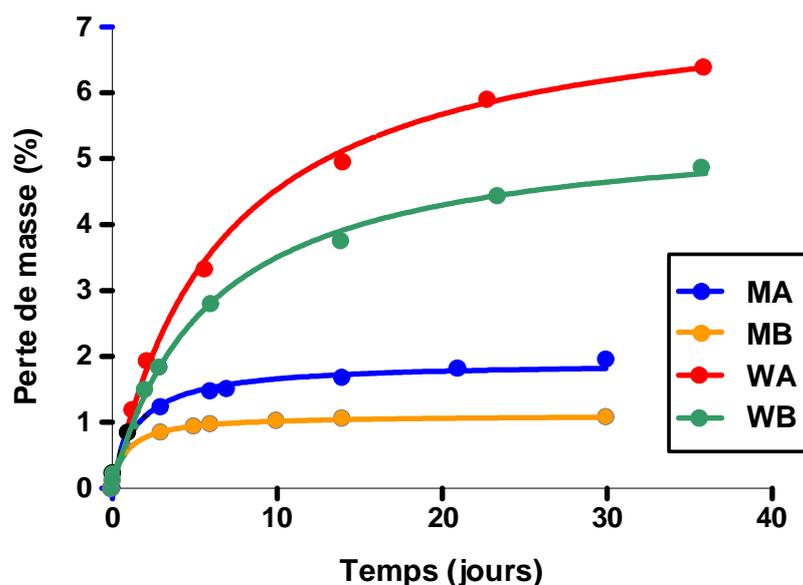
De la même manière que le retrait endogène, le retrait en condition de séchage (retrait total) est mesuré sur trois prismes de dimensions 40×40×160 mm qui sont laissés libres au séchage en ambiance contrôlée (HR= 65% ± 5%, Température 20°C ± 2°C). Le démoulage des éprouvettes a lieu 24 heures après le coulage pour les mortiers MA et MB et 7 heures après le coulage pour les mortiers WA et WB. Les mesures de retrait libre sont effectuées au retractomètre suivant la norme [NF P 15-433](#) (voir figure II.11), juste après démoulage.

La perte de masse due au séchage est également mesurée et son évolution au cours du temps pour chaque mortier est présentée sur la figure II.12. Ces pertes de masse sont exprimées en pourcentage de la masse initiale totale de l'échantillon au moment du démoulage.



**Figure II.11** - (a) Principe de mesure du retrait au retractomètre  
(b) mode de conservation en conditions endogènes et de séchage des éprouvettes de mortier

On remarque que la perte de masse des mortiers industriels WA et WB est plus importante que celle des mortiers classiques. Ceci peut être attribué au fait que les mortiers industriels ont une quantité d'eau de gâchage plus importante. Au bout de 40 jours de séchage, la perte de masse n'est toujours pas stabilisée pour ces mortiers, alors que pour les mortiers classiques (MA et MB) on remarque au bout de 30 jours que le taux de séchage a considérablement diminué avec les pertes de masses qui tendent à se stabiliser.



**Figure II.12** - Evolution de la perte de masse des différents mélanges

L'ajout du polymère a pour effet de diminuer la perte en eau au cours du séchage du matériau. Cette diminution peut atteindre 33% à 30 jours de séchage.

La figure II.13 présente l'évolution moyenne du retrait total mesuré sur trois éprouvettes pour chaque mortier. De la même manière que le retrait endogène, les courbes de retrait total montrent une phase de gonflement durant les premières heures suivant le démoulage pour les mortiers industriels. Passée cette étape, on remarque que ces mortiers font du retrait et que, quelle que soit l'échéance, ce retrait est d'une amplitude moins importante que celui développé par les mortiers classiques à base de ciment Portland. Ce comportement des mortiers industriels vis-à-vis du retrait est lié à la formulation ternaire. La phase alumineuse induit en effet un gonflement au cours de la prise c'est-à-dire durant les 10 premières heures. L'ampleur de cette phase de gonflement ne peut pas être détectée ici compte tenu du dispositif expérimental qui ne permet pas d'effectuer les mesures avant le démoulage. Nous mettons en évidence cette phase de gonflement par la suite.

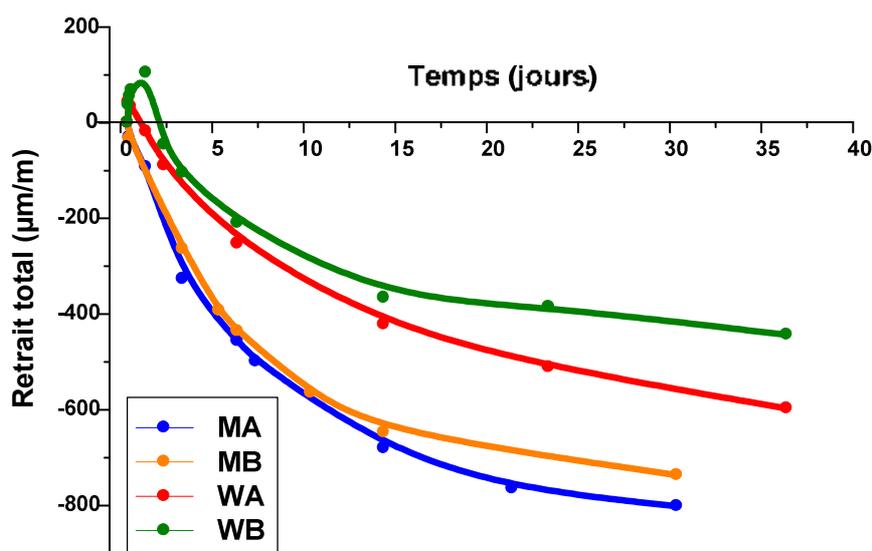


Figure II.13 - Evolution du retrait total des différents mélanges

### II.2.3.3 Le retrait de séchage sur matériau à l'état durci

Le retrait de séchage est déduit des deux mesures précédentes et est considéré comme étant la part de retrait qui est attribuable au départ de l'eau des pores capillaires vers le milieu ambiant. Il s'évalue comme étant la part de retrait qu'il faudrait ajouter au retrait endogène pour obtenir le retrait total en condition de séchage. Les courbes d'évolution du retrait de séchage sont représentées dans la figure II.14.

D'après la figure II.14 on observe un écart de comportement important entre les formules WA et WB vis-à-vis du retrait de séchage. En effet, le mortier WA a un retrait de séchage

beaucoup plus grand que le mortier WB. Dans ce cas, l'ajout du polymère aurait donc pour effet de diminuer le retrait de séchage. Cependant il n'a pas été observé d'écarts significatifs entre les mortiers MA et MB pour lesquels les amplitudes de retrait de dessiccation sont du même ordre de grandeur au cours des 30 jours de séchage.

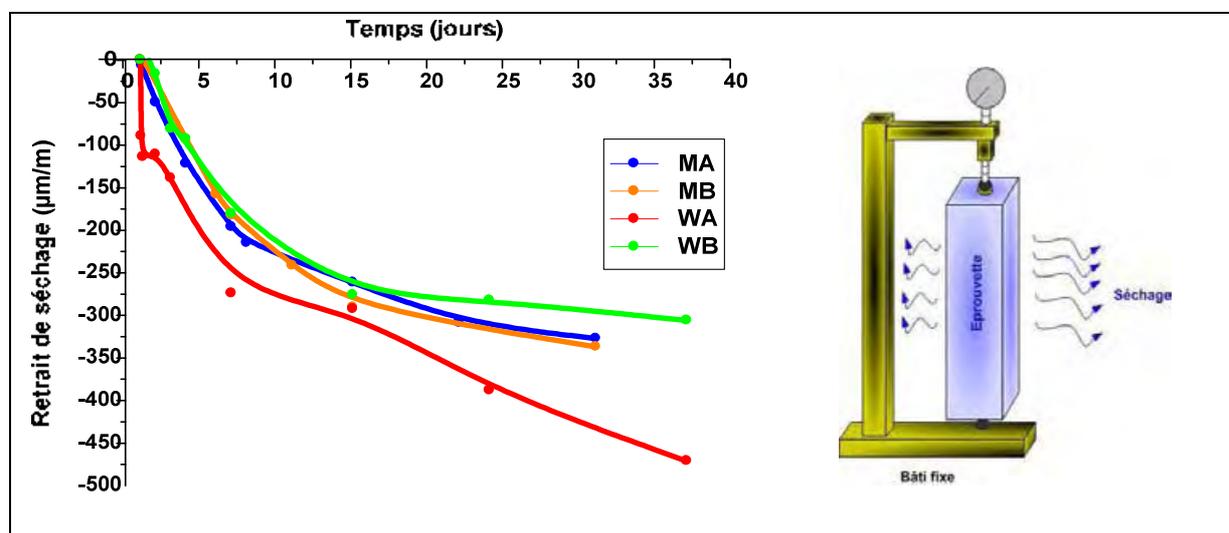


Figure II.14 - Evolution du retrait de séchage des différents mélanges

#### II.2.4 Variations dimensionnelles mesurées à partir du jeune âge

Comme nous l'avons observé dans la partie consacrée à la mesure des variations dimensionnelles en phase durcie des matériaux, il est apparu que cette méthode (NF P 15-433) ne nous permettait pas de mesurer la part des variations dimensionnelles qui ont lieu durant la phase plastique du matériau. Plusieurs techniques permettant de quantifier les variations dimensionnelles des matériaux à l'état frais existent dans la littérature. Plusieurs tests ont été développés par différents chercheurs [Détriché 1983a] [Garcia 2001] [Turcay 2004].

Dans cette étude, la méthode de mesure basée sur l'emploi de jauges extensométriques a été développée et validée. Cette technique permet de noyer directement dans le matériau frais des jauges, afin de mesurer les déformations du matériau depuis sa mise en œuvre. A cet effet, nous avons conçu et fabriqué des jauges pouvant être directement noyées dans le matériau. Les détails de fabrication de ces jauges sont fournis dans l'annexe A.

Les variations dimensionnelles depuis le coulage du matériau ont pu être mesurées. Dans notre cas des moules du commerce en polystyrène de dimensions 40×40×160 mm ont été utilisés. L'avantage de ce type de moule est leur grande déformabilité qui permet au matériau

de se déformer assez librement. Toutefois, ces moules ont un caractère isolant vis-à-vis de la température et les mesures de température effectuées à différentes profondeurs de la couche de mortier n'ont pas révélées de gradients significatifs entre la surface et le cœur du matériau. Le principe de la mesure ainsi que les détails des composantes utilisées sont présentés sur la figure II.15. La jauge est positionnée au centre de l'éprouvette et les mesures se font dans le sens longitudinal.

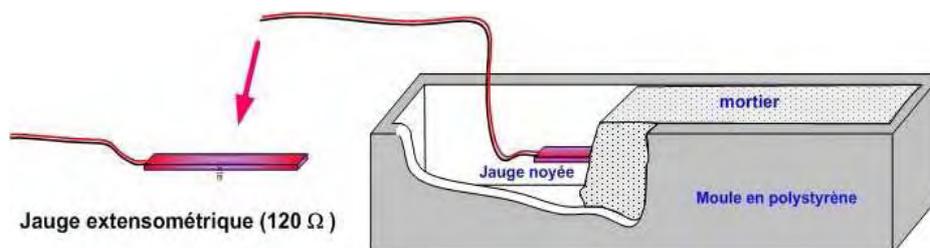


Figure II.15 - Principe de mesure des variations dimensionnelles avec des jauges noyées

#### II.2.4.1 Détermination des pertes en eau des mortiers

Pour la mesure des pertes en eau dues au séchage, les pesées ont été effectuées sur l'ensemble (moule + matériau) dès la mise en place du matériau dans le moule. Contrairement aux mesures précédentes (§ II.2.3.2) les échanges hydriques se font exclusivement par la face supérieure. Les évolutions des pertes en eau des différents mélanges ramenées à la quantité initiale d'eau de gâchage sont présentées sur la figure II.16. Les mesures sont effectuées dans une salle à température et hygrométrie contrôlées (température  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et HR =  $65 \pm 5\%$ ).

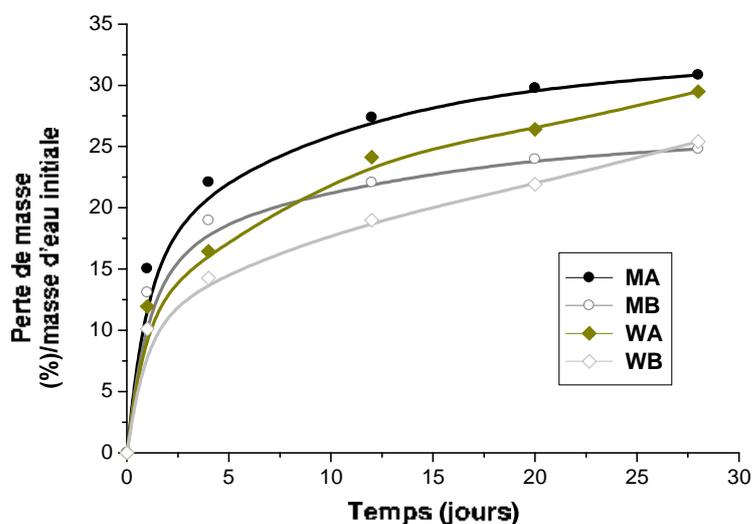


Figure II.16 - Evolution de la perte en eau due au séchage pour les 4 mélanges

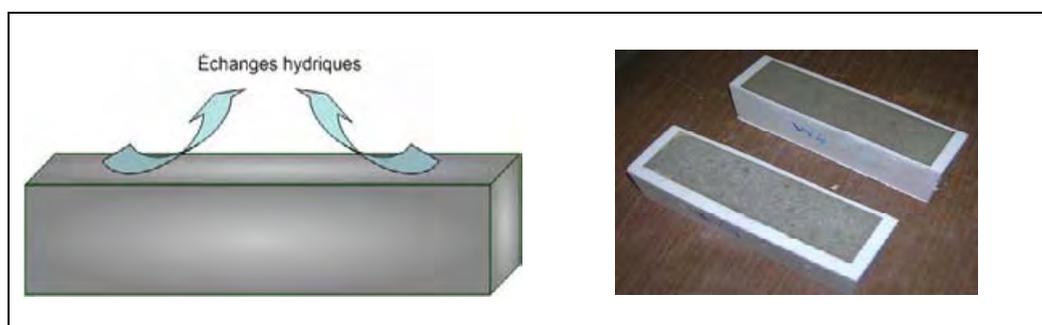
Les résultats présentés sur la figure II.16 montrent que les formules qui contiennent du polymère (MB et WB) ont des pertes en eau moins importantes comparées aux formules classiques (MA et WA). Comme observé précédemment le polymère a un pouvoir de fixation de l'eau contenue dans le réseau poreux du matériau [Pascal 2002]. L'ajout du polymère dans le mélange a pour effet de diminuer la porosité capillaire [Ohama 1997]. On s'attend donc à ce que le retrait en condition de séchage des mélanges (MB et WB) soit moins important que celui des mélanges (MA et WA).

#### II.2.4.2 Les variations dimensionnelles en condition endogène

Pour mesurer les variations dimensionnelles en condition endogène, le matériau a été coulé dans le moule puis l'ensemble a été enveloppé par un film plastique adhésif puis par un papier aluminium auto-adhésif pour empêcher les échanges hydriques entre le matériau et le milieu environnant.

#### II.2.4.3 Les variations dimensionnelles en condition de séchage

Pour mesurer les variations dimensionnelles en condition de séchage, le matériau a été coulé dans le moule en polystyrène puis laissé en séchage libre. Dans ce cas, les échanges hydriques ont lieu entre le matériau et le milieu extérieur par la face supérieure (voir figure II.17).



**Figure II.17** - Conditions d'échanges hydriques entre le matériau et le milieu extérieur

Les courbes d'évolution des variations dimensionnelles en condition endogène et de séchage pour les mortiers MA et MB sont présentées sur la figure II.18. On remarque que quelle que soit la condition de mesure (endogène ou séchage), des variations dimensionnelles se développent dès les premières heures suivant la mise en place du matériau. Les variations dimensionnelles des mortiers en condition endogène sont du même ordre de grandeur. Par contre en conditions de séchage, on observe que le mortier MA, qui ne contient pas de

polymère, développe des variations dimensionnelles supérieures à celles du mortier MB ce qui est cohérent par rapport aux pertes de masse mesurées.

Les courbes d'évolution des variations dimensionnelles en condition endogène et de séchage pour les mortiers WA et WB sont présentées sur la figure II.19. On remarque que quelle que soit la condition de mesure (endogène ou séchage), il se développe dès les premières heures suivant la mise en place du matériau des variations dimensionnelles. On observe ainsi une phase expansive avec de grandes amplitudes de déformations qui se manifestent dès les premières minutes après le coulage. Ces gonflements peuvent être attribués à la formation de l'ettringite qui se forme durant les premières heures d'hydratation et qui s'accompagne ici d'un fort dégagement de chaleur (cf § II.2.5.2). Après cette phase de gonflement, on observe un changement de pente qui est plus ou moins significatif suivant, non seulement le type de matériau, mais aussi les conditions de séchage. Cette phase peut être attribuée au retrait qui se développe dans le réseau poreux du matériau (autodessiccation et séchage) combiné à la baisse de température dans le volume du matériau.

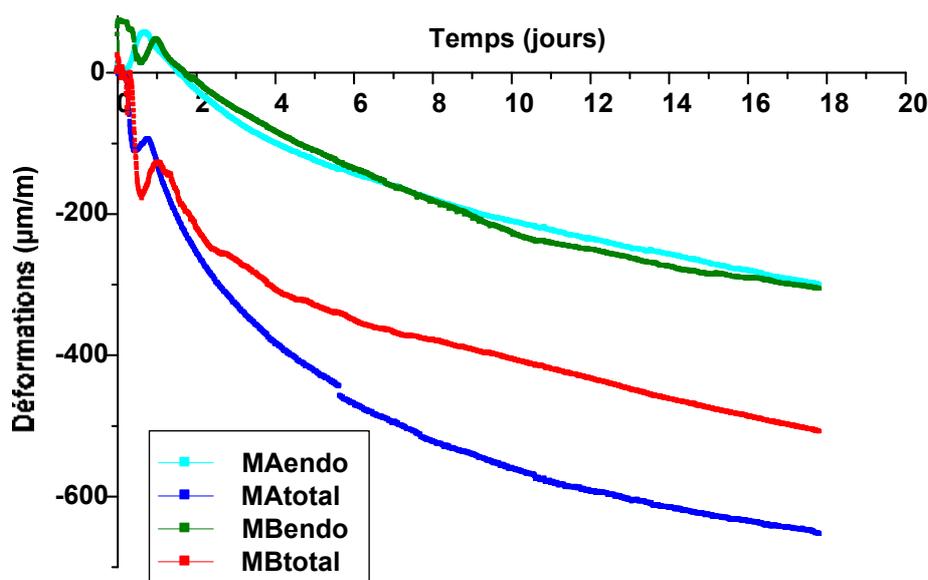


Figure II.18 - Evolution des variations dimensionnelles pour les mortiers MA et MB

Le mortier WB qui contient du polymère développe des variations dimensionnelles de plus forte amplitude que le mortier WA. Néanmoins pour les deux mortiers WA et WB la part des variations dimensionnelles mesurées en condition endogènes est supérieure à la part des variations dimensionnelles totales mesurées en conditions de séchage.

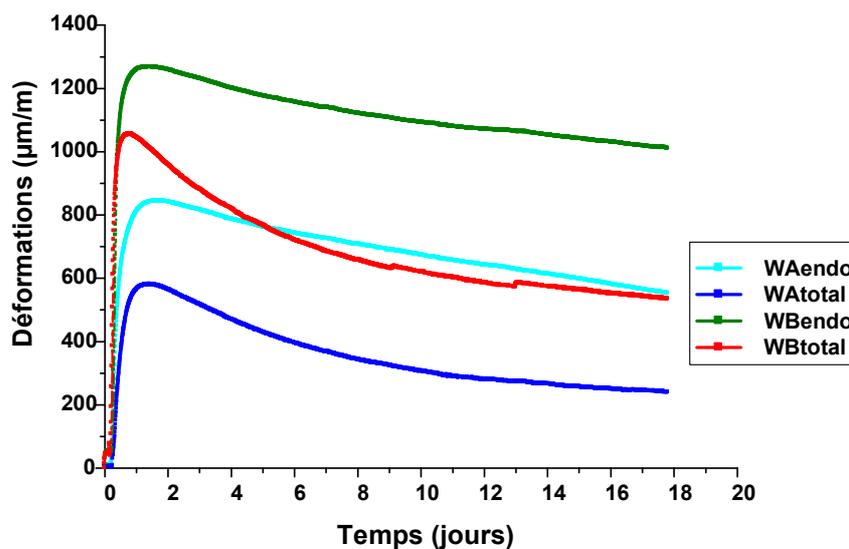


Figure II.19 - Evolution des variations dimensionnelles pour les mortiers WA et WB

## II.2.5 Avancement de l'hydratation

En observant à la fois les courbes d'évolution des variations dimensionnelles et celles des résistances mécaniques, il apparaît que le comportement au jeune âge est fortement influencé par la nature des composants entrant dans la composition de chaque mélange. Nous nous sommes alors intéressés aux paramètres qui caractérisent l'évolution de l'hydratation au jeune âge tels que la conductivité électrique et la quantité de chaleur dissipée lors de l'hydratation de la phase liante.

### II.2.5.1 Conductivité électrique en solution de la phase liante

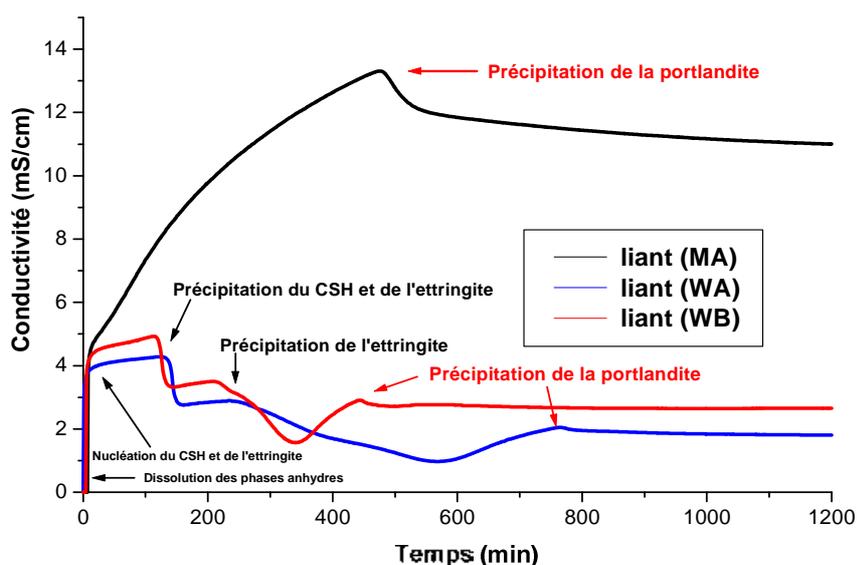
L'hydratation en suspensions diluées peut être suivie par conductimétrie sur des suspensions de matières maintenues sous agitation dans un bain thermostaté [Pourchez 2006] [Pascal 2002]. Le but est d'étudier les phénomènes de dissolution et de précipitation de la phase liante d'un matériau cimentaire.

Dans cette étude, nous avons mesuré la conductivité électrique des phases liantes des mortiers. La suspension, avec un rapport (eau/liant) égal à 40, est placée dans une cellule de conductimétrie. La suspension est maintenue sous agitation pour assurer l'homogénéité. Le passage d'un courant électrique d'une électrode à l'autre permet de mesurer la conductivité de la solution qui dépendra de la concentration et de la nature des ions présents. La dissolution

des espèces en solution se traduit par une augmentation de la conductivité. Par contre la précipitation des espèces se caractérise par une diminution de la conductivité.

La figure II.20 présente les courbes de conductivité obtenues pour les compositions MA, WA et WB. Les mesures ont été effectuées au laboratoire [Weber et Broutin de Servas](#).

Comme on peut l'observer sur la figure II.20 la conductivité de la suspension de liant MA est caractérisée essentiellement par la précipitation de la portlandite qui a lieu au bout de 8 heures après la mise en solution du liant. Par contre la conductivité des suspensions de liants WA et WB se caractérise non seulement par la précipitation de la portlandite, mais aussi des hydrates comme l'ettringite et les CSH. Pour ces mortiers, les précipitations de l'ettringite et du CSH ont lieu 2 heures environ après la mise en solution du liant. On remarque que la précipitation de la portlandite a lieu environ 5 heures plus tôt pour le mortier WB par rapport au mortier WA. L'ajout du polymère dans le mélange aurait donc pour effet d'accélérer la prise du mortier WB.



**Figure II.20** - Conductivité des suspensions de liants des différents mélanges.  
(Mesures effectuées au laboratoire [Weber et Broutin de Servas](#))

### II.2.5.2 Mesure de l'échauffement sur mortiers au moyen de la calorimétrie semi - adiabatique

Les réactions d'hydratation sont essentiellement exothermiques et s'accompagnent d'un dégagement de chaleur important [\[Taylor 1999\]](#).

Dans cette étude, nous avons mesuré l'échauffement des 4 mortiers par calorimétrie semi - adiabatique avec une bouteille de Langavant. Les courbes de température obtenues sont présentées sur la figure II.21.

On remarque clairement que les mortiers WA et WB ont une réactivité plus importante que les mortiers MA et MB. De plus, l'ajout du polymère améliore la réactivité du mélange WB. Cette constatation est en accord avec les observations qui ont été faites sur l'étude conductimétrique en solution des mélanges WA et WB. Dans le même temps, lorsqu'on observe les courbes d'échauffement des mélanges MA et MB, on constate que la réactivité du mélange MB diminue comparée à celle du mortier MA. Dans ce cas, l'ajout du polymère a pour effet de diminuer la réactivité des mélanges à base de ciment Portland. Ce phénomène a été constaté par d'autres auteurs [Pascal 2002] [Ohama 1998].

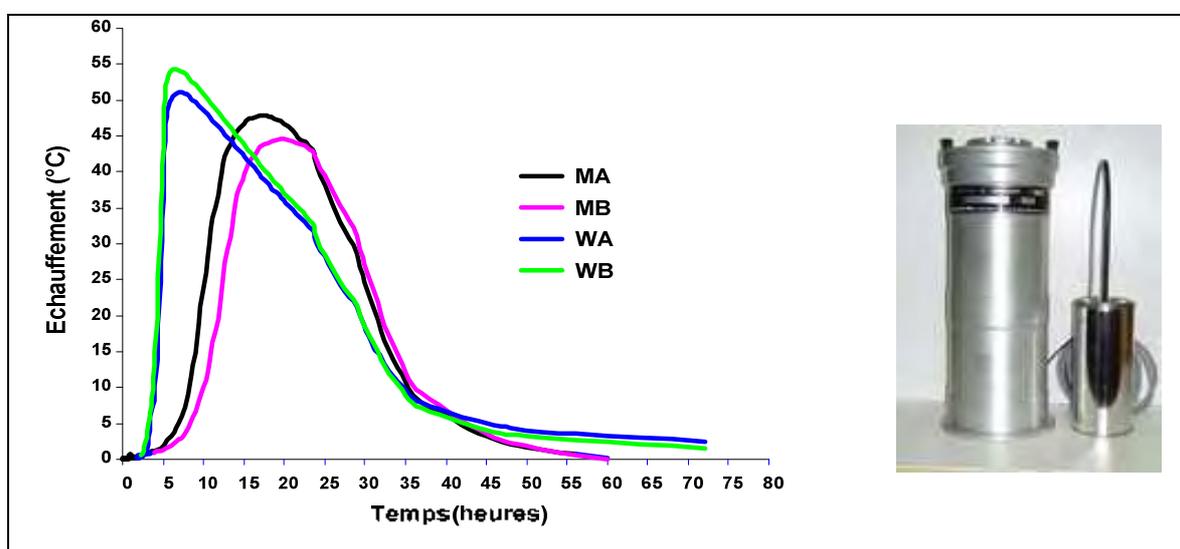


Figure II.21- Courbes d'échauffement thermique mesuré sur les quatre mélanges

### II.3 Caractérisation des gradients de propriétés dans la couche de mortier

Dans cette section, nous allons nous intéresser aux différents types de gradients qui sont générés par le séchage non uniforme de la couche de mortier. Dans la partie I, nous avons noté que le séchage a une grande influence sur le comportement sur site des couches minces de mortiers. Cette influence se traduit essentiellement par les variations dimensionnelles induites par les gradients d'humidité. En effet, ces applications présentent une particularité en ce sens que le rapport surface de séchage par rapport au volume du matériau est grand, ce qui favorise l'évaporation générant ainsi des mouvements d'eau importants dans la couche de mortier [Détriché 1983a]. D'après Grasley [Grasley 2002], les conditions de mise en place et

de conservation, en relation avec les formulations, peuvent induire de fortes hétérogénéités dans le volume du matériau. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la caractérisation et la quantification des gradients de propriétés tels que les gradients hydriques, les gradients d'hydratation et les gradients de contraintes. Pour finir nous avons étudié leur impact sur l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux.

### II.3.1 Les techniques utilisées pour la caractérisation des gradients de propriétés

#### II.3.1.1 La méthode des tranches

Cette technique consiste à prélever par carottage et par sciage des tranches de matériau sur l'épaisseur de la couche de mortier ou de béton durci et à en mesurer les propriétés. Dans notre cas, la méthode d'échantillonnage consiste à couler des éprouvettes prismatiques de  $40 \times 40 \times 160$  mm (3 par mélanges et par échéance). Au moment du démoulage du matériau, les éprouvettes sont imperméabilisées sur leurs cinq faces à l'aide du papier aluminium auto-adhésif et seule la face supérieure est laissée libre au séchage (voir figure II.22). A une échéance donnée, on prélève par sciage sur chaque éprouvette une carotte sur toute l'épaisseur du matériau. Cette carotte est ensuite découpée en tranches d'épaisseurs variables suivant la nature du test effectué. Les prélèvements sont effectués une seule fois sur chaque éprouvette.

Dans cette étude, nous avons effectué des mesures de porosité, de teneur en eau libre et liée sur des tranches de mortiers. Il est alors possible de reconstituer les profils de teneur en eau et de porosité d'une carotte de mortier en faisant l'hypothèse que son épaisseur correspond à la somme des épaisseurs de chaque tranche [Molez 2003].

L'ensemble des essais de caractérisation ainsi que les géométries utilisées sont présentés sur le tableau II.7.

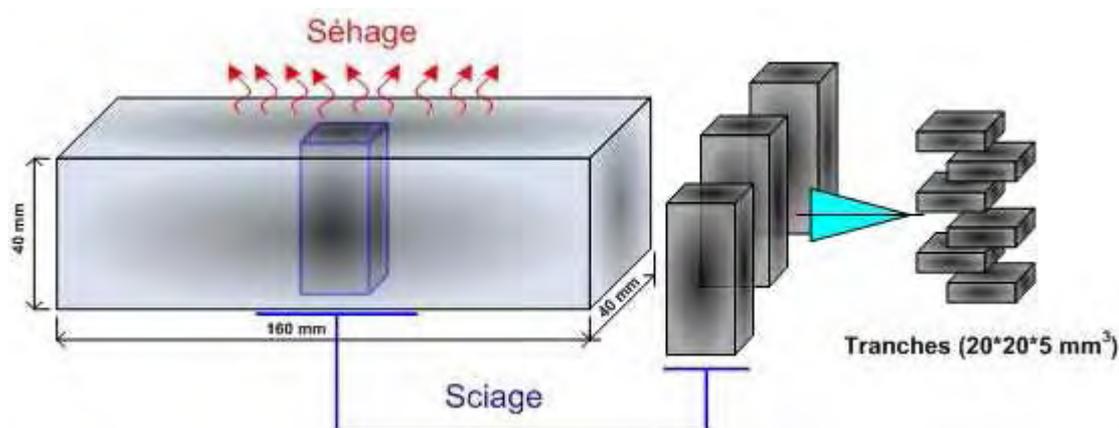
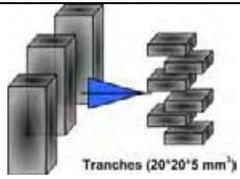
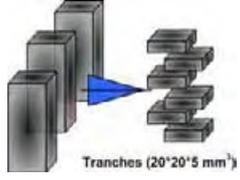
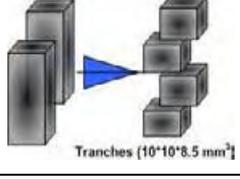


Figure II.22 - Principe d'échantillonnage des tranches de mortier

**Tableau II.7** - Caractérisation des gradients de propriétés au moyen de la méthode des tranches

Mesures	Nombre de tranches	Nombre de mesures/tranche	Echéances de mesure			
			3 jours	7 jours	28 jours	
Teneur en eau libre	 Tranches (20*20*5 mm <sup>3</sup> )	6	3	×	×	×
Teneur en eau liée	 Tranches (20*20*5 mm <sup>3</sup> )	6	3	×	×	×
Porosités	 Tranches (10*10*8.5 mm <sup>3</sup> )	4	2	-	-	×

### II.3.1.1.1 Les gradients hydriques (eau libre et eau des hydrates)

La caractérisation des gradients hydriques sur l'épaisseur de la couche de mortier consiste à suivre l'évolution dans le temps de la teneur en eau de tranches de mortier obtenues par sciage suivant la direction de séchage. Afin de modifier le moins possible l'état hydrique du matériau, le sciage des éprouvettes et des tranches est effectué à sec [Carré 2005] [LCPC 2002]. Les teneurs en eau libre sont obtenues par séchage à l'étuve. Le principe consiste à déterminer à une échéance donnée la perte de masse d'un échantillon soumis à un étuvage à 80°C ou 105°C. L'eau enlevée lors de l'étuvage est celle contenue dans les pores du matériau (eau libre). Pour le cas des mortiers MA et MB, l'eau libre est considérée comme celle s'évaporant à 105°C alors que pour les mortiers WA et WB, l'eau libre est considérée comme celle qui s'évapore à 80°C <sup>1</sup>

$$(\%)_{\text{eau-libre}} = \frac{(M_{\text{mortier}} - M_{(80-105)^{\circ}\text{C}})}{M_{\text{mortier}}} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

<sup>1</sup> [Bertron 2004] : Pour des températures > 80°C, on risque une déshydratation partielle de l'ettringite, des aluminates de calcium hydratés et les C-S-H

De la même façon, les teneurs en eau des hydrates sont obtenues par perte au feu sur des tranches de mortier soumises à un étuvage de 550°C. L'eau chimiquement liée est considérée comme étant l'eau enlevée lors de l'étuvage à 550°C sans la quantité d'eau libre.

$$(\%)_{\text{eau-liée}} = \frac{(M_{(80-105)^{\circ}\text{C}} - M_{550^{\circ}\text{C}})}{M_{(80-105)^{\circ}\text{C}}} \times 100 \quad (\text{II.2})$$

### II.3.1.1.2 Les gradients de porosité

Les gradients de porosité sur l'épaisseur de la couche de mortier ont été caractérisés par des mesures de porosité par intrusion de mercure. Le principe consiste à caractériser à une échéance donnée la structure poreuse de tranches de mortier obtenues par sciage suivant la direction de séchage [LCPC 2002]. Afin de modifier le moins possible l'état hydrique du matériau, le sciage est effectué à sec.

#### La porosimétrie par intrusion de mercure

Afin de mesurer l'impact du séchage sur la structuration de la pâte de ciment, des essais de porosimétrie par intrusion de mercure ont été réalisés sur des tranches de mortiers de 10×10×8,5 mm âgés de 28 jours. Les tranches de mortiers sont prélevées par sciage sur des éprouvettes 40×40×160 mm âgées de 28 jours. Le test permet de déterminer la porosité ainsi que la distribution en taille des pores des différents mortiers. Le principe est d'injecter du mercure sous pression (fluide non mouillant) dans le matériau préalablement dégazé. Le volume de mercure injecté correspond au volume cumulé des pores accessibles au mercure pour une pression donnée. La pression capillaire appliquée  $P$  est reliée au rayon d'accès aux pores  $r_p$  par la loi de Laplace :

$$P = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_p} \quad (\text{II.3})$$

avec

$P$  : pression capillaire

$r_p$  : le rayon du pore

$\sigma$  : tension superficielle du fluide

$\theta$  : angle de contact capillaire solide – fluide.

### II.3.1.2 La technique des jauges noyées

La caractérisation des gradients de déformations sur l'épaisseur de la couche de mortier consiste à suivre l'évolution des variations dimensionnelles du matériau depuis sa mise en œuvre. La technique consiste à noyer des jauges dans l'épaisseur de l'enduit à des profondeurs variables par rapport à la surface de séchage dans notre cas 5mm, 10mm, 20mm et 35mm. Les détails du test et la géométrie des éprouvettes utilisées sont présentés sur la figure II.23.

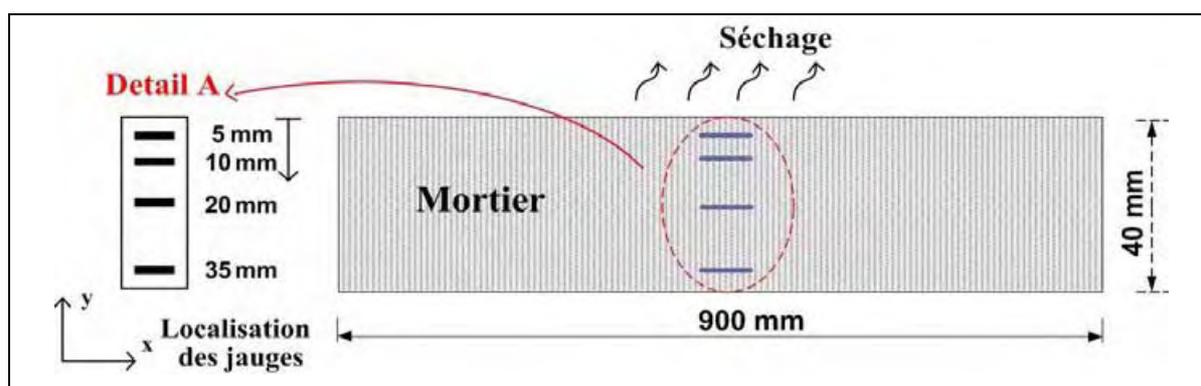


Figure II.23 - Détails du test et principe de la mesure des déformations dans la couche de mortier

## II.3.2 Résultats

Nous présentons ici les résultats des gradients de propriétés mesurés le long de la couche de mortier. Par la suite, les profils des teneurs en eau, d'hydratation et de porosité dans la couche de mortier sont présentés.

### II.3.2.1 Les teneurs en eau mesurées sur tranches de mortiers

Les pertes en eau ont été déterminées au moyen de la méthode des tranches sur les mortiers à des échéances de 3, 7 et 28 jours. Les tableaux II.8 à II.11 présentent des exemples de résultats de pertes au feu obtenus à 7 jours sur des tranches de mortiers. La teneur en eau affichée est la moyenne de trois mesures effectuées sur des carottes provenant de trois échantillons différents d'un même mortier.

#### - Cas des mortiers MA et WA

Les exemples de valeurs des pertes de masse à 80°C, 105°C mesurées à 7 jours sur des tranches de mortiers MA et WA sont données dans les tableaux II.8 et II.9 respectivement.

**Tableau II.8** - Pertes de masse mesurées sur des tranches de mortier MA à 7 jours

Tranches	105°C		Eau liée (%)
	Moyenne des pertes de masse (%)	Coefficient de variation (%)	
0 - 5 mm	5,38	7,62	2,81
7 mm - 12 mm	6,26	0,56	3,72
14 mm - 19 mm	6,62	0,87	4,02
21 mm - 26 mm	6,65	0,2	4,12
28 mm - 33 mm	6,77	2,1	4,20
35 mm - 40 mm	6,19	1,3	3,76

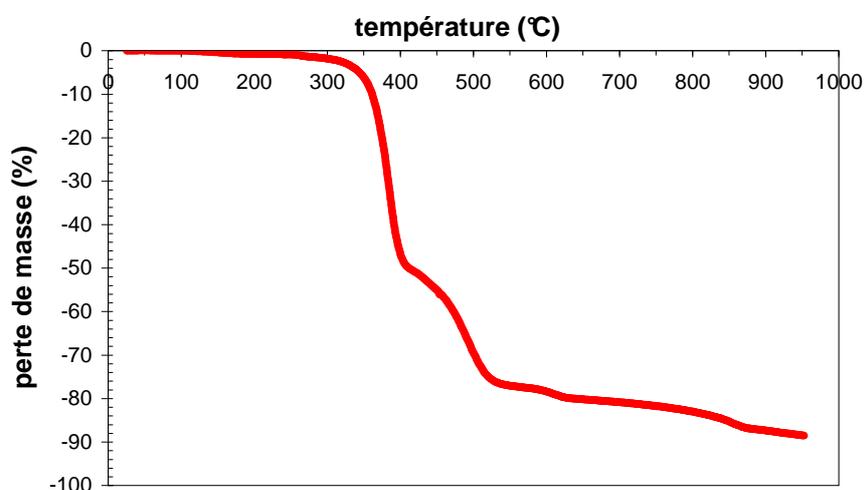
**Tableau II.9** - Pertes de masse mesurées sur des tranches de mortier WA à 7 jours

Tranches	105°C		Eau liée (%)
	Moyenne des pertes de masse (%)	Coefficient de variation (%)	
0 - 5 mm	6,66	1,49	4,9
7 mm - 12 mm	11,02	2,38	5,5
14 mm - 19 mm	12,07	1,28	5,8
21 mm - 26 mm	12,13	0,6	5,9
28 mm - 33 mm	12,37	1,5	5,8
35 mm - 40 mm	11,83	0,4	5,6

### - Cas des mortiers MB et WB

Pour les mortiers MB et WB qui contiennent du polymère, une analyse thermogravimétrique (ATG) est effectuée au préalable afin de savoir si la perte de masse lors de l'étuvage est attribuable uniquement au départ de l'eau ou si elle peut être liée à la décomposition du polymère.

La courbe de l'ATG effectuée est représentée sur la figure II.24.

**Figure II.24** - Analyse thermogravimétrique effectuée sur du polymère

On remarque que la perte de masse du polymère a lieu pour des températures supérieures à 200°C, donc les pertes de masse obtenues lors de l'étuvage à 80°C et 105°C sont attribuables uniquement au départ d'eau, en grande partie de l'eau libre [LCPC 2002]. La perte de masse du polymère est de l'ordre de 80% pour des températures avoisinant les 550 °C. Pour les pertes au feu à 550°C la prise en compte du départ du polymère se fait en corrigeant la perte de masse, ici on minore de 3.6 % la masse de l'échantillon étuvé (voir figure II.24).

Les tableaux II.10 et II.11 récapitulent par exemple les valeurs des pertes de masse obtenues à 7 jours sur tranches de mortiers MB et WB après étuvage à 80°C et 105°C. On observe également une faible dispersion des mesures.

A la lecture des tableaux II.8 à II.11, on remarque que les teneurs en eau libre et en eau chimiquement liée varient significativement au voisinage de la surface de séchage où les pertes en eau sont les plus importantes. On remarque également que les teneurs en eau liée sont faibles au voisinage de la surface de séchage en comparaison avec le cœur du matériau. Le séchage a donc une influence non négligeable sur l'évolution du front d'hydratation dans les couches minces de mortier.

**Tableau II.10** - Pertes de masse mesurées sur des tranches de mortier MB à 7 jours

Tranches	105°C		Eau liée (%)
	Moyenne des pertes de masse (%)	Coefficient de variation (%)	
0 - 5 mm	5,99	1,4	3,36
7 mm - 12 mm	6,87	0,13	3,57
14 mm - 19 mm	7,06	1,3	4,0
21 mm - 26 mm	7,29	0,18	4,1
28 mm - 33 mm	7,28	0,97	3,96
35 mm - 40 mm	6,93	2,9	3,56

**Tableau II.11** - Pertes de masse mesurées sur des tranches de mortier WB à 7 jours

Tranches	80°C		Eau liée (%)
	Moyenne des pertes de masse (%)	Coefficient de variation (%)	
0 - 5 mm	7,51	1	5,2
7 mm - 12 mm	11,52	0,9	5,9
14 mm - 19 mm	12,2	0,92	6,1
21 mm - 26 mm	12,4	0,11	6,2
28 mm - 33 mm	12,69	0,79	6,1
35 mm - 40 mm	12,36	2,05	6,01

### II.3.2.2 Distribution poreuse des mortiers

Les résultats de porosité au mercure à 28 jours obtenus sont présentés dans les tableaux II.12 à II.15. Ces résultats montrent que les mortiers MB et WB présentent une porosité plus faible que les mortiers MA et WA sans polymère.

**Tableau II.12** - Résultats des tests de porosimétrie pour le mortier MA

Tranches de mortiers	0 – 8,5 mm	10,5 mm – 19 mm	21 mm – 29,5 mm	31,5 mm – 40 mm
Porosité Hg (%)	13,56	12,035	12,55	12,66
	Répartition du volume poreux en fonction de la taille des pores (%)			
Taille des pores :				
> 1 µm	14	7,82	3,86	5,58
1 µm – 0,01 µm	79	82,66	84,13	84,17
< 0,01 µm	6,6	9,51	12	10,24

**Tableau II.13** - Résultats des tests de porosimétrie pour le mortier MB

Tranches de mortiers	0 – 8,5 mm	10,5 mm – 19 mm	21 mm – 29,5 mm	31,5 mm – 40 mm
Porosité Hg (%)	13,26	12,31	11,85	12,07
	Répartition du volume poreux en fonction de la taille des pores (%)			
Taille des pores :				
> 1 µm	6,87	6,74	6,64	7,68
1 µm – 0,01 µm	85	78,8	79,3	79,7
< 0,01 µm	7,9	14,4	14,03	12,52

**Tableau II.14** - Résultats des tests de porosimétrie pour le mortier WA

Tranches de mortiers	0 – 8,5 mm	10,5 mm – 19 mm	21 mm – 29,5 mm	31,5 mm – 40 mm
Porosité Hg (%)	24,76	17,5	15,82	15,92
	Répartition du volume poreux en fonction de la taille des pores (%)			
Taille des pores :				
> 1 µm	13,53	7,12	4,51	4,51
1 µm – 0,01 µm	79,76	87,67	89,1	90,21
< 0,01 µm	6,71	5,2	7,4	5,28

**Tableau II.15** - Résultats des tests de porosimétrie pour le mortier WB

Tranches de mortiers	0 – 8,5 mm	10,5 mm – 19 mm	21 mm – 29,5 mm	31,5 mm – 40 mm
Porosité Hg (%)	20,56	16,64	17,26	16,16
	Répartition du volume poreux en fonction de la taille des pores (%)			
Taille des pores :				
> 1 µm	6,59	5,73	4,11	4,11
1 µm – 0,01 µm	84,14	84,46	84,35	85,7
< 0,01 µm	9,26	9,8	11,53	10,18

A la lecture des tableaux, on constate que pour tous les mortiers, la porosité varie sensiblement entre la surface de séchage et le cœur du matériau. Au voisinage de la surface, le volume poreux est plus élevé comparé au cœur du matériau.

Les distributions des tailles de pores obtenues pour les quatre mortiers sont données dans la figure II.25.

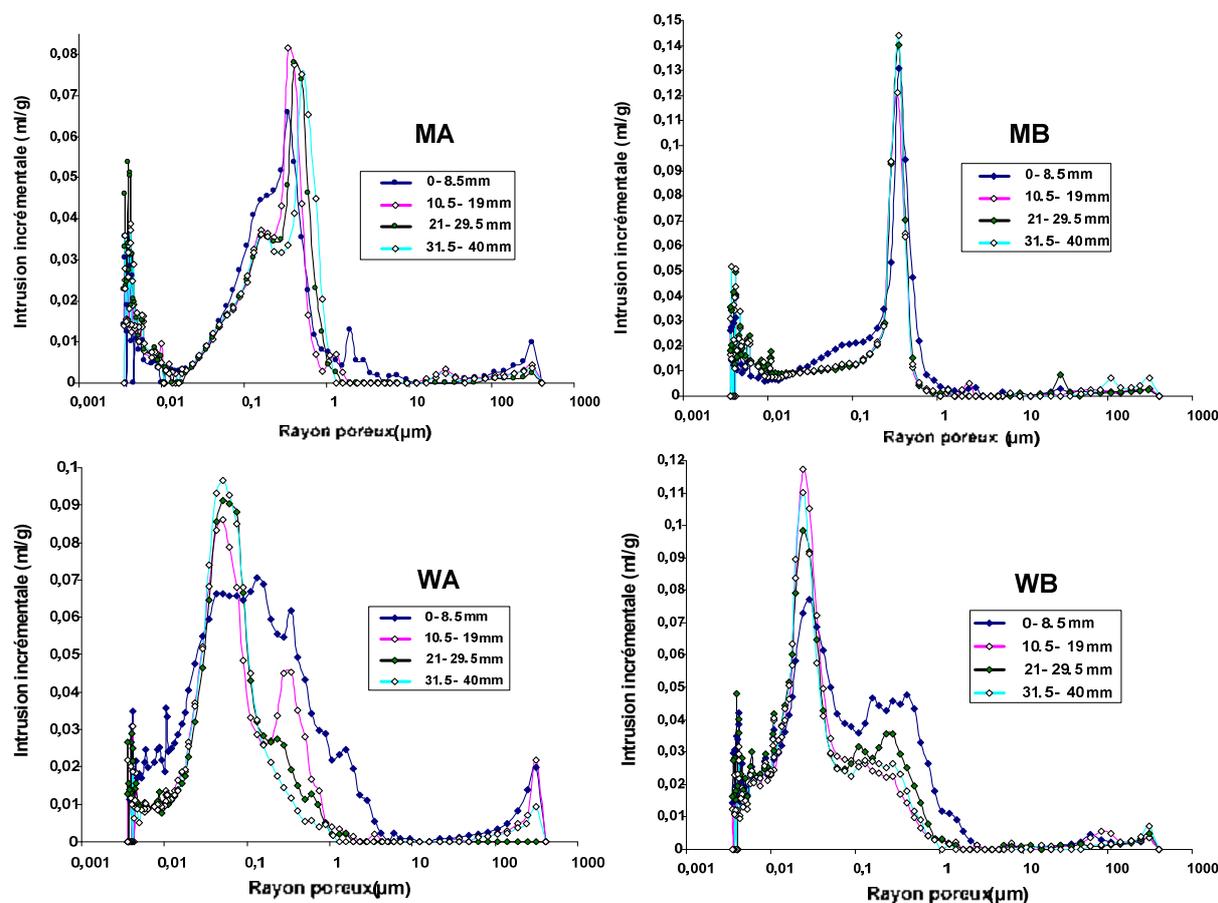


Figure II.25 - Distribution poreuse des mortiers âgés de 28 jours

Nous remarquons que les formules MA et WA ont une distribution poreuse plus étalée que les formules MB et WB qui contiennent du polymère. En effet, nous observons que les spectres de porosité des mortiers MA et WA présentent quatre pics essentiels :

- le pic situé entre 0,05 et 0,3  $\mu\text{m}$  pour la formule MA (respectivement 0,03 et 0,1  $\mu\text{m}$  pour la formule WA), ce domaine poreux diminue (respectivement augmente pour le mortier WA) au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface de séchage,
- le pic situé dans le domaine des pores compris entre 0,3 et 1  $\mu\text{m}$  pour le mortier MA (respectivement 0,1 et 0,5  $\mu\text{m}$  pour le mortier WA), ce domaine poreux augmente (respectivement diminue pour le mortier WA) au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface de séchage,

- le pic situé dans le domaine des pores compris entre 1 et 3  $\mu\text{m}$  pour le mortier MA (respectivement 1 et 2  $\mu\text{m}$  pour la formule WA), ce domaine poreux présent pour la tranche (0 – 8,5 mm), est pratiquement inexistant pour les trois autres tranches. La porosité s'affine en profondeur pour les mortiers MA et WA,

- le pic situé dans le domaine des pores compris entre 100 et 400  $\mu\text{m}$ , ce domaine poreux peut être attribué aux macropores formés par les bulles d'air, les gros capillaires ainsi que la microfissuration induite par le séchage et la préparation des échantillons (surtout au voisinage de la surface de séchage) [Baroguel 1994] ; dans certains cas, ce domaine poreux est souvent apparenté à des artefacts de mesures [Balayssac 1992].

Nous remarquons, pour la formulation MB une porosité essentiellement resserrée en un pic situé entre 0,3 et 0,5  $\mu\text{m}$ . En dehors de la tranche supérieure pour laquelle on observe toujours un pic plus important dans la zone des 0,1  $\mu\text{m}$ , les spectres de porosité des trois autres tranches sont pratiquement identiques.

La distribution poreuse de la formulation WB est plus resserrée autour de deux pics essentiels:

- le pic situé entre 0,01 et 0,04  $\mu\text{m}$ , ce domaine poreux augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface de séchage,

- le pic situé dans le domaine des pores compris entre 0,1 et 0,7  $\mu\text{m}$ , ce domaine poreux diminue en volume au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface de séchage.

En conclusion, nous remarquons que l'ajout du polymère a pour effet de diminuer la porosité dans le domaine des pores de taille supérieure à 1  $\mu\text{m}$  tout en augmentant la porosité dans le domaine des pores situés entre 0,01 et 1  $\mu\text{m}$ .

### **II.3.2.3 Evolution des variations dimensionnelles dans la couche de mortier**

Le but est de mettre en évidence l'existence des hétérogénéités en terme de variations dimensionnelles dans la couche de mortier, sous l'influence du séchage et de l'hydratation qui entraînent des déformations de retrait [Mounanga 2003].

Les mesures ont été effectuées sur des éprouvettes de mortier de dimensions 900×50×40 mm. Les faces intérieures du moule utilisé sont recouvertes d'une couche de téflon pour minimiser

les frottements entre le matériau et les parois du moule. Les mesures sont faites dans une salle à température et hygrométrie contrôlée (température  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , Humidité relative  $65 \pm 5\%$ ).

Les courbes d'évolution des variations dimensionnelles des formulations MA et MB sont présentées dans les figures II.26 et II.27. Il faut noter que les déformations mesurées sont de signe négatif lorsque la jauge subit un raccourcissement (retrait du mortier) et à l'inverse, elles sont de signe positif lorsque la jauge subit une elongation (expansion du matériau).

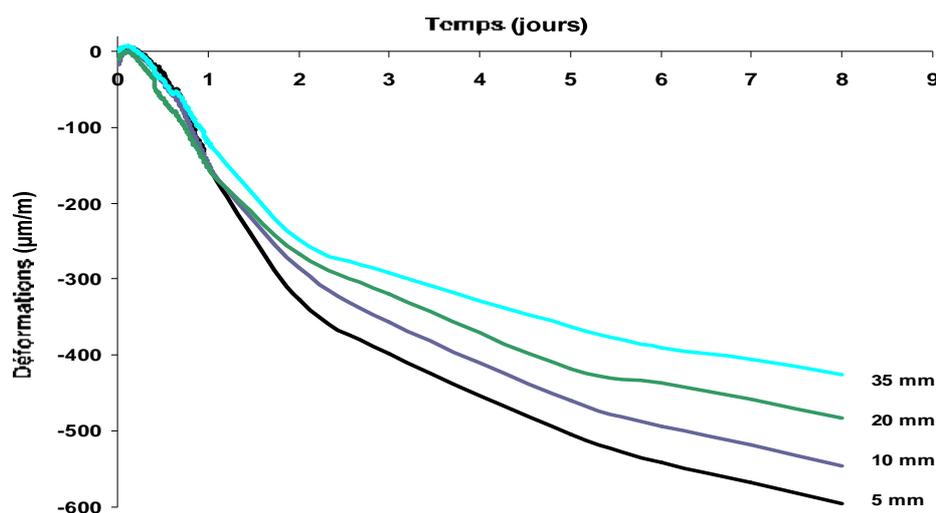


Figure II.26 - Evolution des variations dimensionnelles sur l'épaisseur de la couche de mortier MA

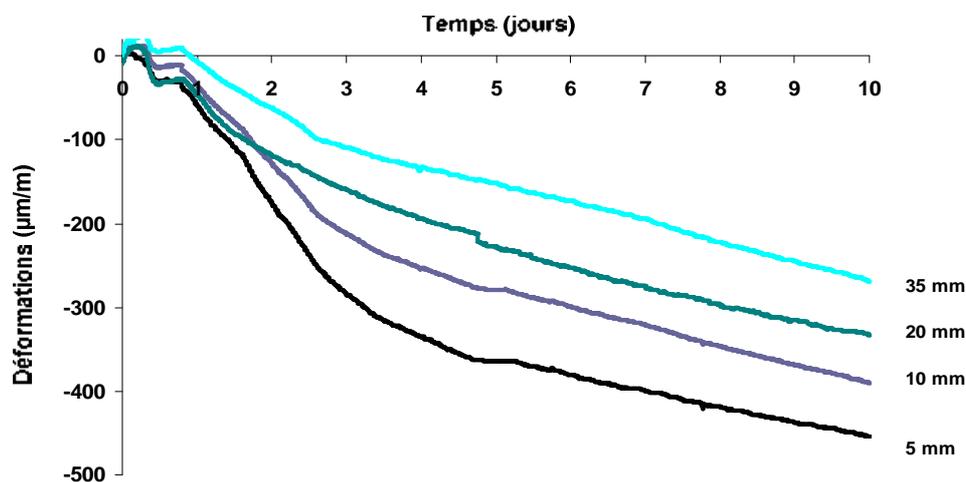


Figure II.27 - Evolution des variations dimensionnelles sur l'épaisseur de la couche de mortier MB

Comme nous l'avons déjà constaté dans la partie consacrée aux mesures du retrait libre par la techniques des jauges noyées sur des éprouvettes  $40 \times 40 \times 160$  mm, les mortiers MA et MB produisent essentiellement du retrait. Ce retrait est beaucoup plus accentué au voisinage de la

surface exposée au séchage que dans le cœur du matériau. Nous remarquons qu'il existe un gradient de déformations significatif entre la surface et le cœur du matériau. Par ailleurs, le mortier MB développe des déformations plus faibles que le mortier MA.

Les courbes d'évolution des variations dimensionnelles des formulations WA et WB sont présentées dans les figures II.28 et II.29.

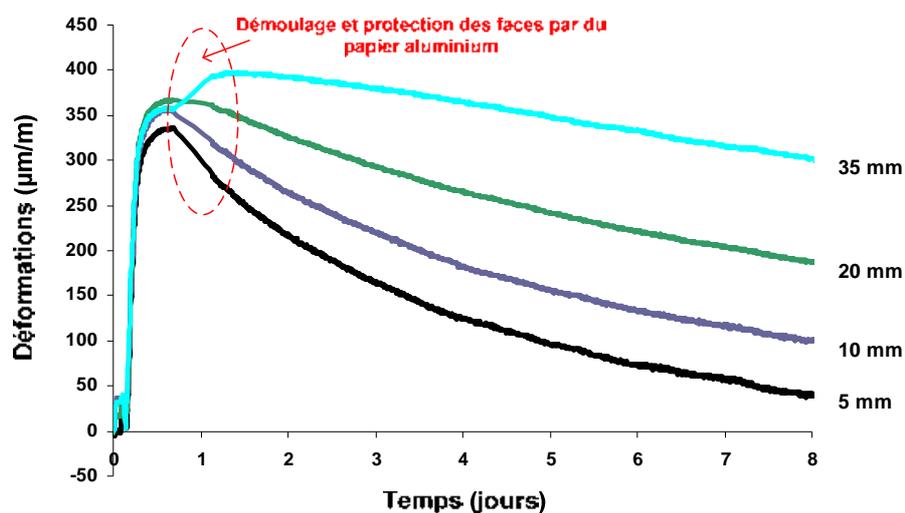


Figure II.28 - Evolution des variations dimensionnelles sur l'épaisseur de la couche de mortier WA

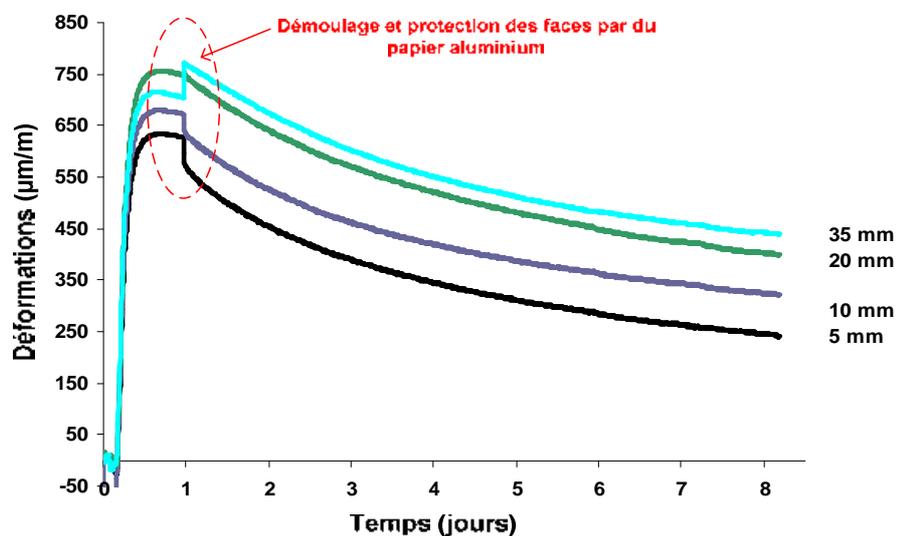


Figure II.29 - Evolution des variations dimensionnelles sur l'épaisseur de la couche de mortier WB

Pour les mortiers WA et WB, on remarque que l'évolution des variations dimensionnelles comporte deux phases essentielles. Tout d'abord une phase d'expansion de très forte amplitude qui s'opère durant les premières heures suivant le moulage. Cette phase d'expansion peut être attribuée à la formation de la microstructure (essentiellement de

l'ettringite). Cette phase est caractérisée par une augmentation rapide des résistances mécaniques [Scrivener 1999]. S'ensuit alors une phase (qu'on peut qualifier de phase de retrait) au cours de laquelle les effets du séchage deviennent prépondérants. On remarque que plus on est proche de la surface de séchage, moins les variations dimensionnelles sont importantes.

En conclusion, nous remarquons que dans le cas des mortiers à base de ciment portland l'ajout du polymère dans la matrice a pour effet de diminuer les variations dimensionnelles. Ceci est tout à fait compréhensible car la porosité capillaire du mortier MB est inférieure à celle de la formulation MA. En plus, la rétention d'eau se trouve améliorée par l'ajout du polymère.

Par contre dans le cas des mortiers à base de liant ternaire (WA et WB), les variations dimensionnelles augmentent avec l'ajout du polymère, surtout dans la phase expansive qui peut être le résultat d'une meilleure hydratation (étude conductimétrique et calorimétrique).

Quel que soit le type de mortier, on remarque que le matériau ne se comporte pas de la même façon sur toute son épaisseur. Il existe bien des gradients de déformations dans la couche du matériau, résultant de la combinaison de plusieurs phénomènes tels que l'hydratation non uniforme et dans une moindre mesure la différence de température entre la surface et le cœur du matériau.

### II.3.3 Les profils de teneur en eau évaporable dans la couche de mortier

Les profils de teneur en eau des 4 formulations à différentes échéances sont présentés sur la figure II.30. Chaque point représente la moyenne de trois essais.

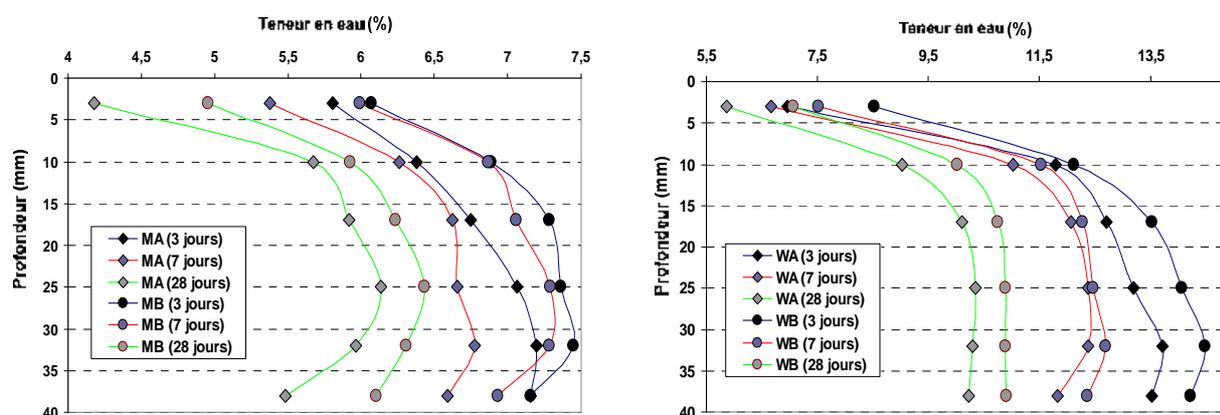


Figure II.30 - Evolution des profils de teneur en eau évaporable sur la couche de mortier

Nous pouvons clairement observer la pénétration du front de séchage dans la couche de mortier depuis la surface de séchage. On remarque que le séchage affecte de façon plus marquée le quart supérieur de la couche de mortier avec des gradients de teneur en eau assez significatifs. On observe dans le même temps un gradient des teneurs en eau libre au voisinage de l'interface surtout pour les mortiers MA et MB ; ce phénomène peut être attribué à la différence de texture de cette zone comparée au reste de la couche. On voit également que la teneur en eau libre dans la couche de mortier augmente avec l'ajout du polymère.

### II.3.4 Les profils d'hydratation en eau liée dans la couche de mortier

Les profils d'hydratation sont mis en évidence par la distribution des teneurs en eau chimiquement liée dans la couche de mortier [Carré 2005]. Les profils de teneur en eau liée sont représentés sur la figure II.31. En observant l'évolution des courbes, on peut voir l'évolution des profils d'hydratation dans la couche de mortier depuis la surface de séchage. On remarque également que le séchage affecte de façon plus marquée le quart supérieur de la couche de mortier où les gradients des teneurs en eau liée sont importants et ce dès le plus jeune âge. Dans le cas des mortiers WA et WB, on voit clairement que la teneur en eau liée dans la couche de mortier augmente sensiblement avec l'ajout du polymère. Ceci est à mettre en relation avec une meilleure hydratation pour ce type de mélange.

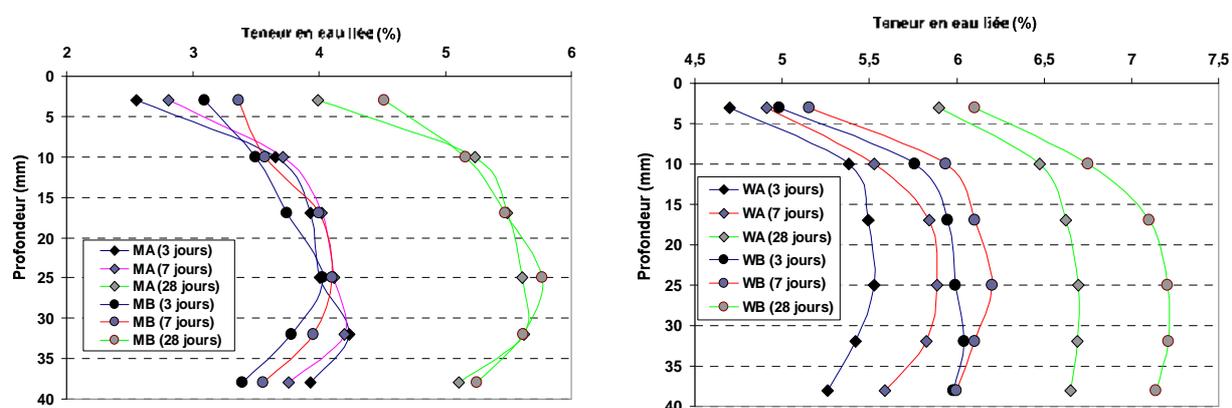


Figure II.31 - Evolution des profils d'hydratation en eau liée sur la couche de mortier

### II.3.5 Les profils de porosité dans la couche de mortier

Les profils de porosité à l'âge de 28 jours des 4 formulations sont présentés sur la figure II.32. On remarque comme dans le cas des teneurs en eau, que le séchage affecte beaucoup plus le quart supérieur de la couche de mortier où les porosités sont plus importantes. On observe également que la porosité dans la couche de mortier diminue avec l'ajout du polymère surtout dans sa moitié supérieure.

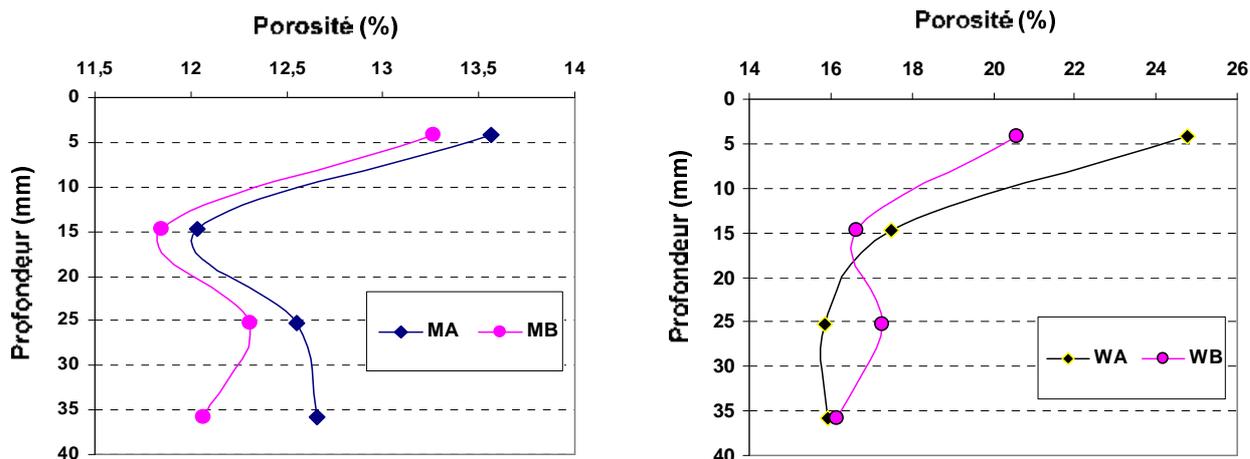


Figure II.32 - Profils de porosité à 28 jours sur la couche de mortier

### II.3.6 Les profils de variations dimensionnelles dans la couche de mortier

Les profils de variations dimensionnelles à 3 et 7 jours pour les 4 mortiers sont présentés sur la figure II.33. Pour le cas des mortiers MA et MB, on remarque que les déformations sont plus importantes au voisinage de la surface de séchage. Ces déformations diminuent progressivement à mesure que l'on s'éloigne de la face séchée. Pour les mortiers WA et WB, les déformations sont plus grandes dans le cœur du matériau (zone où l'échauffement est plus important).

Comme on peut le voir sur la figure II.33, on remarque que l'ajout du polymère diminue les déformations dans le cas des mélanges à base de ciment Portland. Par contre pour le cas des mélanges à base ternaire, l'amplitude des variations dimensionnelles augmente avec l'ajout du polymère.

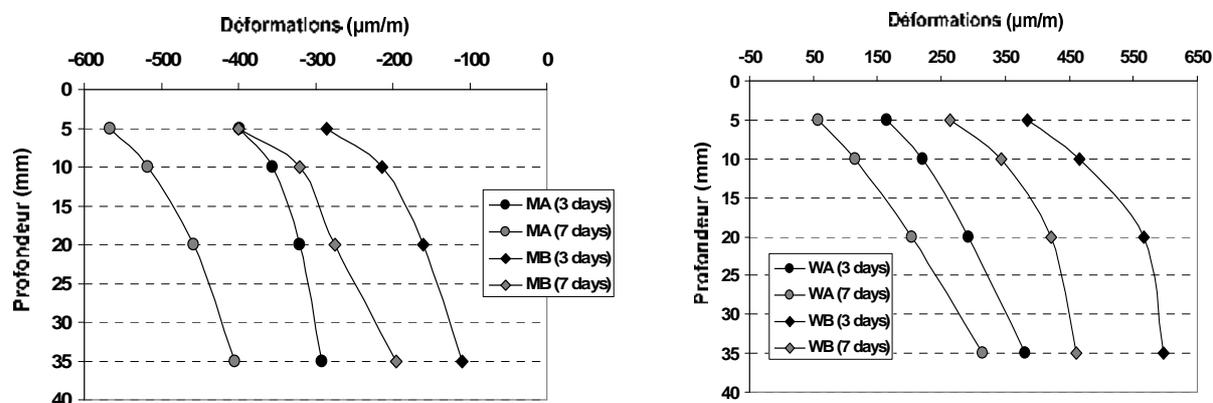


Figure II.33 - Profils des déformations à 3 et 7 jours sur la couche de mortier

### **II.3.7 Conclusion**

Dans cette section, nous avons décrit les procédures de caractérisation des gradients de propriétés induits par le séchage dans une couche de mortier. Dans un premier temps, les gradients des teneurs en eau libre et chimiquement liée ont été mis en évidence au moyen de la méthode des tranches. Il apparaît clairement que la progression du front de séchage dans la couche de mortier a non seulement une influence directe sur la distribution des teneurs en eau libre, mais aussi sur la structuration du matériau. Ainsi les gradients de propriétés résultant de la dessiccation (gradients d'hydratation, gradients de porosité, gradients de déformations) ont été mis en évidence grâce aux techniques de caractérisation présentées. Le tracé des profils de teneurs en eau, d'hydratation, de porosité et des profils des déformations montrent clairement que les gradients de propriétés sont plus importants au voisinage de la surface de séchage.

Dans la section suivante, nous allons nous intéresser à l'incidence de ces gradients de propriétés sur la susceptibilité à la fissuration des couches minces de mortiers. Ici nous allons étudier les effets couplés du séchage et de la résistance qu'oppose le support vis-à-vis des variations dimensionnelles que lui transmet la couche de mortier.

## **II.4 Susceptibilité à la fissuration d'une couche de mortier appliquée sur un support**

Dans cette section, l'objectif est de mettre en place un dispositif expérimental nous permettant de suivre en même temps l'évolution des déformations dans la couche de mortier ainsi que la fissuration induite par le retrait empêché imposé par le support. Notre choix s'est porté sur une éprouvette composite qui consiste à appliquer une couche de mortier directement sur le support. Nous présentons dans cette section les détails de la conception et l'instrumentation de la maquette utilisée.

### **II.4.1 Conception de la maquette**

Afin de nous affranchir des hétérogénéités supplémentaires pouvant provenir d'un support en béton (porosité, succion, gonflement, hydratation), nous avons choisi d'utiliser un support en acier. Ce type de support présente plusieurs avantages:

- ses propriétés mécaniques varient très peu d'une éprouvette à l'autre,
- il est non absorbant,
- il est peu déformable,
- il peut être réutilisable.

Comme pour les essais précédents, la couche de mortier est appliquée sur le support et soumise au séchage dans une salle à température et hygrométrie contrôlées (température  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et humidité relative  $65 \pm 5\%$ ).

#### II.4.1.1 Caractéristiques du système support - grille utilisé

Le choix s'est porté sur un support en acier IPN 100. L'adhérence mortier – support est assurée par le biais d'une grille en acier qui est fixée directement sur le support au moyen de la soudure à l'arc. La grille utilisée est une tôle perforée du commerce dont les caractéristiques sont données dans l'annexe B. La figure II.34 donne un aperçu du système support - grille utilisé.



Figure II.34 - Aperçu du système support – grille utilisé

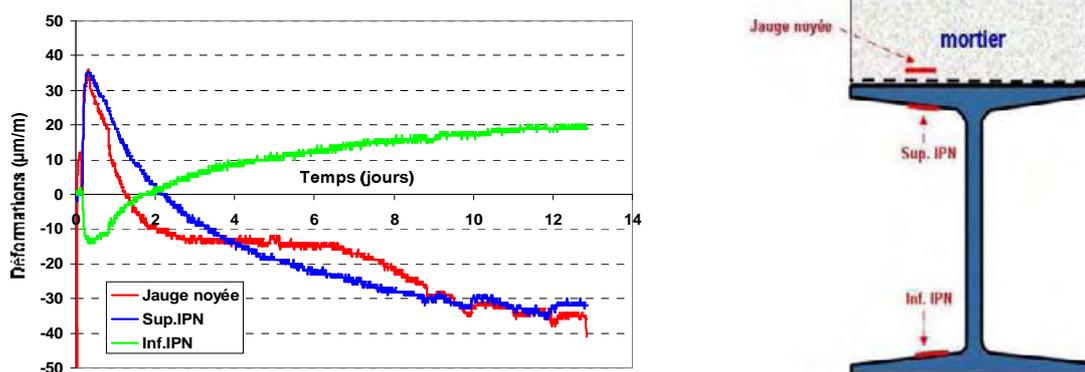
#### II.4.1.2 Caractérisation de l'interface

Pour la caractérisation de l'interface, nous avons mesuré les résistances en traction au niveau de l'interface grille – mortier ainsi que la déformabilité du support.

##### - Caractérisation de l'adhérence

De façon indirecte, on a pu évaluer l'adhérence mortier - support par le suivi conjugué des déformations dans la couche de mortier et des déformations du support au voisinage de l'interface. L'instrumentation de la couche de mortier est effectuée au moyen d'une jauge noyée positionnée à 3 mm de la grille. Dans le même temps, deux jauges sont collées sur le support dont l'une sur l'aile supérieure de l'IPN100 et l'autre sur l'aile inférieure de l'IPN100. Les dimensions de la couche de mortier sont de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  de section et 40 mm d'épaisseur. Les détails des mesures sont donnés sur la figure II.35.

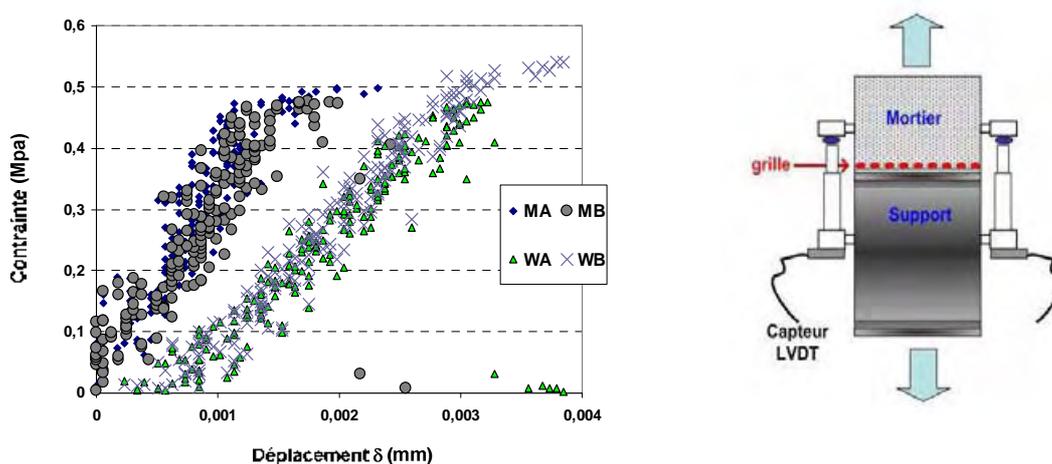
On remarque que les déformations sur l'aile supérieure du support sont du même ordre de grandeur que celles mesurées au voisinage de la grille à l'aide de la jauge noyée dans la couche de mortier. Ces observations nous permettent donc de considérer que l'adhérence entre la couche de mortier et le support, assurée ici par l'intermédiaire de la grille métallique peut être considérée comme parfaite.



**Figure II.35** - Evolution des déformations au voisinage de l'interface et sur le support pour le mortier WB

### - Résistance en traction de l'interface support - mortier

Les résistances en traction directe de l'interface support – mortier ont été mesurées au moyen de l'essai de traction directe. Dans notre cas, le mortier est coulé directement sur la grille qui est elle même soudée sur le support. Les dimensions de la couche de mortier sont de 50×50 mm<sup>2</sup> de section et 40 mm d'épaisseur. Le test utilisé est l'essai de traction directe avec un asservissement en force. Les déplacements sont mesurés au moyen de deux capteurs LVDT monté à cheval sur l'interface (voir figure II.36). L'ensemble des résultats est donné dans le tableau II.16. Les courbes représentées sont la moyenne de trois essais effectués à l'âge de 7 jours.



**Figure II.36** - Courbes expérimentales de l'essai de traction directe au niveau de l'interface pour nos mortiers

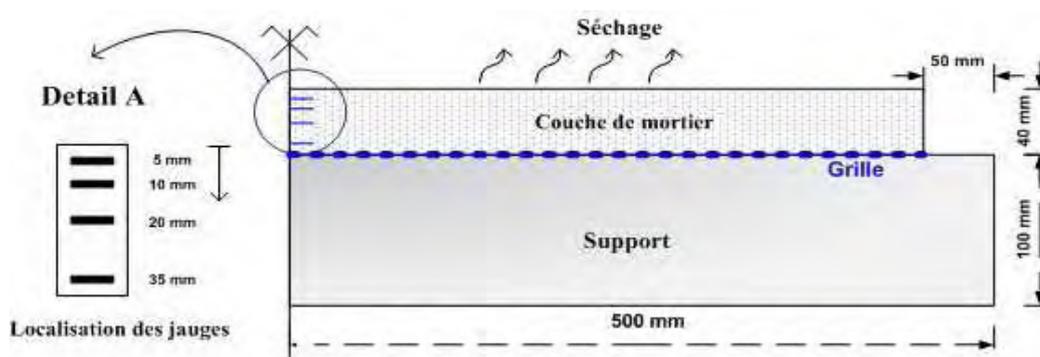
A la lecture du tableau, on remarque que la résistance moyenne en traction de l'interface support – mortier varie entre 0,5 et 0,6 MPa. Cette résistance est sensiblement plus forte pour les mortiers WA et WB.

**Tableau II.16** - Résistances en traction moyennes de l'interface à 7 jours

Matériau	Echantillons mixtes en traction	Résistance en traction de l'interface		
		$R_t$ (MPa)	$R_{t\_Moy}$ (MPa)	Coefficient de variation (%)
MA	1	0,5		
	2	0,55	0,49	8,61
	3	0,43		
MB	1	0,55		
	2	0,4	0,48	16,2
	3	0,6		
WA	1	0,63		
	2	0,55	0,52	16,23
	3	0,4		
WB	1	0,6		
	2	0,45	0,61	20
	3	0,8		

#### II.4.1.3 Instrumentation et protocole expérimental

Comme pour le cas du retrait libre, le suivi des déformations dans la couche de mortier est réalisé au moyen de jauges noyées positionnées à différentes profondeurs par rapport à la surface de séchage (voir figures II.36 et II.37).

**Figure II.36** - Détails et géométrie de la maquette instrumentée

Les jauges sont positionnées à mi-longueur de l'éprouvette et sont reliées à un système d'acquisition (**Vishay Micro - Measurements**). Les dimensions de la couche de mortier sont respectivement 900 mm de long, 50 mm de largeur, et 40 mm d'épaisseur. Les éprouvettes

sont conservées dans une salle à température et hygrométrie contrôlées (température  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ; humidité relative  $65\% \pm 5\%$ ).

L'avantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle permet le suivi de l'évolution des déformations dans la couche de mortier depuis sa mise en œuvre (les signaux fiables ne sont mesurés vraisemblablement que lorsque l'adhérence mortier-jauge est suffisante, donc quand le mortier atteint une certaine rigidité) ainsi que l'évaluation des déformations à n'importe quel point de la couche du matériau pour une échéance donnée.



**Figure II.37** - Aperçu des maquettes (1D) utilisées

Nous avons noté dans l'étude bibliographique consacrée au retrait empêché que le comportement mécanique d'une couche de mortier appliquée sur un support peut être décrit à tout moment par la notion de déformation totale pouvant s'exprimer de la manière suivante [Martinola 2001].

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_R(t) + \varepsilon_{El}(t) + \varepsilon_{fl,RI}(t) + \varepsilon_{Th}(t) \quad (\text{II.4})$$

avec :

$\varepsilon_R$  : déformation engendrée par le retrait ou le gonflement hygrométrique,

$\varepsilon_{El}$  : déformation élastique instantanée,

$\varepsilon_{fl,RI}$  : déformation différée due au fluage, généralement concomitant au phénomène de relaxation des contraintes dans le matériau,

$\varepsilon_{Th}$  : déformation générée par les variations thermiques.

En effet, sous l'influence des chargements extérieurs et des changements d'ambiance, la couche de mortier subit des variations dimensionnelles dues à la dessiccation, à l'avancement de l'hydratation, au fluage ainsi qu'au phénomène de relaxation des contraintes qui se manifestent dès le jeune âge.

## II.4.2 Présentation des résultats

### II.4.2.1 Cas du mortier MA

Les figures II.38 et II.39 donnent les courbes d'évolution des variations dimensionnelles à différentes profondeurs par rapport à la surface de séchage pour le mortier MA en présence d'un support adhérent. Pour la reproductibilité de l'essai, le suivi de la fissuration est effectué sur trois éprouvettes (dont deux sont instrumentées ; voir figure II.40).

En observant les évolutions des déformations dans la couche de mortier pour l'éprouvette n°2 et pour l'éprouvette n°3 (figures II.38 et II.39 respectivement), on note les mêmes tendances pour les 2 éprouvettes bien que l'échéance de fissuration ne soit pas rigoureusement identique (~ 12 jours pour l'éprouvette n°2 et ~ 9 jours pour l'éprouvette n°3).

Nous avons constaté dans la partie consacrée à l'étude du retrait libre sur prismes que le mortier MA produit essentiellement du retrait. Ces déformations s'initient très tôt c'est-à-dire dès la mise en place du matériau dans le moule.

Durant les 3 premiers jours suivant la mise en place du matériau dans le moule, la cinétique d'évolution des déformations dans la couche de mortier est forte. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que la cinétique de séchage est assez importante comme nous le montrent les courbes de perte de masse mesurées sur des éprouvettes 40×40×160 mm (voir figure II.17). Passé trois jours, celle-ci diminue considérablement, sans doute à cause des effets combinés de l'évolution des résistances mécaniques et de la présence du support adhérent qui empêchent le matériau de se déformer librement. Ces effets ont pour conséquence la mise en traction de la couche de mortier surtout au voisinage de la surface de séchage. Cette phase est généralement marquée par l'apparition de microfissures au voisinage de la surface du matériau [Granger 1997b]. Dans cette phase, il y a compétition entre l'évolution des résistances mécaniques du matériau et sa capacité à relaxer les contraintes [Monge 2007] [Bissonnette 2000]. Les déformations évoluent progressivement et au bout de 11 jours atteignent une valeur critique qui se traduit par une macro - fissuration. Cette fissuration se matérialise par une brusque variation des déformations. Dans notre cas, la fissure est apparue au centre de l'éprouvette au droit de la localisation des jauges. Dans ce cas les jauges

subissent une elongation importante qui est la conséquence de la libération des contraintes emmagasinées dans la couche de matériau.

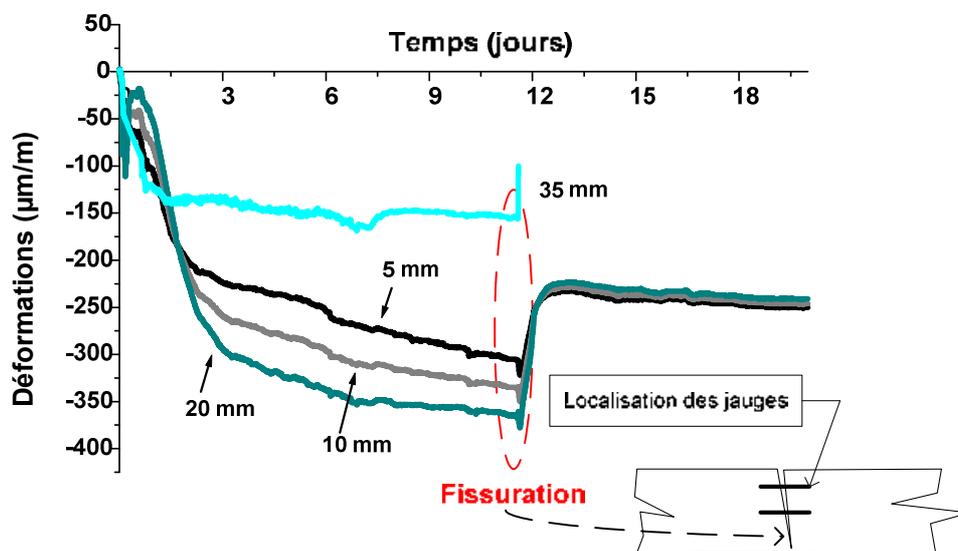


Figure II.38 - Evolution des déformations sur maquette de mortier MA (épreuve n° 2)

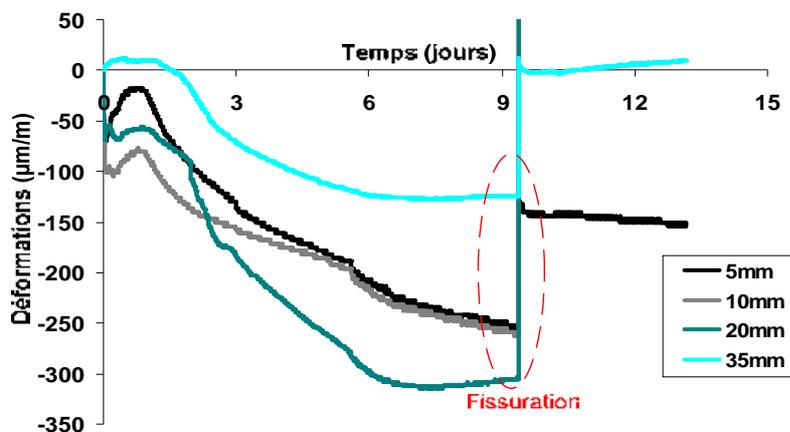


Figure II.39 - Evolution des déformations sur maquette de mortier MA (épreuve n° 3)

La distribution des fissures et l'âge de fissuration pour le mortier MA sont également représentées sur la figure II.40.

Le suivi de la fissuration est effectué sur une série de trois éprouvettes provenant d'une même gâchée.

En observant la répartition des fissures le long de la couche de mortier, on remarque que pour les trois éprouvettes, les fissures apparaissent d'abord de façon préférentielle au centre de l'éprouvette. Un deuxième type de fissures apparaît à environ 15 cm de part et d'autre du

centre de l'éprouvette et enfin un troisième type concerne les fissures qui apparaissent à environ 10 – 15 cm de l'extrémité de l'éprouvette.

L'âge d'apparition de la première macro – fissure varie de 9 à 12 jours. Les échéances d'apparition des autres fissures sont assez dispersées et relativement plus tardives. La continuation de la fissuration traduit le phénomène de la redistribution progressive des contraintes dans la couche de mortier fissuré.



**Figure II.40** - (a) Fissures observées  
(b) Représentation de la distribution et des échéances de fissuration pour le mortier MA

#### II.4.2.2 Cas du mortier MB

Les courbes d'évolution des déformations pour le mortier MB à différentes profondeurs par rapport à la surface de séchage en présence d'un support adhérent, sont présentées sur les figures II.41 et II.42. Deux éprouvettes de mortier ont été coulées et instrumentées pour le suivi de la fissuration.

Sur la figure II.42, sont présentées les évolutions des variations dimensionnelles dans la couche de mortier pour l'éprouvette n°2. On note ici quelques différences de comportement sur la distribution des déformations dans la couche de mortier en comparaison de l'éprouvette n°1. Il apparaît très rapidement des contraintes de traction au voisinage de la surface de séchage alors que le corps du matériau est sollicité par des contraintes de compression.

Comme pour le mortier MA les déformations prennent place très tôt, dès la mise en place du matériau dans le moule avec une forte cinétique. Cette phase est marquée par un retrait important, notamment durant les 8 premiers jours d'exposition. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que la cinétique de séchage est assez importante durant les premières 24 heures qui suivent le coulage du matériau. Ces déformations évoluent jusqu'à atteindre un minimum, suivi ensuite d'un changement de pente qui se traduit ici par la diminution des

déformations (redistribution des contraintes dans la couche de mortier). Dans cette phase il y a compétition entre l'évolution des résistances mécaniques du matériau et sa capacité à relaxer les contraintes. Ceci peut s'expliquer par le fait que la matrice cimentaire du mortier MB contient du polymère, ce qui améliore sa déformabilité. Cette phase est également marquée par l'apparition des microfissures observées notamment au voisinage de la surface de séchage. Les déformations évoluent progressivement et à une échéance donnée (35 – 40 jours) atteignent une valeur critique qui se traduit par l'apparition d'une macro - fissure. Sur les courbes de déformations, cette fissuration se matérialise par une brusque variation des valeurs mesurées.

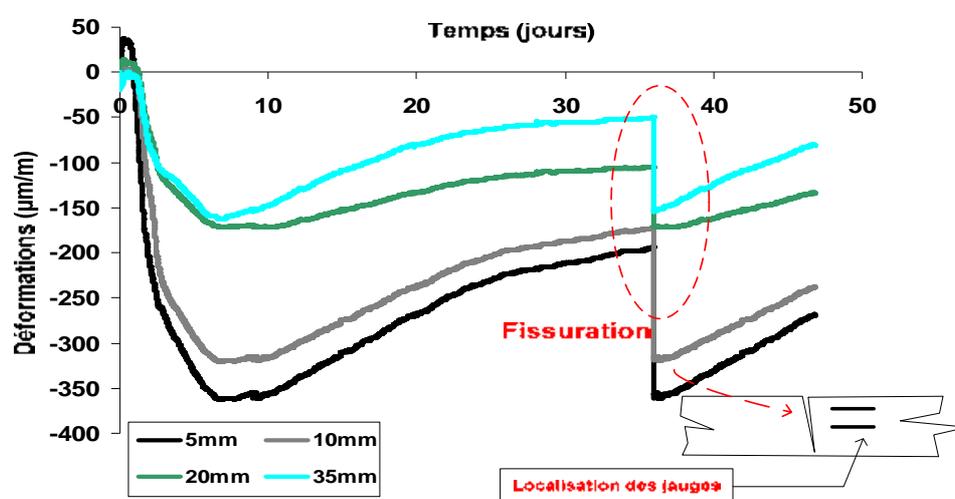


Figure II.41 - Evolution des déformations du mortier MB (éprouvette n°1)

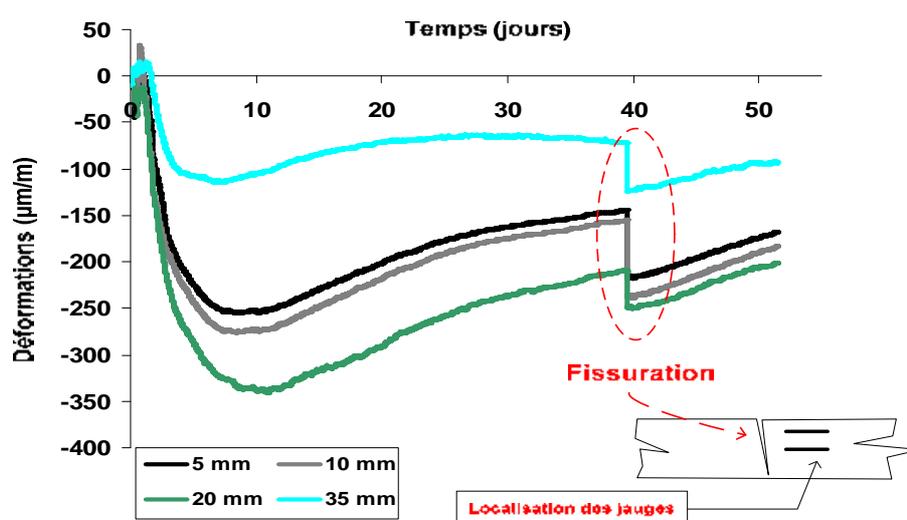


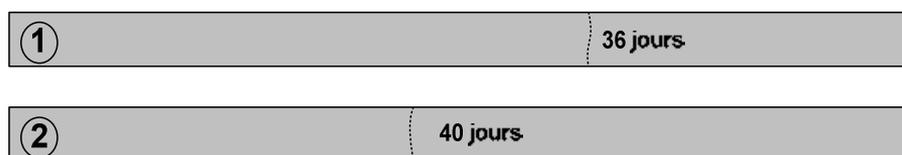
Figure II.42 - Evolution des déformations du mortier MB (éprouvette n°2)

Dans le cas du mortier MB, les fissures sont apparues en dehors de la zone de localisation des jauges. Dans ce cas les jauges subissent un raccourcissement qui traduit ici la libération des contraintes emmagasinées dans la couche du matériau.

Comme pour le mortier MA, la distribution des fissures et l'âge de fissuration pour le mortier MB sont représentées sur la figure II.43. Le suivi de la fissuration est effectué sur une série de deux éprouvettes provenant d'une même gâchée.

En observant la répartition des fissures le long de la couche de mortier, on remarque que pour les deux éprouvettes, les fissures apparaissent à des distances situées à environ 22 cm par rapport au centre pour l'éprouvette n°1 et environ 5 cm du centre pour l'éprouvette n°2.

L'âge d'apparition de la première macro – fissure varie ici entre 35 et 40 jours. Jusqu'à l'échéance de 80 jours, aucune fissure supplémentaire n'a été observée sur ces deux maquettes.



**Figure II.43** - Représentation de la distribution des fissures et des échéances de fissuration pour le mortier MB

#### II.4.2.3 Cas des mortiers WA et WB

Les figures II.44 et II.45 donnent les courbes d'évolution des variations dimensionnelles à différentes profondeurs par rapport à la surface de séchage pour les mortiers WA et WB en présence d'un support adhérent. Pour tester la reproductibilité de l'essai, le suivi de la fissuration est effectué sur trois éprouvettes (dont une seule est instrumentée). Il est à noter qu'au bout d'un an d'observation, aucune macro - fissure n'a été détectée pour ces deux mortiers.

Comme nous l'avons déjà constaté dans la partie consacrée au retrait libre sur prismes, les mortiers WA et WB ont une phase d'expansion assez marquée durant les premières heures suivant le coulage. Ces déformations prennent place très tôt dès la mise en place du matériau dans le moule et leur cinétique d'évolution est très forte. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que ces matériaux sont formulés à base de liant ternaire dont l'hydratation rapide produit un fort dégagement de chaleur. Le principal hydrate formé est l'ettringite. Ces déformations évoluent jusqu'à atteindre un maximum à partir duquel les déformations diminuent (dans cette phase le séchage devient prépondérant). Cette phase de retrait est toutefois caractérisée par

des cinétiques de déformations beaucoup plus lentes que celles observées pour les mortiers MA et MB.

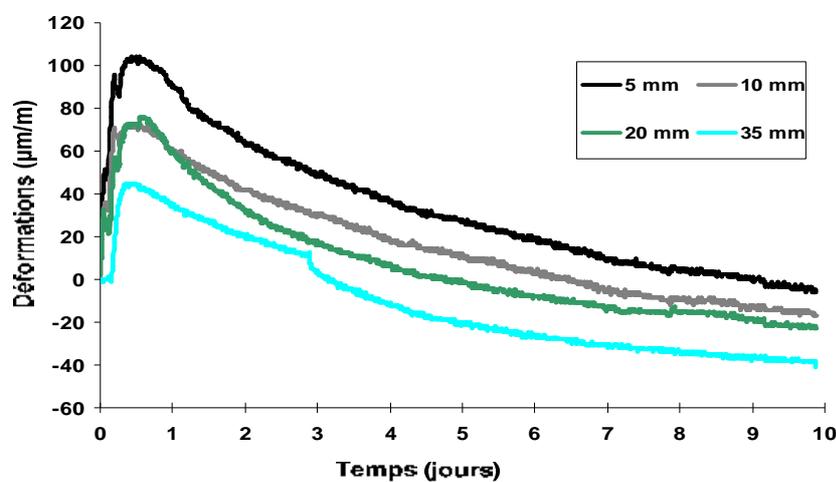


Figure II.44 - Evolution des déformations du mortier WA en présence d'un support adhérent

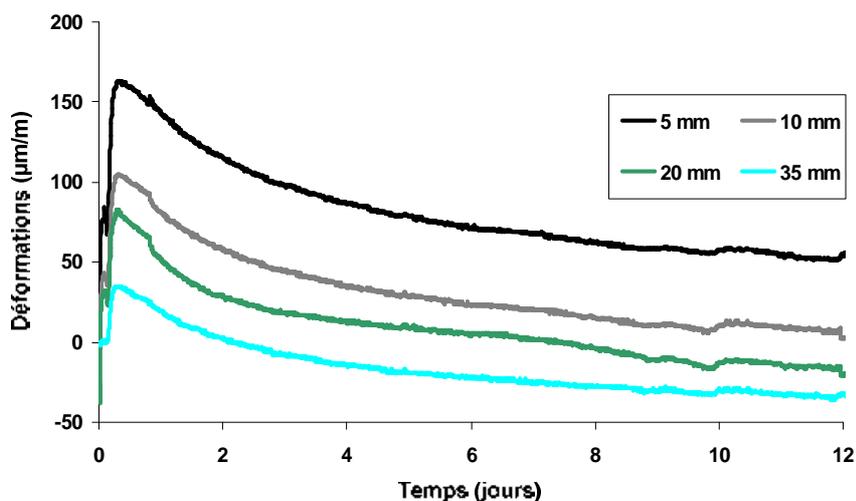
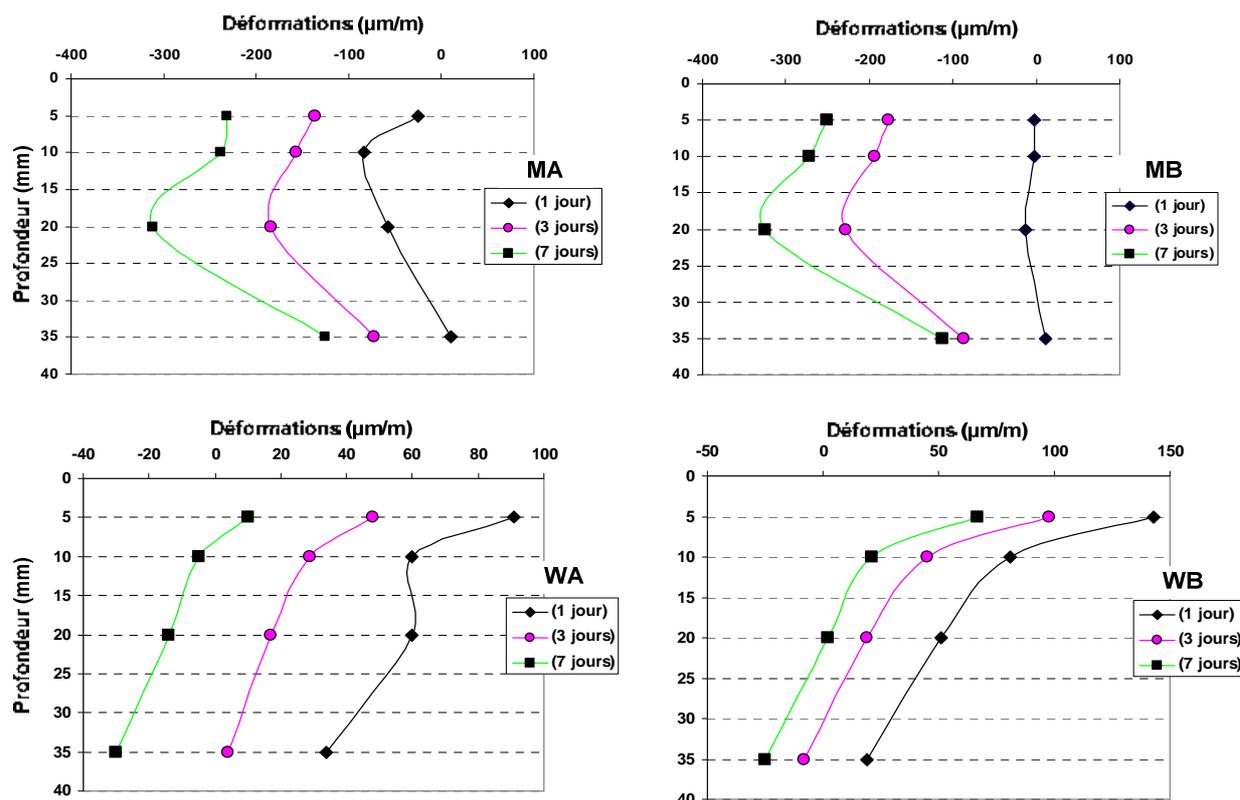


Figure II.45 - Evolution des déformations du mortier WB en présence d'un support adhérent

#### II.4.2.4 Profils des déformations dans la couche de mortier en présence d'un support adhérent

Les profils de déformations dans la couche de mortier en présence d'un support adhérent pour les 4 formulations sont présentés sur la figure II.46.



**Figure II.46** - Evolution des profils de déformations au jeune âge dans la couche de mortier

En observant l'évolution des profils de déformation au jeune âge dans la couche de mortier, on remarque qu'à partir de 1 jour, il se développe essentiellement des déformations de retrait pour tous les mortiers. Pour les mortiers MA et MB, on observe un phénomène de relaxation des contraintes au voisinage de la surface de séchage, ce phénomène peut être attribué à l'apparition de microfissures. Ce phénomène a notamment été observé par Granger [Granger 1997a] lors de l'étude du fluage de dessiccation.

#### II.4.2.5 Quantification des gradients de déformations dans la couche de mortier

Dans cette section, nous nous intéressons aux gradients de déformations qui se développent particulièrement dans la moitié supérieure de la couche de mortier. Comme nous l'avons observé plus haut, les effets combinés du séchage non homogène et de la gêne causée par le support sont à l'origine du développement non uniforme des variations dimensionnelles dans la couche de mortier, notamment au voisinage de la surface de séchage. On considère ici le

gradient d'une variable  $V$  sur l'épaisseur de la couche de mortier définie par l'abscisse  $y$  comme étant le rapport  $\frac{\Delta V}{\Delta y}$  tel que détaillée sur la figure II.47.

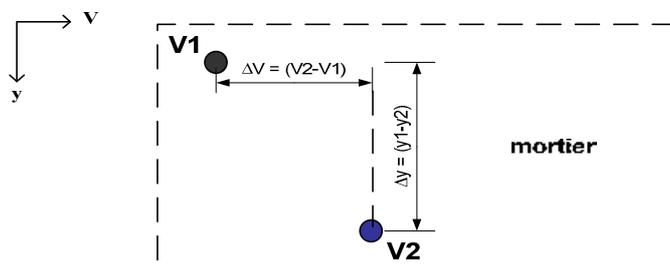


Figure II.47 - Définition du gradient dans la couche de mortier

Nous avons donc calculé les gradients des déformations sur une distance de 15 mm. Cette distance correspond à l'écart entre les jauges qui sont positionnées à 5 mm et celles qui sont positionnées à 20 mm. Les résultats sont présentés sur les figures II.48 et II.49.

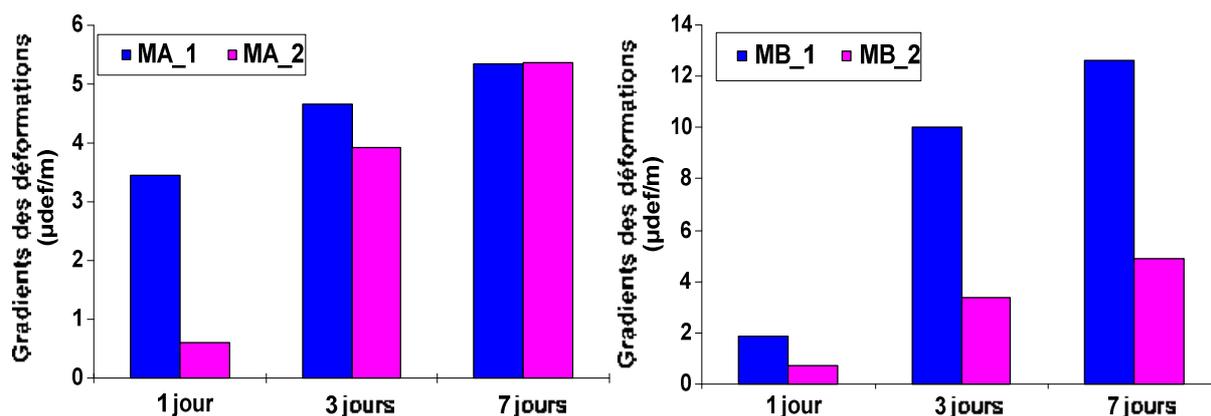


Figure II.48 - Evolution des gradients de déformations pour les formules MA et MB entre 1 et 7 jours sur la moitié supérieure de la couche de mortier

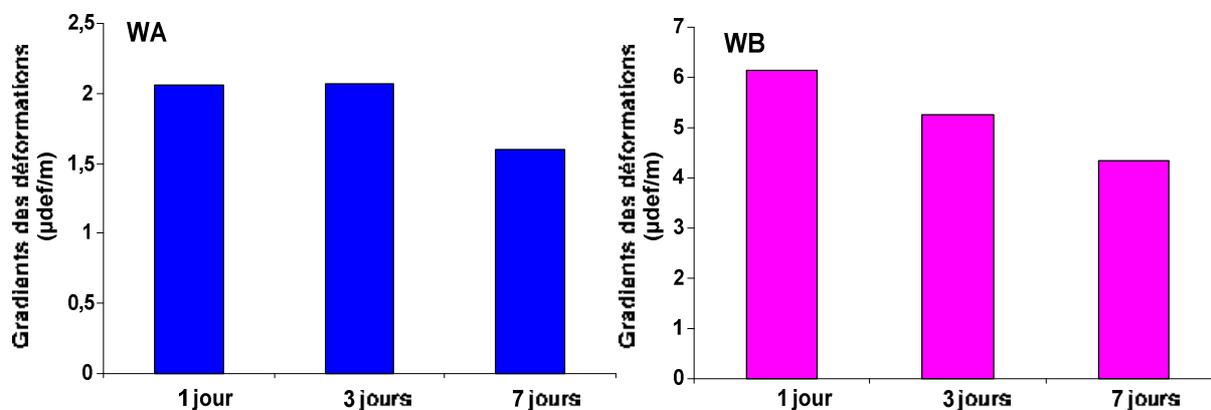


Figure II.49 - Evolution des gradients de déformations pour les formules WA et WB entre 1 et 7 jours sur la moitié supérieure de la couche de mortier

Les histogrammes de la figure II.48 montrent que pour les mortiers MA et MB qui sont à base de ciment Portland, les gradients des déformations dans la couche supérieure du matériau augmentent entre 1 et 7 jours. Par contre pour les mortiers WA et WB ces gradients ont tendance à diminuer avec le temps (voir figure II.49).

#### II.4.2.6 Conclusion

Nous avons vu que le front de séchage évolue de façon non uniforme sur la couche de mortier générant ainsi des gradients hydriques qui sont plus importants au voisinage de la surface de séchage. Cette distribution hydrique a aussi une influence sur le développement de l'hydratation, de la porosité ainsi que des déformations sur la couche du matériau. Ainsi, la partie du matériau qui se situe au voisinage de la surface de séchage (la moitié supérieure de la couche de mortier dans notre cas) se caractérise par une hydratation moins aboutie [Khelidj 1999], une forte porosité donc des résistances mécaniques plus faibles. En plus les gradients de déformations générés par le séchage y sont très importants.

En présence d'un support adhérent, ces gradients combinés aux effets de la gêne occasionnée par le support vont générer des contraintes supplémentaires dans le matériau qui vont provoquer la fissuration. Mais cette fissuration va également dépendre fortement de la formulation étudiée. Pour les mortiers MA et MB qui ont fissuré, on a observé que les gradients de déformations évoluent de façon croissante entre 1 et 7 jours. Cependant l'ajout du polymère dans le mélange retarde de façon considérable l'échéance de fissuration.

Par contre pour les mortiers WA et WB qui n'ont pas fissuré, les gradients de déformations diminuent entre 1 et 7 jours.

#### II.4.3 Extension sur des plaques

Dans la section précédente, nous avons décrit et conçu un dispositif expérimental qui nous permet de suivre l'évolution des déformations ainsi que la fissuration d'une couche de mortier qui est mise en œuvre sur un support adhérent. Les maquettes utilisées nous permettent d'étudier le comportement du matériau suivant une direction préférentielle (étude 1D) en supposant que le matériau est homogène sur sa longueur. Dans ce cas, les seules hétérogénéités sont celles qui se développent sur l'épaisseur de la couche de mortier dans le sens de la direction de séchage. Ceci n'est plus vrai pour des applications sur site pour lesquelles il existe également des hétérogénéités dans le plan pour des structures de grandes dimensions (plaques) [Feron 2002].

Pour l'étude en 2D, des plaques de (1000×2000×20 mm) ont été instrumentées. Le but est ici de comparer les résultats obtenus avec ceux des maquettes (1D) analysées précédemment. Dans cette partie, la caractérisation des gradients de déformations sur l'épaisseur de la couche de mortier est réalisée conjointement avec la caractérisation des gradients de déformations dans le plan.

#### **II.4.3.1 Conditions d'essais**

A la différence de l'étude sur maquettes 1D, les tests ont été réalisés dans une atmosphère ventilée (salle à température et hygrométrie variable) à cause de l'espace insuffisant de la salle de conservation pour la mise en place de ces maquettes de grandes dimensions.

Pour cette étude, les conditions d'essai sont les suivantes :

- l'épaisseur du mortier testé est de 20 mm,
- en parallèle à ce test, trois maquettes (1D) (dont 1 avec support non adhérent et 2 avec support adhérent) sont coulées et conservées dans les mêmes conditions (atmosphère ventilée) que la plaque ; la configuration de ces maquettes est identiques à celle étudiées dans la section II.4.1,
- pour le suivi des déformations et l'étude de la susceptibilité à la fissuration, 2 maquettes (1D) sont instrumentées (dont 1 sur support non adhérent et 1 sur support adhérent) par des jauges noyées,
- en parallèle à cette étude, des pertes de masse sont mesurées sur deux éprouvettes de mortier de dimensions (40×20×160 mm) dont les échanges hydriques se font uniquement par la face supérieure (face de séchage 40×160 mm),
- des relevés de température et d'hygrométrie de l'ambiance sont aussi effectués pendant le test,
- pour tester la reproductibilité, 2 plaques sont coulées (à quelques minutes d'intervalle) et le suivi de la fissuration est effectué au moyen d'un vidéo – microscope.

Les détails des maquettes (1D) utilisées ainsi que des éprouvettes coulées dans des moules en polystyrène destinées aux mesures de perte de masse sont présentés sur la figure II.50.



**Figure II.50** - Aperçu des maquettes et des prismes pour le suivi des déformations, de la fissuration et de la perte de masse

#### II.4.3.2 Conception et instrumentation de la plaque (maquette 2D)

Le support métallique utilisé ici est une plateforme constituée d'une plaque métallique de 4 mm d'épaisseur entretoisée par des profilés métalliques. La plaque est ensuite renforcée par un panneau en contreplaqué (CTB-H de 22 mm d'épaisseur) fixé sur la plateforme au moyen de vis. Les détails de la plateforme et des renforcements sont présentés sur la figure II.51.

L'adhérence mortier – support est assurée par le biais d'une grille en acier qui est fixée directement sur le panneau en contreplaqué au moyen de vis. Pour empêcher l'absorption d'une partie d'eau par le panneau en contreplaqué, un film de polyane est interposé au niveau de l'interface grille - panneau. Les relevés de la température et de l'hygrométrie de l'ambiance sont effectués par le biais d'un capteur d'enregistrement de type **SEFRAM 1500**.

Les déformations dans la couche de mortier sont mesurées au moyen de jauges noyées qui sont classées en 4 groupes suivant leur positionnement dans le plan (voir Figure II.51).

- Le groupe 1 constitué d'un ensemble de 3 jauges (à des profondeurs respectives de 5, 10 et 15 mm de la surface de séchage) qui sont positionnées au centre de la plaque et suivant le sens de la longueur,
- Le groupe 2 constitué d'un ensemble de 2 jauges (à des profondeurs respectives de 5 et 15 mm de la surface de séchage) positionnées suivant le sens longitudinal à 50 cm à partir de l'extrémité,
- Le groupe 3 constitué de 2 jauges (à des profondeurs respectives de 5 et 15 mm de la surface de séchage) positionnées suivant le sens transversal à 25 cm à partir de l'extrémité,

- Le groupe 4 comprend une seule jauge située à une profondeur de 10 mm de la surface de séchage et positionnée dans une des diagonales de la plaque à 15 cm de l'angle.

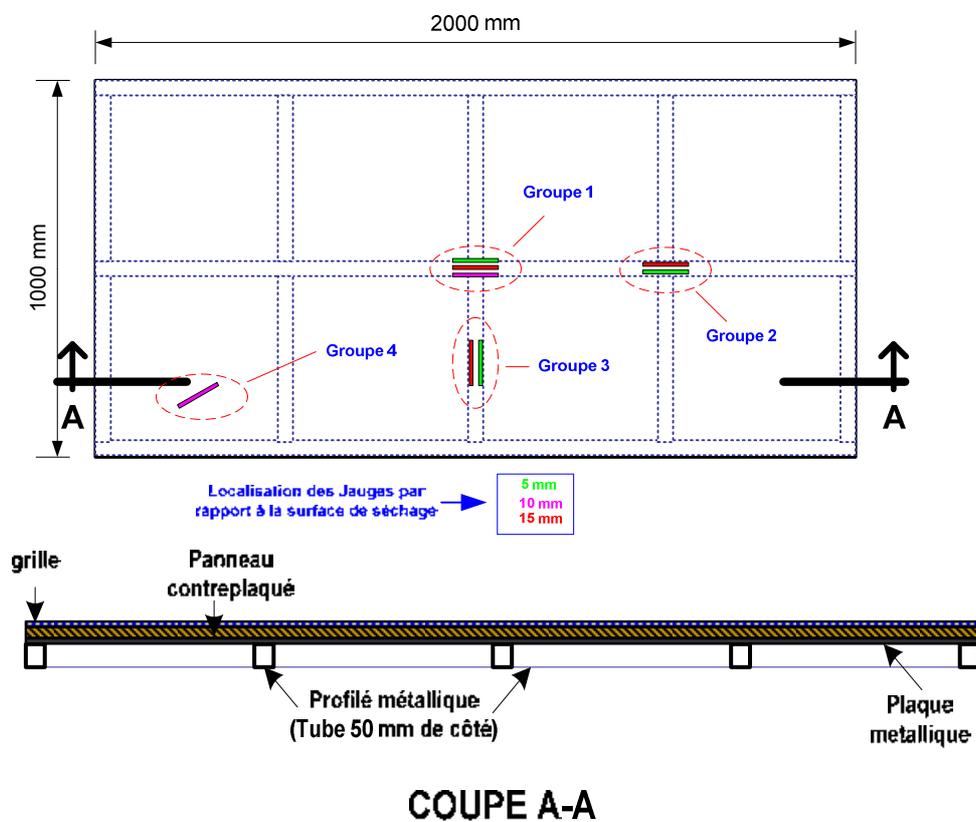


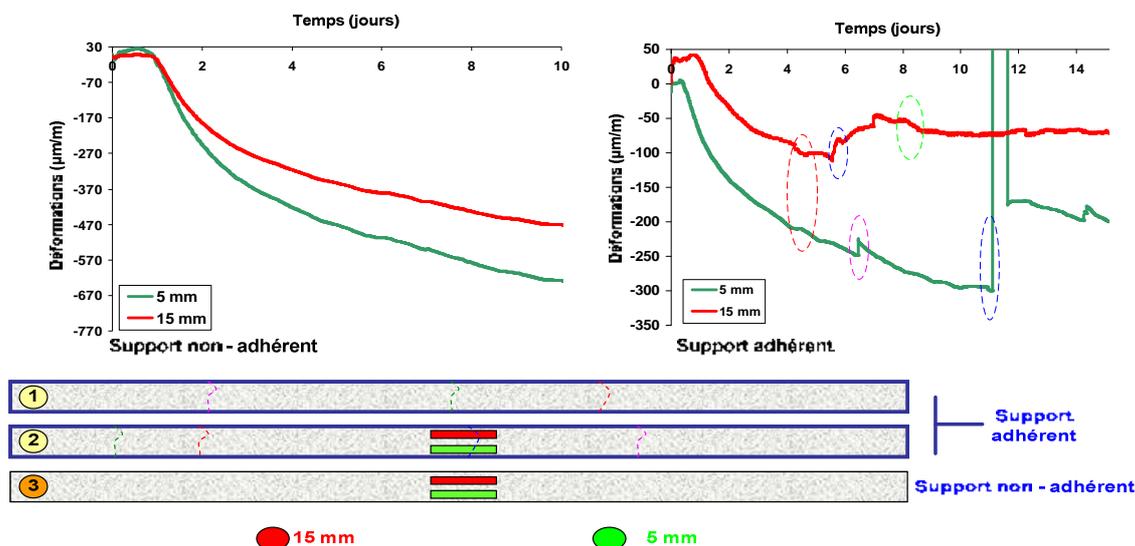
Figure II.51 - Aperçu et instrumentation de la maquette 2D

### II.4.3.3 Résultats obtenus

#### II.4.3.3.1 Etude sur mortier MA

Sur la figure II.52 sont représentées les courbes d'évolution des déformations mesurées au milieu des maquettes (1D) pour le mortier MA en atmosphère ventilée, ainsi que la carte de fissuration à différentes échéances. On remarque ici que les premières fissures apparaissent au bout de 4 jours et ce pour des amplitudes de déformations proches de 250  $\mu\text{m}/\text{m}$ . On voit aussi l'influence du support sur l'évolution des déformations, leur amplitude au bout de 8 jours étant à peu près divisée par 2.

De la même manière, les courbes d'évolution des déformations mesurées à différents endroits de la plaque ainsi que la carte de fissuration de la maquette à différentes échéances pour le mortier MA sont présentées sur la figure II.53.



**Figure II.52** - Suivi des déformations et de la fissuration sur maquette (1D) pour le mortier MA

En observant les courbes des déformations obtenues sur plaques ainsi que la carte de fissuration reproduite, on remarque comme dans le cas des maquettes (1D) que les premières fissures apparaissent au bout de 4 jours dans le sens longitudinal de la plaque. Les premières fissures apparaissent ainsi pour des amplitudes de déformations voisines de 300  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

On remarque également que les amplitudes des déformations sont du même ordre de grandeur dans les deux sens (longitudinal et transversal) au moment où apparaissent les premières fissures. Le matériau peut donc être considéré comme ayant un comportement isotrope en terme de déformations dans le plan.

Si on compare également les échéances de fissuration entre les maquettes (1D) et les plaques, on remarque que celles-ci sont pratiquement les mêmes (4 jours). On voit aussi que les amplitudes des déformations au moment de la fissuration du matériau sont du même ordre de grandeur (250  $\mu\text{m/m}$  pour la maquette (1D) et 300  $\mu\text{m/m}$  pour la plaque). Dans le cas du mortier MA, l'étude de la fissuration du mortier sur des maquettes (1D) peut donc être considérée comme suffisamment représentative du comportement du mortier dans le plan.

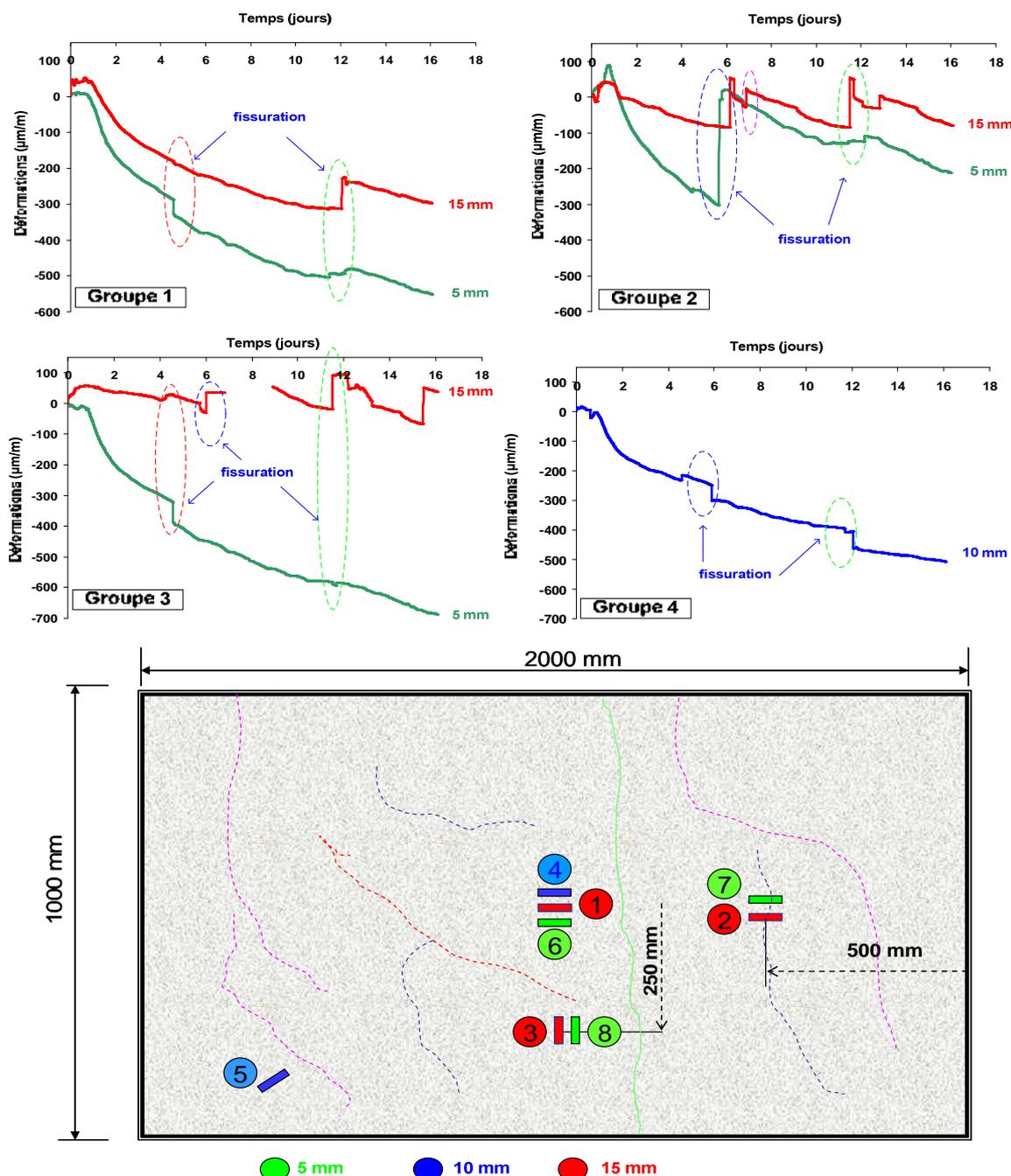
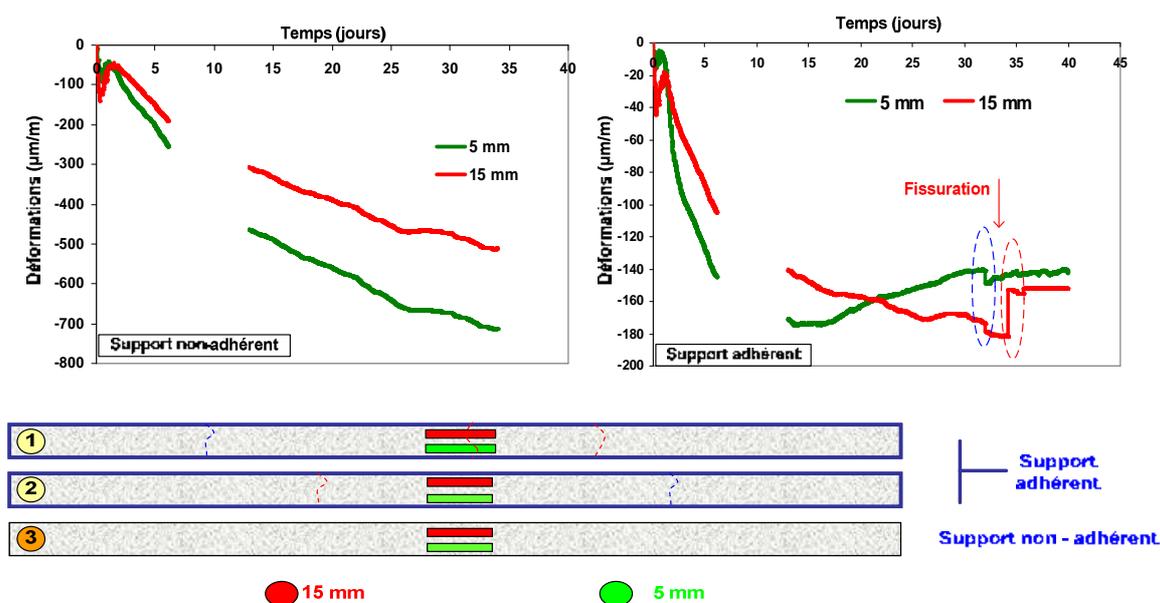


Figure II.53 - Suivi des déformations et de la fissuration sur plaque pour le mortier MA

### II.4.3.3.2 Etude sur mortier MB

Sur la figure II.54 sont représentées les courbes d'évolution des déformations mesurées au milieu des maquettes (1D) pour le mortier MB en atmosphère ventilée, ainsi que la carte de fissuration à différentes échéances. Les discontinuités observées sur les courbes correspondent à une interruption de l'acquisition suite à une coupure d'électricité.



**Figure II.54** - Suivi des déformations et de la fissuration sur maquette (1D) pour le mortier MB

On remarque ici que l'échéance de fissuration est considérablement retardée par rapport au mortier MA et que les premières fissures apparaissent au bout de 31 jours pour des amplitudes de déformations proches de 180 µm/m. On voit aussi l'influence du support sur l'évolution des déformations (éprouvette n° 1 et éprouvette n° 3 respectivement).

Pour ce mortier, les courbes d'évolution des déformations mesurées pour les différents groupes ainsi que la carte de fissuration sont présentées sur la figure II.55. On remarque cette fois-ci un léger décalage de l'échéance de fissuration avec les maquettes (1D). Dans le cas des plaques, les premières fissures apparaissent au bout de 34 jours de séchage (contre 31 jours en 1D) et sont essentiellement localisées aux bords de la plaque et orientées dans le sens longitudinal. Ces fissures apparaissent pour des amplitudes de déformations proches de 200 µm/m.

Comme pour le mortier MA, on remarque aussi que les amplitudes des déformations sont du même ordre de grandeur dans les deux sens (longitudinal et transversal) au moment où apparaissent les premières fissures. Le matériau peut donc être considéré comme ayant un comportement isotrope en terme de déformations dans le plan.

Lorsqu'on compare les amplitudes des déformations au moment de la fissuration des maquettes (1D) avec celles des plaques (2D), on remarque que celles-ci sont du même ordre de grandeur (180  $\mu\text{m/m}$  pour la maquette (1D) et 200  $\mu\text{m/m}$  pour la plaque). Dans le cas du mortier MB, l'étude de la fissuration du mortier sur des maquettes (1D) peut également être considérée comme suffisamment représentative du comportement du matériau dans le plan.

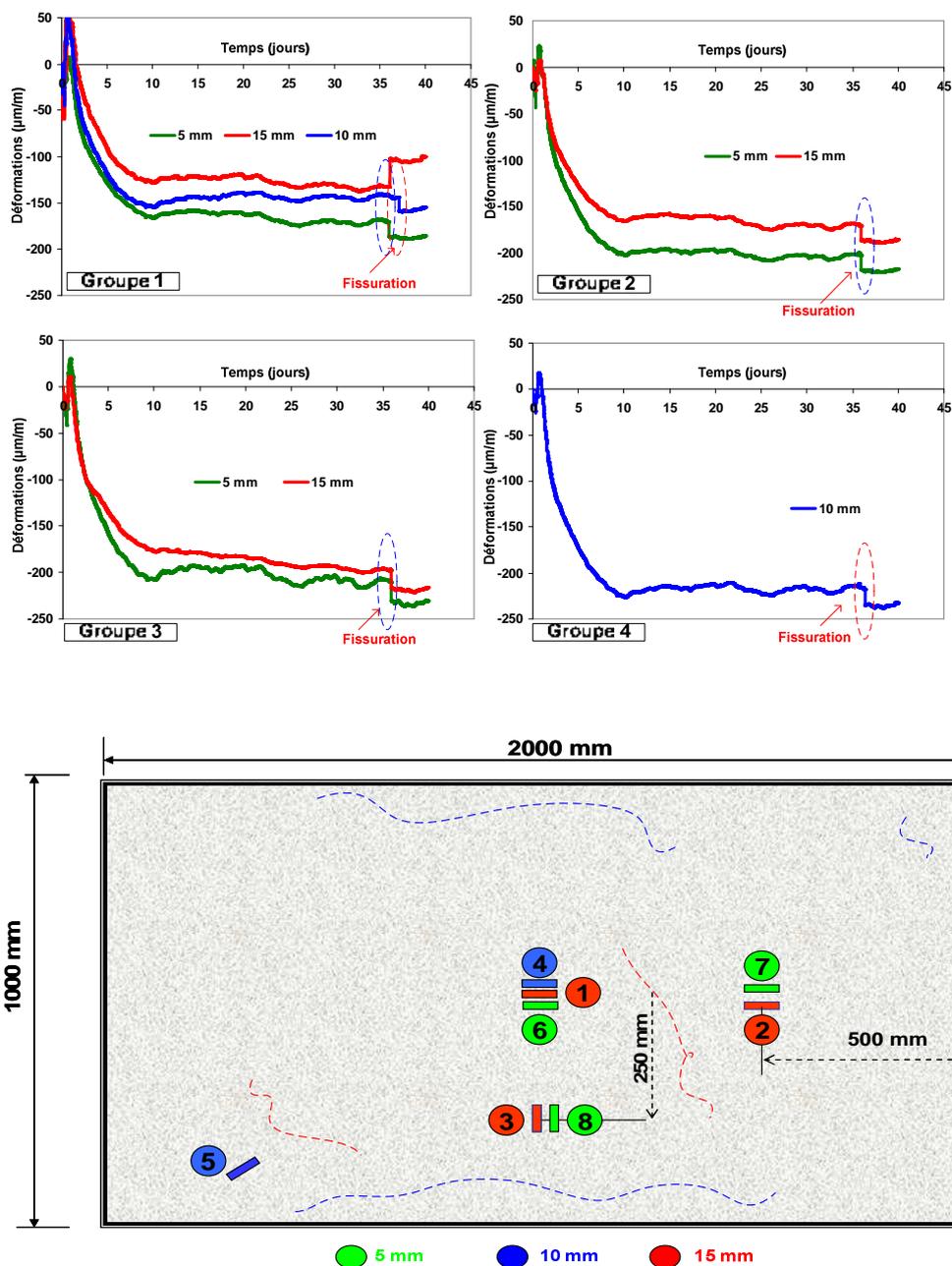
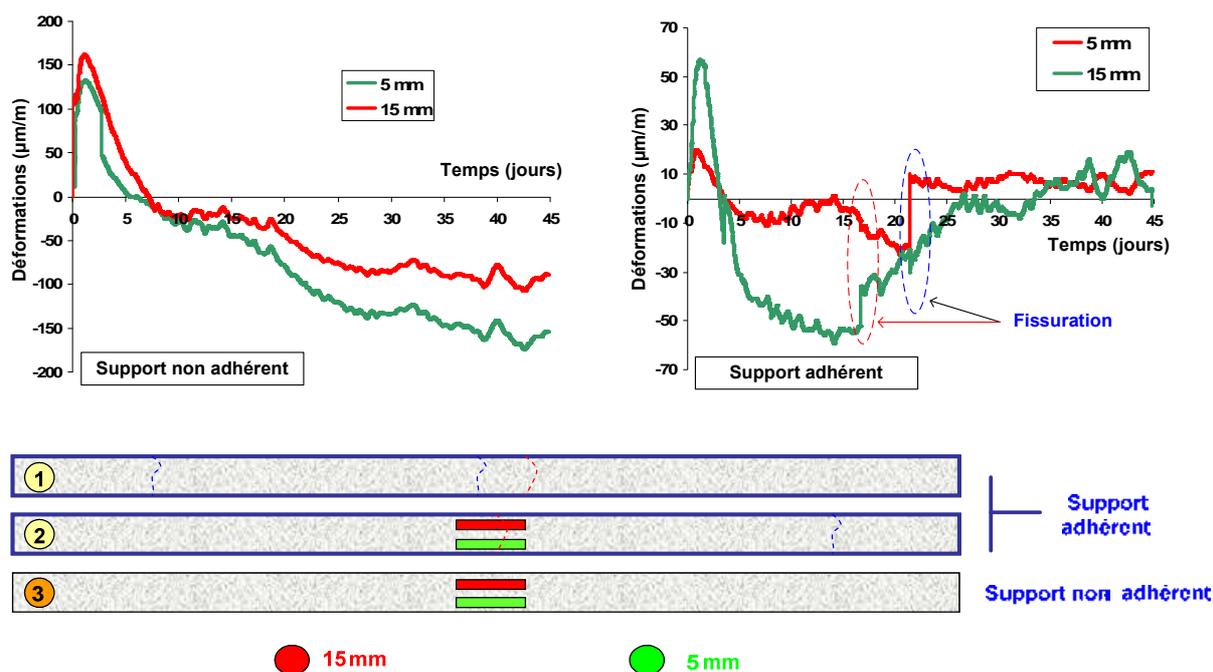


Figure II.55 - Suivi des déformations et de la fissuration sur plaque pour le mortier MB

### II.4.3.3 Etude sur mortier WA

Les courbes d'évolution des déformations mesurées au centre des maquettes (1D) et la carte de fissuration pour le mortier WA sont présentées sur la figure II.56.

On remarque que les premières fissures apparaissent au bout de 16 jours quand le matériau est dans sa phase de retrait. Ces fissures apparaissent pour des amplitudes de déformations proches de  $60 \mu\text{m/m}$  (voir figure II.56).



**Figure II.56** - Suivi des déformations et de la fissuration sur maquette (1D) pour le mortier WA

Sur la figure II.57, sont également représentées les courbes d'évolution des déformations mesurées sur plaque pour les différents groupes ainsi que la carte de fissuration pour le mortier WA. Il faut préciser que la jauge du groupe 4 située sur la diagonale de la plaque n'a pas fonctionné.

En observant les courbes des déformations ainsi que la carte de fissuration obtenues sur plaques, on remarque comme dans le cas des maquettes (1D), que la fissure principale apparaît au bout de 16 jours après la mise en œuvre du matériau. Cette fissure est localisée dans le sens longitudinal de la plaque à la hauteur des jauges du groupe 2. Les amplitudes des déformations atteintes avant fissuration sont de l'ordre de  $80 \mu\text{m/m}$ .

En dehors des déformations mesurées au niveau de la jauge 4 située à 10 mm de profondeur, on remarque que les amplitudes des déformations mesurées dans les deux sens (longitudinal

et transversal) sont du même ordre de grandeur. Ceci implique donc que le matériau peut être considéré comme ayant un comportement isotrope en terme de déformations, dans le plan.

En comparant les échéances de fissuration entre les maquettes (1D) et les plaques (2D) pour le mortier WA, on peut voir que celles-ci sont pratiquement les mêmes (16 jours). Pour cette formulation, l'étude de la fissuration du mortier sur des maquettes (1D) peut également être considérée comme suffisamment représentative du comportement du matériau dans le plan.

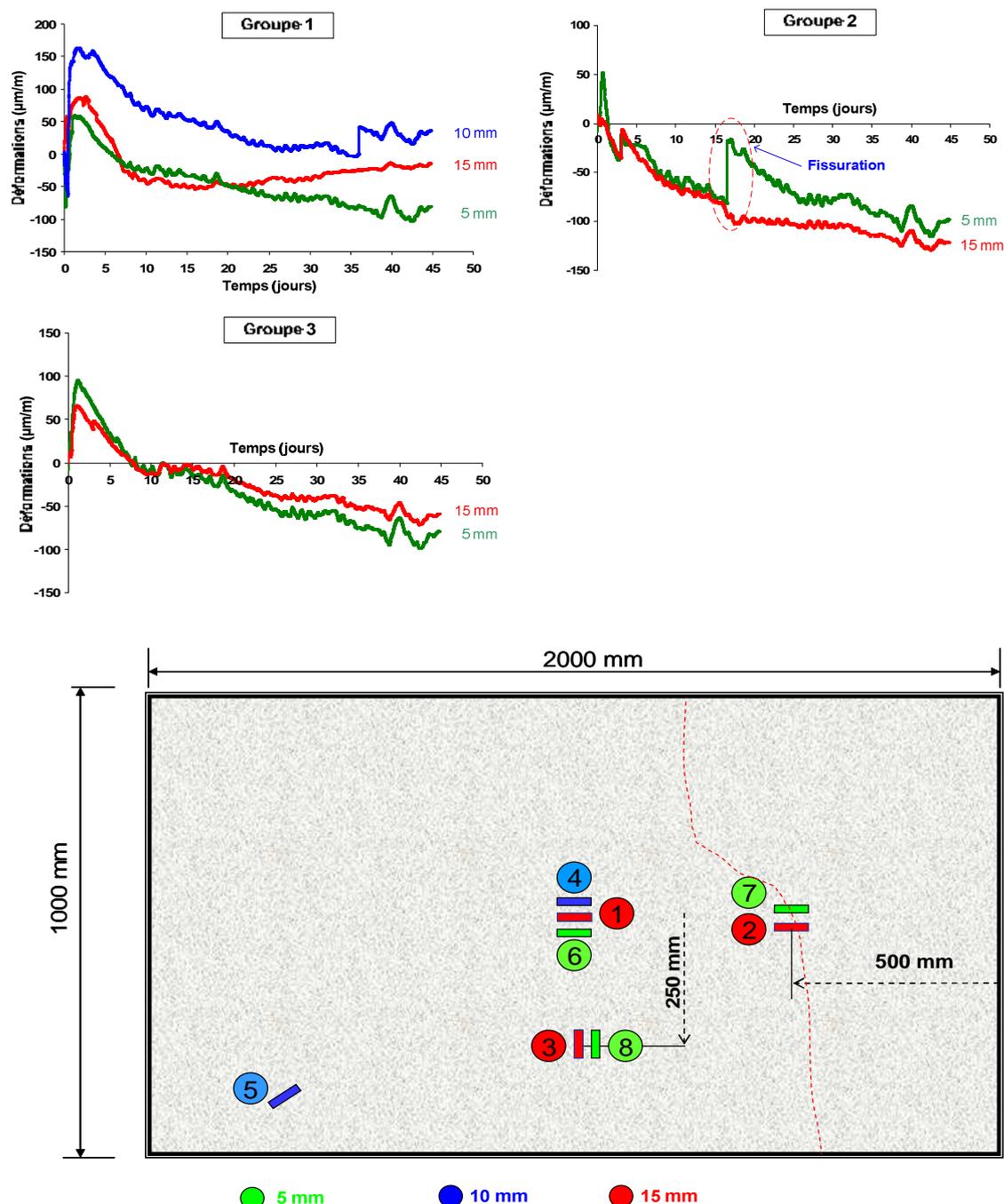


Figure II.57 - Suivi des déformations et de la fissuration sur plaque pour le mortier WA

#### II.4.3.3.4 Etude sur mortier WB

Comme pour les autres formulations, les courbes d'évolution des déformations mesurées au centre des maquettes (1D) ainsi que la carte de fissuration à différentes échéances pour le mortier WB sont présentées sur la figure II.58. Il faut préciser dans ce cas qu'au bout de 3 mois d'observation, aucune fissure n'a été détectée sur ces maquettes.

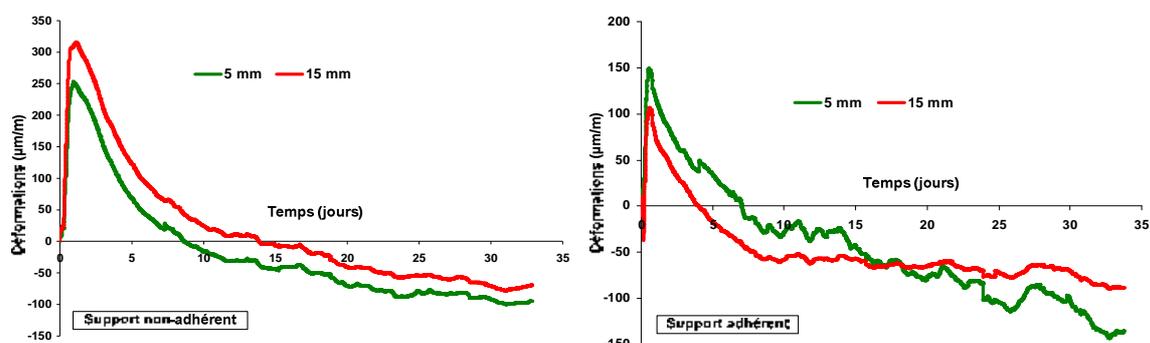


Figure II.58 - Suivi des déformations et de la fissuration sur maquettes 1D pour le mortier WB

Les courbes d'évolution des déformations mesurées à différents endroits de la plaque pour le mortier WB sont présentées sur la figure II.59. On précise que la jauge appartenant au groupe 1 et positionnée à la profondeur 10 mm de la surface de séchage n'a pas fonctionné.

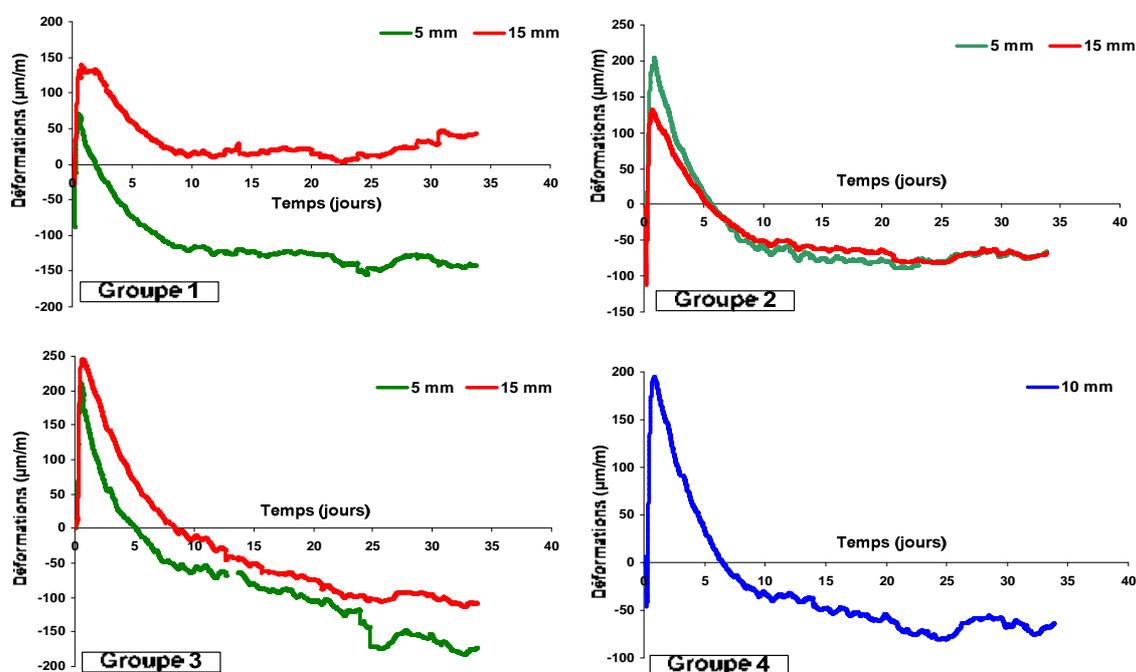


Figure II.59 - Suivi des déformations et de la fissuration sur plaque pour le mortier WA

En observant les courbes des déformations obtenues sur plaques ainsi que l'évolution des déformations sur maquettes 1D, on remarque comme dans le cas des mortiers MA, MB et WA que les amplitudes des déformations sont du même ordre de grandeur, bien que plus faibles sur la plaque au niveau des jauges des groupes 2 et 4 ( $70 \mu\text{m/m}$  au lieu de  $150 \mu\text{m/m}$ ). Dans l'ensemble, on peut conclure que pour le mortier WB, l'étude de la fissuration du mortier sur des maquettes (1D) peut également être considérée comme suffisamment représentative du comportement du matériau dans le plan.

#### II.4.3.4 Influence des conditions de conservation : étude sur maquette (1D)

Dans cette partie, nous avons analysé l'influence des conditions de conservation sur la susceptibilité à la fissuration des mortiers. Les conditions de conservation sont les suivantes :

- Cas 1 : une atmosphère contrôlée qui correspond à une situation pour laquelle les maquettes sont conservées dans une salle à température et hygrométrie contrôlées ( $20 \pm 1^\circ\text{C}$  et  $65 \pm 5\%$ ),
- Cas 2 : une atmosphère ventilée.

L'épaisseur de la couche de mortier est de 20 mm. Le suivi des déformations est effectué à l'aide de jauges noyées positionnées à des profondeurs de 5 et 15 mm par rapport à la surface de séchage.

La figure II.60 présente les relevés de la température et de l'humidité relative effectués dans la salle à atmosphère contrôlée durant 90 jours.

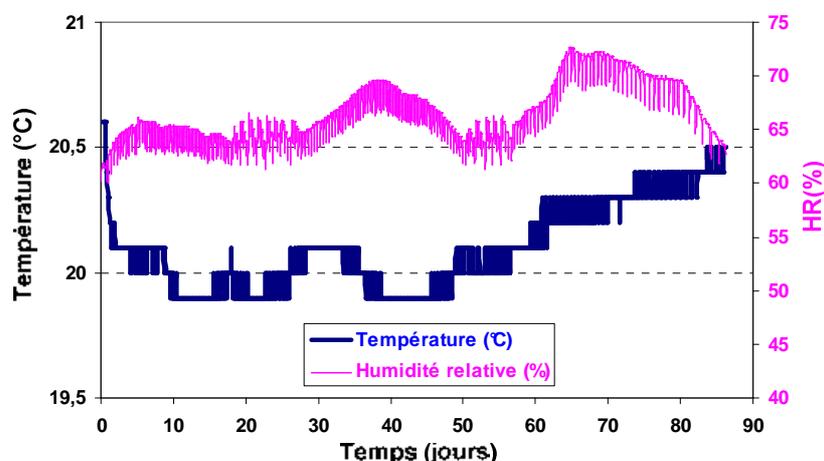


Figure II.60 - Relevés de températures et d'hygrométrie en environnement contrôlé

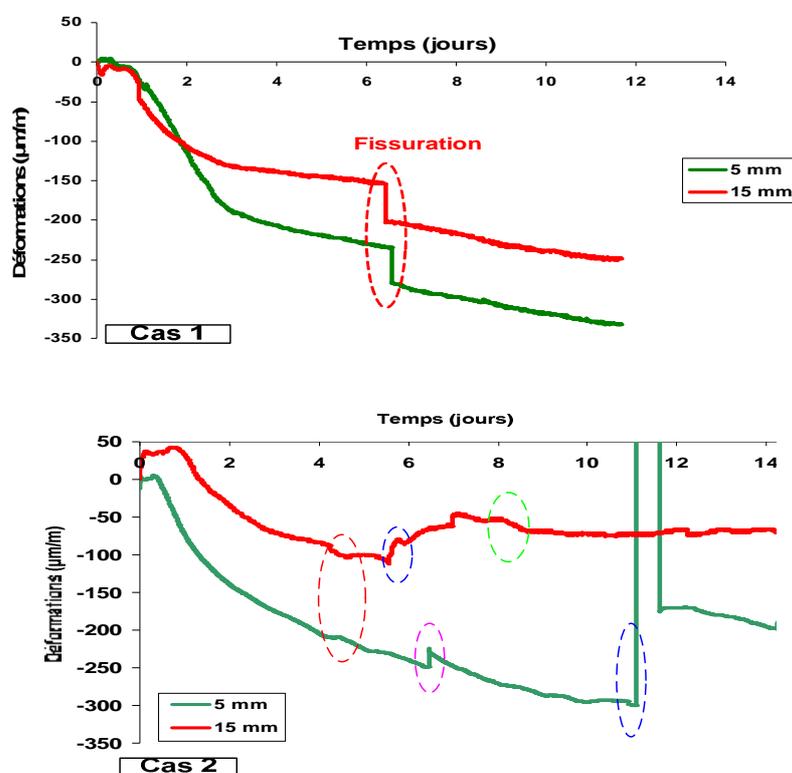
#### II.4.3.4.1 Etude sur mortier MA

Les courbes d'évolution des déformations pour le mortier MA sont présentées sur la figure II.61.

On remarque ainsi que :

- en atmosphère contrôlée, l'échéance de fissuration est d'environ 6 jours et que celle-ci correspond à une amplitude de déformation avoisinant les 250  $\mu\text{m/m}$ .
- en atmosphère ventilée, l'échéance de fissuration est d'environ 4 jours et que celle-ci correspond à une amplitude de déformation proche de 220  $\mu\text{m/m}$ .

Ceci montre que la fissuration se produit légèrement plus tôt lorsque le mortier est conservé en atmosphère ventilée.



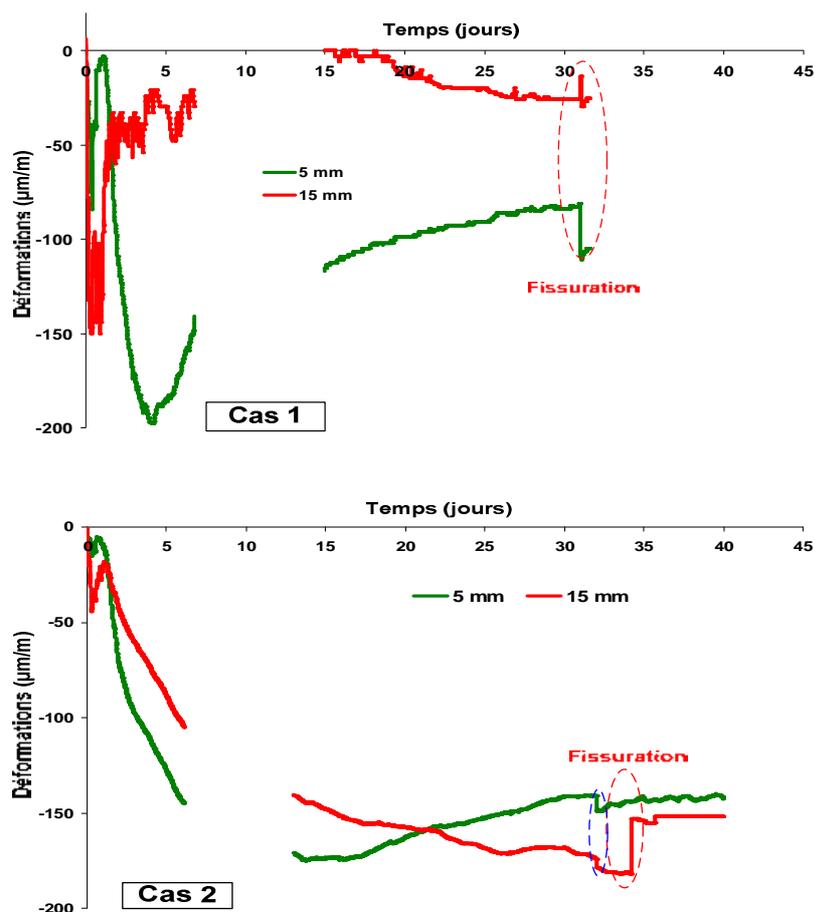
**Figure II.61** - Evolution des déformations dans la couche de mortier MA :  
Cas 1 : environnement contrôlé      Cas 2 : environnement ventilé

#### II.4.3.4.2 Etude sur mortier MB

Comme pour le cas du mortier MA, les courbes d'évolutions des déformations pour le mortier MB suivant les deux cas d'exposition sont présentées sur la figure II.62. Les discontinuités observées au niveau des courbes correspondent aux interruptions de l'acquisition suite à une coupure d'électricité.

On remarque ainsi que :

- en atmosphère contrôlée, l'échéance de fissuration est d'environ 31 jours correspondant à une amplitude de déformation proche de 90  $\mu\text{m/m}$ .
- en atmosphère ventilée, l'échéance de fissuration est d'environ 33 jours pour une amplitude de déformation voisine de 160  $\mu\text{m/m}$ .



**Figure II.62** - Evolution des déformations dans la couche de mortier MB :  
Cas 1 : environnement contrôlé      Cas 2 : environnement ventilé

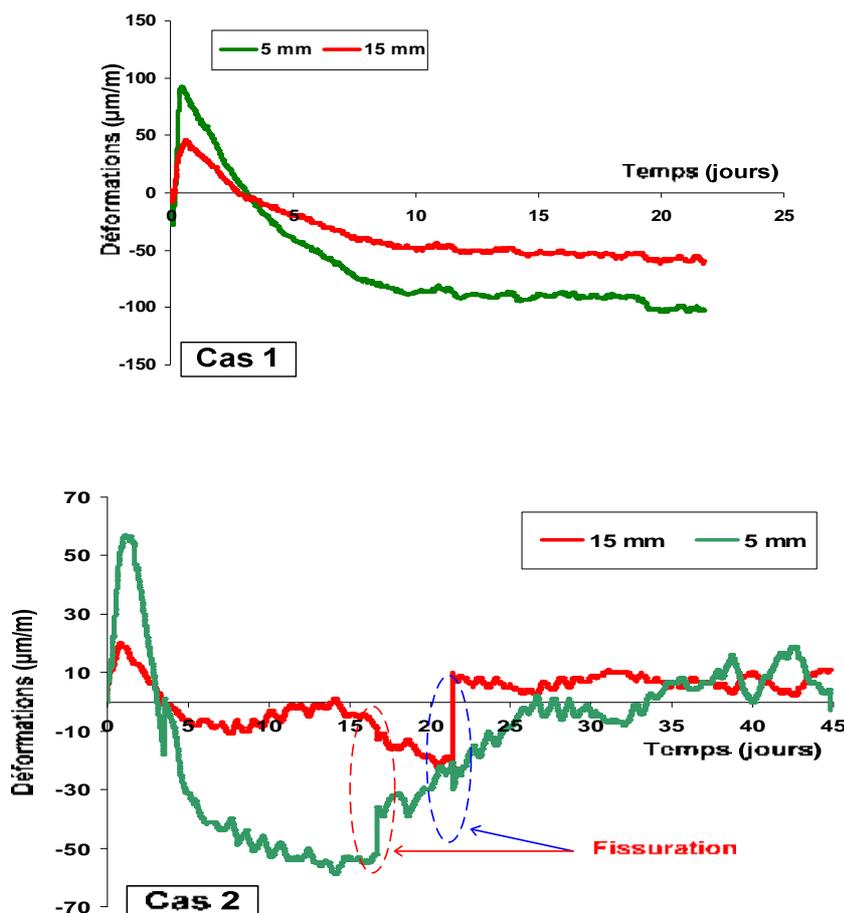
Dans les deux cas, l'échéance de fissuration est pratiquement la même bien qu'on enregistre un écart important entre les amplitudes des déformations avant fissuration.

#### II.4.3.4.3 Etude sur mortier WA

Les courbes d'évolutions des déformations pour le mortier WA sont présentées sur la figure II.63.

On remarque ainsi que :

- en atmosphère contrôlée, aucune fissure n'est observée au bout de 9 mois de conservation.
- en atmosphère ventilée, l'échéance de fissuration est d'environ 16 jours pour une amplitude de déformation qui avoisine  $60 \mu\text{m/m}$ .



**Figure II.63** - Evolution des déformations dans la couche de mortier WA :  
Cas 1 : environnement contrôlé      Cas 2 : environnement ventilé

La susceptibilité à la fissuration du mortier WA augmente considérablement lorsque les conditions de conservation ne sont pas contrôlées.

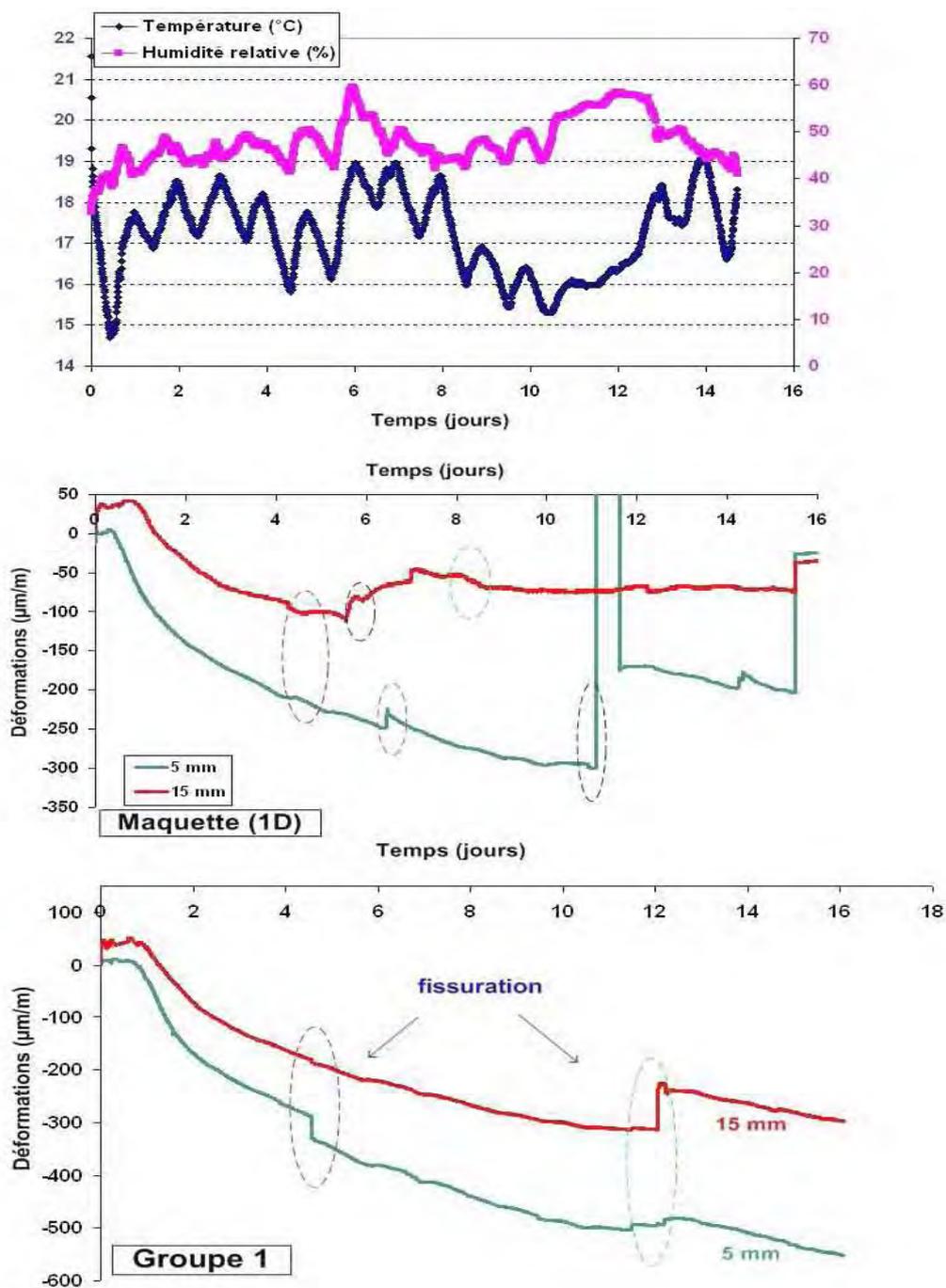
#### II.4.3.5 Influence des variations d'hygrométrie sur la fissuration

Dans le tableau II.17 sont résumées les amplitudes de déformation ainsi que les échéances de fissuration pour les mortiers MA, MB et WA suivant les conditions d'exposition.

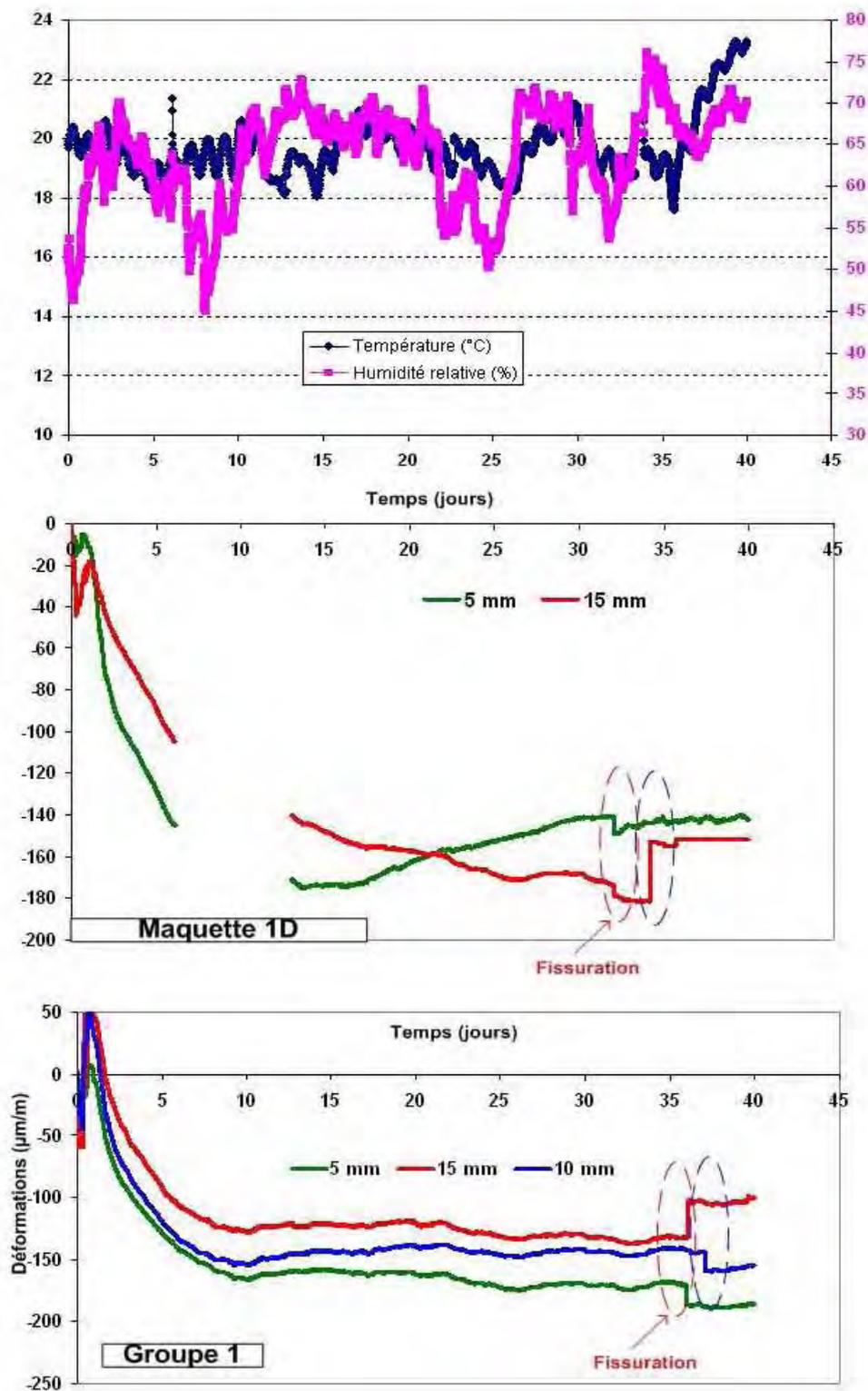
Sur les figures II.64, II.65 et II.66 sont présentés les relevés de température et d'hygrométrie effectués durant les différents essais en atmosphère ventilée, l'évolution des déformations au milieu de la plaque (jauges répertoriées par le groupe 1) ainsi que les déformations obtenues au centre de la maquette (1D) pour les mortiers MA, MB et WA. En observant les courbes, on remarque que la température et l'hygrométrie varient sensiblement au cours de l'essai. Ces variations ont vraisemblablement une influence sur l'évolution des déformations dans les deux situations d'essai (1D et 2D). On remarque que pour les deux types de maquettes utilisées, la fissuration de la couche de mortier coïncide avec les pics d'hygrométrie. L'évolution des déformations dans la couche de mortier est donc sensible aux variations d'hygrométrie et de température, puisque une modification du régime hygrothermique de l'ambiance de conservation semble avoir une incidence sur la susceptibilité à la fissuration des mortiers. En particulier le mortier WA qui n'a pas fissuré en ambiance régulée à 20°C et 60% d'humidité relative a fissuré en ambiance ventilée (voir figure II.66).

**Tableau II.17** – Récapitulatif sur l'étude de la fissuration pour les mortiers MA, MB et WA

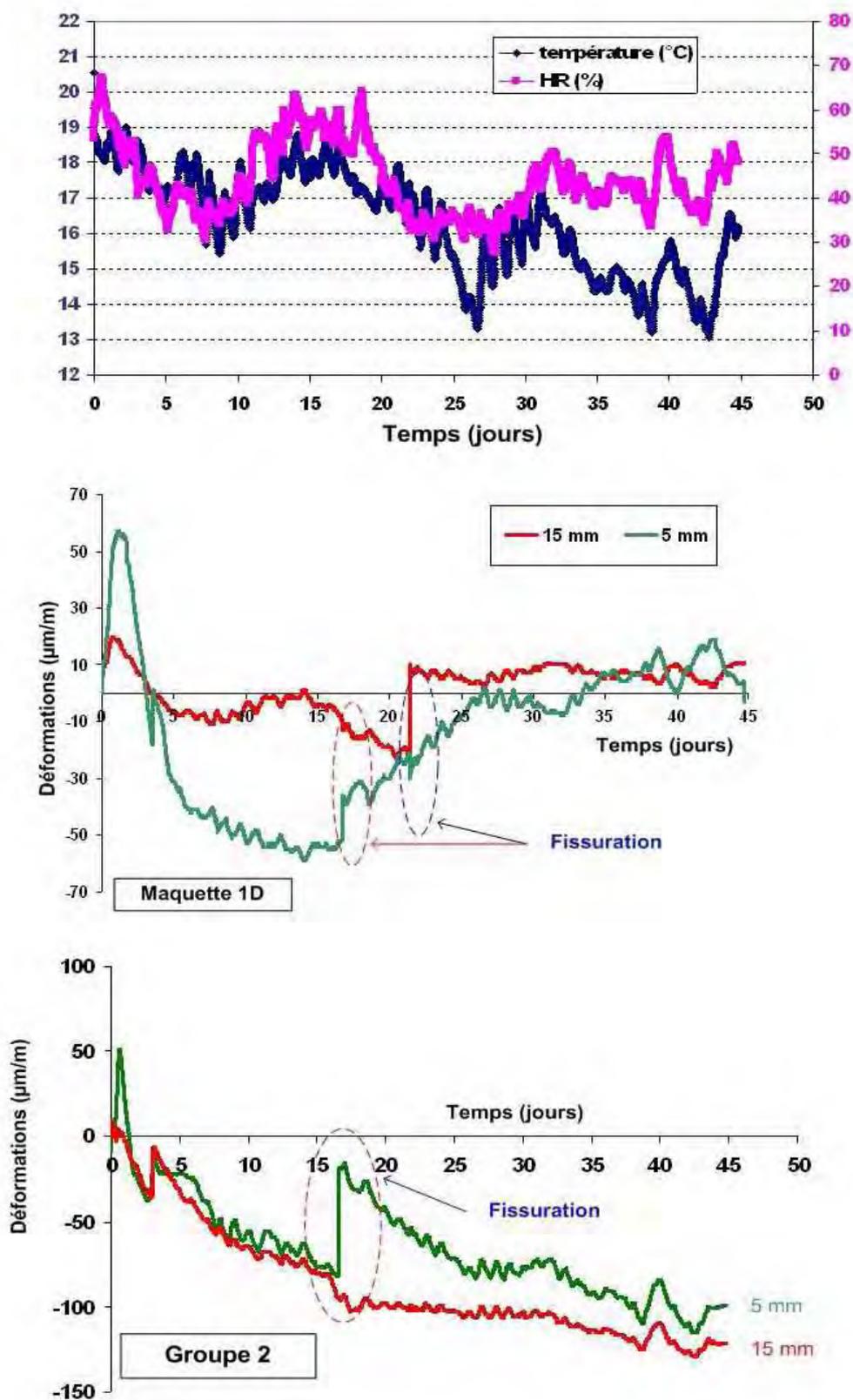
Epaisseur de mortier : 20 mm	Exposition	MA		MB		WA	
		1D	2D	1D	2D	1D	2D
Amplitude des déformations ( $\mu\text{m/m}$ )	Cas 1	250	-	90	-	90	-
	Cas 2	220	300	160	250	60	80
Echéance de fissuration (jours)	Cas 1	6	-	31	-	-	-
	Cas 2	4	4	33	34	16	16
Cas 1 : ambiance contrôlée Cas 2 : ambiance variable							



**Figure II.64** - Influence des variations d'hygrométrie sur l'évolution des déformations en présence d'un support adhérent et sur la fissuration pour le mortier MA



**Figure II.65** - Influence des variations d'hygrométrie sur l'évolution des déformations en présence d'un support adhérent et sur la fissuration pour le mortier MB



**Figure II.66** - Influence des variations d'hygrométrie sur l'évolution des déformations en présence d'un support adhérent et sur la fissuration pour le mortier WA

## II.5 Conclusion sur l'étude expérimentale

La campagne expérimentale nous a permis de mettre en évidence les phénomènes qui régissent le comportement sur site des structures de couches minces de mortiers.

Après une brève présentation des compositions utilisées, une caractérisation physique et mécanique a été effectuée dans le but de mieux cerner l'influence de la formulation sur l'évolution des propriétés des matériaux étudiés. Cette analyse a révélé que les mortiers à base de ciment Portland MA et MB développent des résistances mécaniques plus élevées à terme que ceux à base ternaire WA et WB. Ce comportement est sans doute lié au fait que les mortiers WA et WB ont une porosité plus grande.

En revanche on a constaté que les mortiers WA et WB possèdent de meilleures résistances au jeune âge ( $< 10$  h). Ceci s'explique par le fait que la réactivité de leur phase liante est beaucoup plus rapide et plus importante durant les premières heures suivant le coulage du matériau (résultats des études calorimétrique et conductimétrique). En outre, l'ajout du polymère dans la matrice a non seulement pour effet d'augmenter la déformabilité du matériau, mais aussi sa capacité de rétention d'eau.

Dans un second temps, nous avons étudié le phénomène de dessiccation de la couche de mortier dû à l'évaporation d'une partie de son eau de gâchage vers le milieu ambiant. Le déséquilibre hydrique se traduit donc par des gradients de teneurs en eau entre la surface et le cœur du matériau, générant ainsi des gradients d'hydratation et de déformations. Il apparaît clairement que la progression du front de séchage dans la couche de mortier a non seulement une influence directe sur la distribution des teneurs en eau libre, mais aussi sur la structuration du matériau. Nous avons ainsi décrit plus en détail les techniques de caractérisation des gradients de propriétés dans la couche de mortier telles que :

- la méthode des tranches qui nous a permis de quantifier les gradients de teneurs en eau libre, les gradients de teneurs en eau chimiquement liée ainsi que les gradients de porosité sur la couche de mortier,
- la technique de mesure par jauges noyées qui nous a permis de quantifier les gradients de déformations générés par le retrait différentiel sur la couche de mortier.

Le tracé des profils de teneur en eau, d'hydratation, de porosité et des profils des déformations montrent clairement que les gradients de propriétés sont plus importants au voisinage de la surface de séchage.

Par la suite, nous nous sommes intéressés à la susceptibilité à la fissuration de la couche de mortier. Une attention particulière a été portée à l'étude des variations dimensionnelles en conditions empêchées. Pour cela, un test de fissuration a été développé et validé. Le principe du test est basé sur l'association couche de mortier – support adhérent. Le support choisi est non absorbant et peu déformable. L'étude sur maquettes a révélé que la susceptibilité à la fissuration des couches de mortier est fortement influencée par les paramètres tels que la formulation, les conditions de conservation, l'épaisseur du matériau et l'évolution des gradients de déformations sur la couche de mortier. Ainsi on a pu observer que :

- en atmosphère contrôlée, la fissuration observée sur les structures à base de mortiers MA et MB peut être liée à l'augmentation dans le temps des gradients de déformations au voisinage de la surface de séchage, puisque dans le même temps les gradients de déformations calculés sur les structures à base de mortiers WA et WB qui ne fissurent pas diminuent dans le temps,
- le fait de diminuer l'épaisseur de la couche de mortier ou alors de conserver les maquettes dans une atmosphère ventilée a pour conséquence d'écourter l'échéance de fissuration pour les mortiers MA et MB,
- les variations de température et d'humidité relative ont pour effet une augmentation de la susceptibilité à la fissuration y compris pour les mortiers industriels pour lesquels on n'observe pas de fissuration dans des conditions contrôlées de laboratoire,
- le fait d'ajouter le polymère aux mélanges a pour effet soit de retarder considérablement l'échéance de fissuration (cas du mortier MB), soit de l'éradiquer (cas du mortier WB),
- les études sur maquettes (1D) et sur plaques (2D) ont montré que pour les mêmes conditions d'essai, les échéances de fissuration ainsi que les amplitudes de déformation au moment de la fissuration sont pratiquement les mêmes dans les deux cas de figures ; dans ces conditions, on peut considérer que l'étude de la fissuration sur maquettes (1D) peut être considérée comme représentative du comportement du mortier dans le plan,
- enfin, l'instrumentation de la plaque nous a permis de constater que les déformations mesurées à différents points sont du même ordre de grandeur, ceci révèle donc que le comportement du mortier dans le plan peut être considéré comme isotrope en terme de déformations.



**Partie III : APPROCHE NUMERIQUE DU  
COMPORTEMENT DES COUCHES MINCES  
DE MORTIERS**



## **Partie III : APPROCHE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT DES COUCHES MINCES DE MORTIER**

### **III.1 Introduction**

Dans cette partie, nous présentons une approche mettant en avant l'influence des gradients hydriques induits par le séchage sur l'endommagement des couches minces de mortier pour application d'enduits. Le mortier est appliqué soit sur un support non adhérent pour simuler l'effet du retrait libre soit sur un support adhérent pour simuler l'effet du retrait empêché. Les échanges hydriques entre le matériau et le milieu ambiant ont lieu uniquement par la face supérieure. L'objectif de cette partie est de montrer comment, à partir des résultats expérimentaux obtenus dans la partie précédente, nous avons simulé l'endommagement des couches de mortier sous l'effet du séchage et du retrait empêché.

Pour la modélisation, notre choix s'est porté sur le code de calcul Cast3M, développé par le Département des Etudes Mécaniques et Thermiques (DEMT) du Commissariat Français à l'Energie Atomique (CEA). Ainsi, la méthode des éléments finis est mise en œuvre pour simuler le développement des gradients hydriques induits par le séchage ainsi que les gradients de contraintes résultants. Le caractère endommageable du mortier est pris en compte par l'intermédiaire du modèle d'endommagement de Mazars [Mazars 1984].

L'approche numérique utilisée comporte trois étapes :

- la première étape a consisté à modéliser l'évolution des teneurs en eau libre dans la couche de mortier sous l'effet du séchage,
- par la suite, une simulation des contraintes engendrées par les gradients hydriques est effectuée,
- enfin, la prise en compte d'un endommagement mécanique du matériau sous l'effet combiné du séchage (chargement hydrique) et de la gêne du support est analysée.

### **III.2 Modélisation du comportement hydrique des mortiers**

Dans cette partie, le phénomène de diffusion d'eau à travers le réseau poreux du matériau est résolu numériquement par différences finies. Ce modèle est basé sur une loi de diffusion de Fick, et nous permet d'avoir accès à l'évolution du champ de teneur en eau dans la structure du matériau [Torrenti 1997]. Une fois connue la distribution des teneurs en eau libre dans la

couche de mortier, l'étape suivante consiste à y relier les variations dimensionnelles provoquées par les mouvements d'eau du cœur vers la surface de séchage.

### III.2.1 Les transferts hydriques dans un matériau cimentaire

Dès sa mise en œuvre, le mortier qui était initialement dans un état saturé voit une partie de son eau de gâchage migrer vers le milieu ambiant du fait du déséquilibre hygrométrique qui se crée entre le matériau et le milieu extérieur.

Dans la littérature, le milieu poreux est assimilé à un milieu continu fictif équivalent où les différentes phases (solide, liquide, vapeur) peuvent être considérées comme occupant tout l'espace géométrique [Mensi 1988] [Buffo 2007]. Dans ces conditions, l'équilibre hydrique est géré par les équations de conservation de la masse d'eau totale:

$$\frac{\partial C_{eau}}{\partial t} = \frac{\partial C_l}{\partial t} + \frac{\partial C_v}{\partial t} = -div(\vec{J}_l + \vec{J}_v) - \frac{\partial C_\xi}{\partial t} \quad (III.1)$$

avec :

- $C_{eau}$  la concentration massique d'eau totale,
- $C_l$  la concentration massique d'eau sous forme liquide,
- $C_v$  la concentration massique d'eau sous forme vapeur,
- $C_\xi$  la concentration massique d'eau consommée par l'hydratation,
- $J_l$  la densité de flux massique d'eau liquide,
- $J_v$  la densité de flux massique d'eau vapeur.

#### III.2.1.1 Les transferts d'eau sous forme liquide

Le transport d'eau liquide dans un matériau poreux peut être décrit par la loi de Darcy. Ainsi, la densité de flux massique d'eau liquide  $J_l$  est induite par un gradient de pression  $P_l$ . La loi de Darcy généralisée s'écrit donc :

$$\vec{J}_l = -\rho_l \frac{K_l}{\mu_l} \overrightarrow{grad} P_l \quad (III.2)$$

avec :

- $\rho_l$  la masse volumique de l'eau liquide,
- $K_l$  la conductivité hydraulique,
- $\mu_l$  la viscosité dynamique de l'eau liquide,

- $P_l$  la pression de l'eau liquide à l'intérieur des pores.

### III.2.1.2 Les transferts d'eau sous forme de vapeur

Les mouvements d'eau sous forme vapeur dans un matériau poreux peuvent être décrits par la loi de Fick. Ainsi donc, la densité de flux massique de vapeur d'eau  $J_v$  est induite par un gradient de concentration. La première loi de Fick s'écrit donc :

$$\vec{J}_v = -D_v \overrightarrow{\text{grad}} \rho_v \quad (\text{III.3})$$

avec :

- $\rho_v$  la masse volumique de la vapeur d'eau,
- $D_v$  le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air.

Si on ne tient pas compte de la quantité d'eau consommée par l'hydratation, l'équation de conservation de la masse d'eau s'écrit localement :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\text{div}(\vec{J}_l + \vec{J}_v) \quad (\text{III.4})$$

### III.2.2 Description du modèle de diffusion d'eau

La résolution de l'équation (III.4) se fait en considérant un potentiel de résolution unique en fonction duquel les flux de vapeur d'eau et d'eau liquide doivent être exprimés [Witasse 2000] [Laurence 2001]. Nous avons choisi la teneur en eau en référence aux travaux de Torrenti et al, [Torrenti 1997] et Feron [Feron 2002].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(D(C).gradC) \quad (\text{III.5})$$

avec :

- $C$  la teneur en eau libre du matériau
- $D(C)$  le tenseur des coefficients de diffusion isotrope

Mensi et al. [Mensi 1988] [Laurence 2001] définissent un coefficient d'échange hydrique entre le matériau et le milieu extérieur tel que :

$$-D(C).grad(C) = \lambda(C)(C - C_{eq}) \quad (\text{III.6})$$

avec :

- $C_{eq}$  la teneur en eau à l'équilibre avec le milieu extérieur,
- $\lambda(C)$  le coefficient d'échange hydrique.

Les conditions aux limites au niveau des surfaces d'échanges entre le matériau et le milieu extérieur sont de type convectif.

Dans ces conditions, le coefficient de diffusion  $D(C)$  et le coefficient d'échange  $\lambda(C)$  sont des fonctions non linéaires qui dépendent de la teneur en eau  $C$  du matériau.

Plusieurs expressions de  $D$  sont données dans la littérature [Bazant 1972] [Mensi 1988]:

- la loi proposée par Bazant [Bazant 1972]

$$D(h) = D_0 \left( \alpha + \frac{1-\alpha}{1 + \left( \frac{1-h}{1-h_c} \right)^n} \right) \quad (\text{III.7})$$

avec :

- $h$  la teneur en humidité relative,
- $\alpha, n, \text{ et } h_c$  les paramètres dépendant du matériau étudié.

- la loi de Mensi et Acker [Mensi 1988]

$$D(C) = A \cdot \exp(B \cdot C) \quad (\text{III.8})$$

avec  $A$  et  $B$  les constantes dépendant du matériau.

C'est la loi de Mensi et Acker qui sera retenue dans la suite de cette étude.

### III.2.3 Paramètres de la loi de séchage

Dans cette étude, l'approche utilisée pour modéliser la diffusion d'eau à travers le réseau poreux du matériau est basée sur modèle de Mensi et Acker [Mensi 1988]. Dans cette approche, les conditions initiales supposent que la quantité d'eau évaporable est celle laissée disponible à l'issue de l'hydratation complète du matériau. Ceci implique que dans le modèle de séchage présenté, la quantité d'eau évaporable  $C_0$  soit considérée comme étant la teneur en eau initiale de gâchage  $W$  diminuée d'une proportion  $W_h$  destinée à l'hydratation du mortier. Dans la littérature, la proportion d'eau réagissant avec le ciment  $\gamma$  varie selon les auteurs dans une plage allant de 0,2 [Baroguel 1994] à 0,42 [Chanvillard 1999].

Dans cette étude nous avons retenu l'expression proposée par Torrenti et al. [Torrenti 1997] :

$$C_0 = W - W_h \quad (\text{III.9})$$

et 
$$W_h = r \cdot \gamma \cdot B_m \quad (\text{III.10})$$

Dans l'équation (III.10),  $r$  est le degré d'hydratation,  $B_m$  est la quantité de liant utilisé dans la formulation du mortier.

Le degré d'hydratation peut être estimé à partir de l'évolution des résistances en compression [Feron 2002] selon:

$$r(t) = f_c(t) / f_\infty \quad (\text{III.11})$$

Où  $f_c(t)$  est la résistance en compression moyenne du matériau au temps  $t$  jours et  $f_\infty$  la résistance en compression maximale (dans notre étude nous avons considéré la résistance en compression à 28 jours).

Il est nécessaire ici de connaître l'évolution du coefficient de diffusion de l'eau à travers le réseau poreux du matériau. Pour résoudre ce problème, l'expression de la fonction de diffusion proposée par Mensi et Acker [Mensi 1988], reprise par Torrenti et al. [Torrenti 1997] a été retenue.

$$D(C) = A \cdot \exp(B \cdot C) \quad (\text{III.12})$$

Dans cette loi les paramètres  $A$  et  $B$  déterminent la cinétique de séchage [Laurence 2001]. Ces paramètres sont très influents sur les résultats des teneurs en eau obtenues après résolution de l'équation de diffusion.

La fonction de transfert qui permet de définir les conditions aux limites est donnée par l'expression suivante [Torrenti 1997]:

$$f(C) = \beta \cdot ((2C_0 - C_{eq}) - C) \quad (\text{III.13})$$

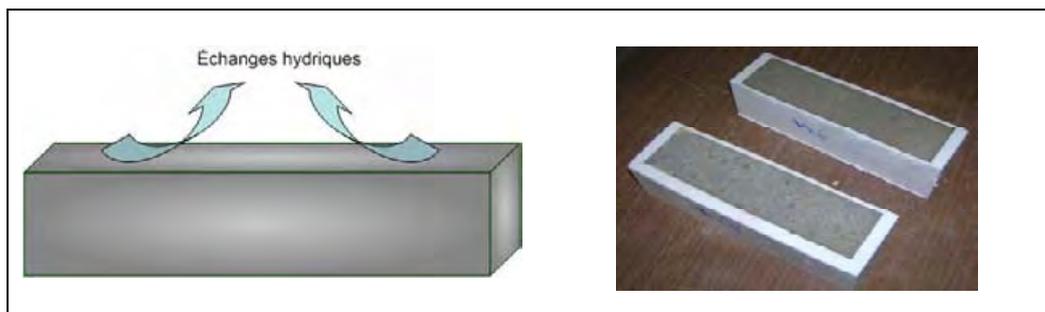
avec :

- $\beta$  une constante du matériau égale à  $5 \times 10^{-10}$  (m/s)
- $C_{eq}$  la teneur en eau en équilibre avec l'hygrométrie extérieure déterminée à partir de la courbe de l'isotherme de désorption du matériau (voir annexe F).

### III.2.3.1 Identification et validation des paramètres de séchage

Dans la loi de diffusion (III.12) les paramètres  $A$  et  $B$  qui déterminent la cinétique de séchage peuvent être déterminés numériquement en simulant la perte de masse d'une éprouvette de matériau sous l'effet du séchage [Laurence 2001]. Des études antérieures réalisées par Mensi et Acker [Mensi 1988] montrent que le paramètre  $B$  peut être pris égal à 0,05.  $A$  devient alors le seul paramètre à identifier.

Afin de déterminer le paramètre  $A$ , nous avons simulé la perte de masse sur des éprouvettes prismatiques de  $40 \times 40 \times 160$  mm de dimensions séchant à une humidité relative de  $65 \pm 5\%$  et une température de  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ . Pour les conditions aux limites hydriques, nous avons considéré que l'échange se produit uniquement sur la face supérieure, les 5 autres faces étant protégées de la dessiccation. Les conditions d'échange avec le milieu extérieur sont représentées sur la figure III.1.



**Figure III.1** - Conditions d'échanges hydriques entre le matériau et le milieu extérieur

Pour le calcul, les conditions aux limites sont les suivantes :

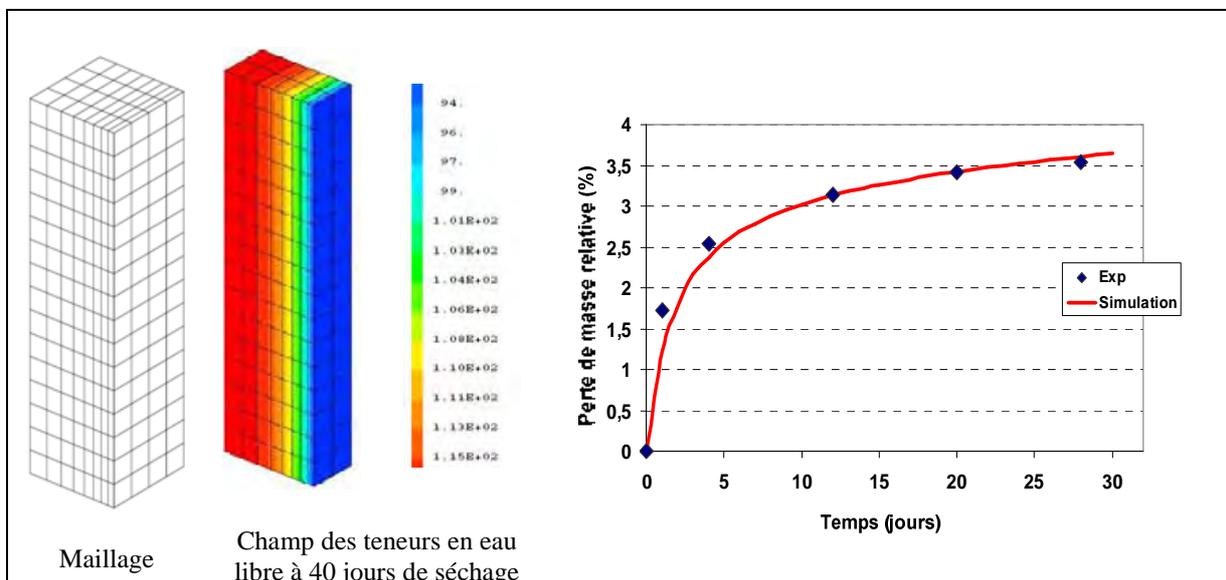
- la teneur en eau au voisinage de la surface est égale à la teneur en eau en équilibre avec le milieu extérieur,
- le chargement est pris en considération par un flux de teneur en eau,
- les échanges hydriques entre le matériau et le milieu extérieur sont de type convectif

Les paramètres d'entrée pour le modèle de séchage pour les 4 mélanges sont donnés dans le tableau III.1 [Laurence 2001].

**Tableau III.1** - Paramètres d'entrée pour le modèle de séchage pour les différents mélanges

	W (l/m <sup>3</sup> )	C <sub>0</sub> (l/m <sup>3</sup> )	C <sub>eq</sub> (l/m <sup>3</sup> )	γ	r	B <sub>m</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
MA	292	171	94	0,2	0,89	680
MB	280	159	87	0,2	0,89	653
WA	400	220	116	0,25	1	920
WB	400	220	116	0,25	0,9	855

La figure III.2 présente le champ de teneur en eau libre ainsi que la courbe simulée de l'évolution de la perte de masse relative pour le mortier MA au bout de 30 jours de séchage. La figure III.2 montre ainsi une assez bonne corrélation entre la courbe de séchage simulée et les mesures expérimentales. Dans ce cas, la valeur du paramètre de séchage  $A = 10 \times 10^{-13}$  a été retenue.

**Figure III.2** - Simulation de la perte de masse relative sur éprouvette 40×40×160 mm pour le mortier MA

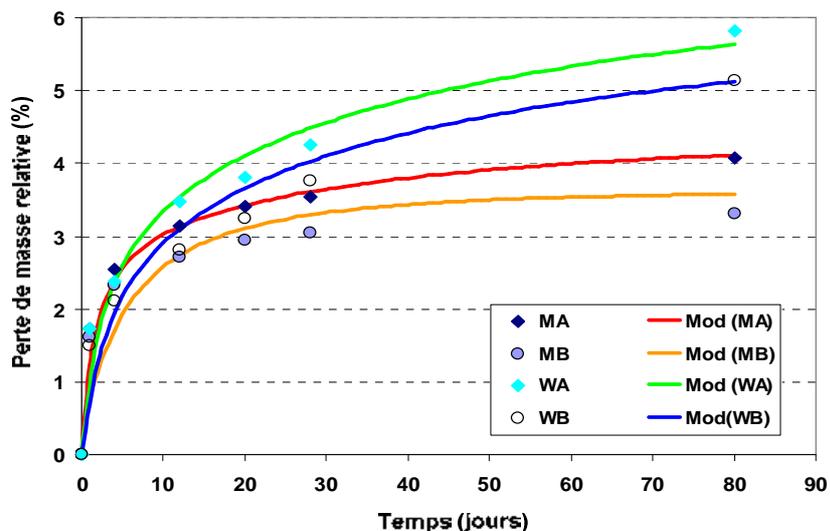
La figure III.3 présente les évolutions des pertes de masse relatives des 4 mortiers après 80 jours de séchage. On remarque que le modèle sous-estime le séchage durant les premiers jours surtout dans le cas du mortier MB.

Les valeurs du paramètre  $A$  correspondant à l'ajustement des courbes de perte de masse relative sont résumées sur le tableau III.2.

L'influence de l'effet du polymère sur la rétention d'eau se traduit par une diminution de l'amplitude du paramètre  $A$ .

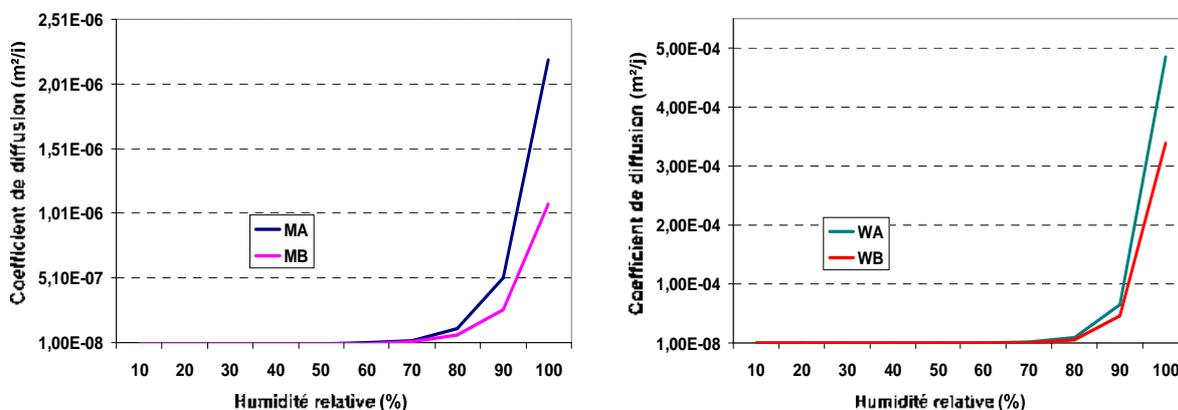
**Tableau III.2** - Paramètre de la loi de séchage pour les 4 mortiers

Mortier	MA	MB	WA	WB
A (m <sup>2</sup> /s)	$10 \times 10^{-13}$	$9 \times 10^{-13}$	$10 \times 10^{-13}$	$7 \times 10^{-13}$



**Figure III.3** - Simulation de la perte de masse relative sur éprouvette 40×40×160 mm pour les 4 formulations

A partir des paramètres précédents, nous pouvons représenter l'évolution du coefficient de diffusion hydrique  $D(C)$  de chaque mortier en fonction de l'humidité relative (voir figure III.4).



**Figure III.4** - Evolution du coefficient de diffusion hydrique en fonction de l'humidité relative du matériau

On observe que la cinétique d'évolution du coefficient de diffusion est importante dans le domaine d'humidité relative comprise entre 90 et 100%. Cette cinétique se stabilise pour une humidité relative inférieure à 65%.

### III.2.3.2 Etude d'influence du paramètre A sur la cinétique de séchage

Pour avoir une idée de l'influence du paramètre de diffusion A sur la cinétique de séchage, nous avons simulé la perte de masse d'une éprouvette 40×40×160 mm. Dans ce cas, le séchage se produit sur toutes les faces de l'éprouvette après démoulage au bout de 24 heures de cure dans une salle à température et hygrométrie contrôlées (température de 20°C ± 1°C et une humidité relative de 65 ± 5%). Le matériau d'étude est le mortier MA. Les résultats sont présentés sur la figure III.5. On remarque que plus la valeur du paramètre A est grande, plus la cinétique de séchage augmente. Le paramètre A a une grande influence sur la cinétique de séchage à court terme. Toutefois, quelle que soit la valeur de A retenue, on observe qu'à long terme les courbes convergent vers une même valeur de perte de masse qui correspond à la teneur en eau en équilibre avec l'hygrométrie extérieure ( $C_{eq}$ ).

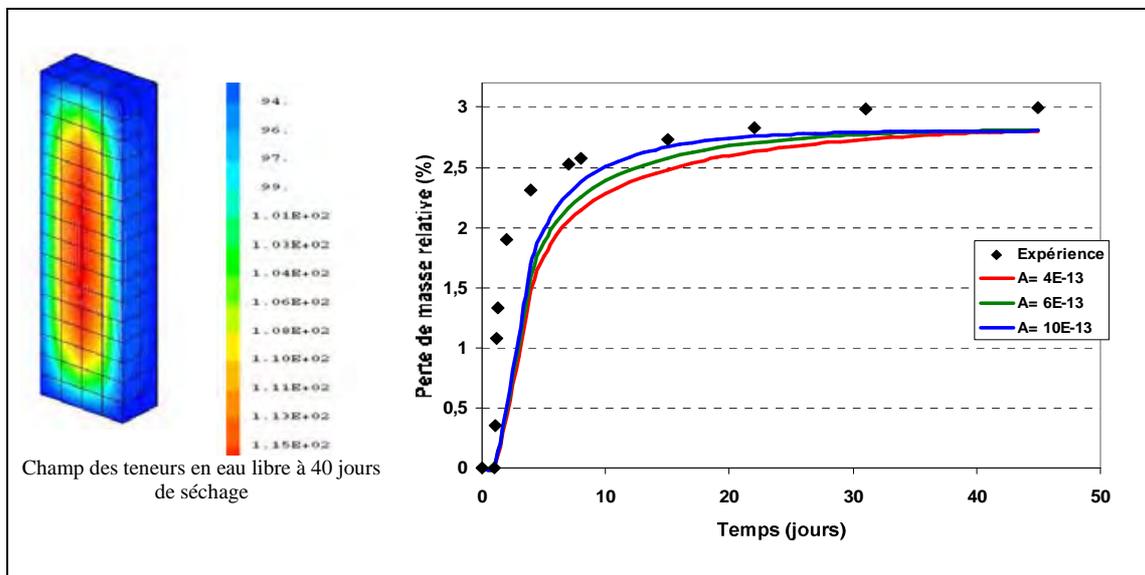


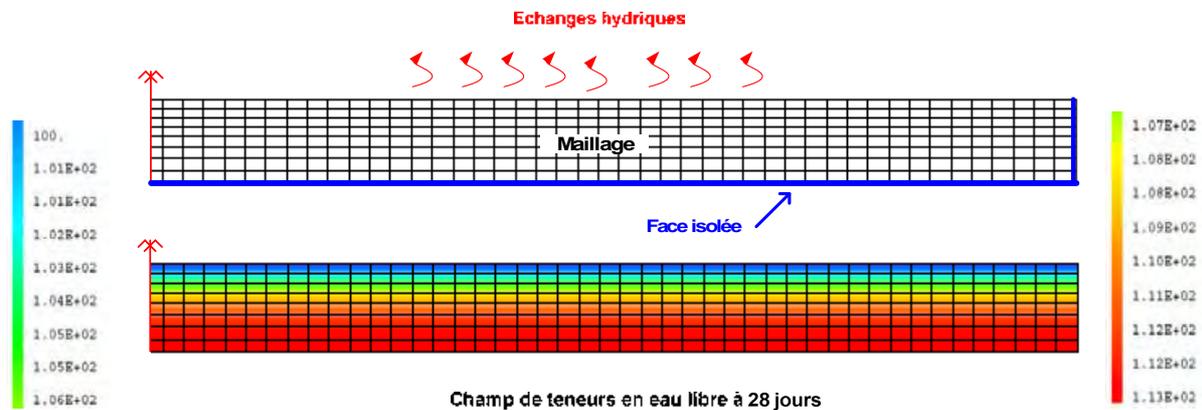
Figure III.5 - Influence du paramètre A sur la cinétique de séchage : cas du mortier MA

### III.2.4 Modélisation des profils hydriques sur l'épaisseur de la couche de mortier

La structure modélisée est une couche de mortier de 50×40×900 mm qui est soumise aux mêmes conditions de séchage qu'une éprouvette 40×40×160 mm telle que représentée dans la section III.2.3.1. L'humidité relative extérieure est considérée constante et égale à 65%. Pour cette étude, les mêmes paramètres de la loi de diffusion sont retenus (voir tableau III.3). L'épaisseur de la couche de mortier est de 40 mm. Le maillage de la structure ainsi que les conditions aux limites hydriques sont présentés sur la figure III.6.

**Tableau III.3** - Paramètres d'entrée pour le modèle de séchage

	$C_0$ (l/m <sup>3</sup> )	$C_{eq}$ (l/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> /s)
MA	171	94	$10 \times 10^{-13}$
MB	159	87	$9 \times 10^{-13}$
WA	220	116	$10 \times 10^{-13}$
WB	220	116	$7 \times 10^{-13}$

**Figure III.6** - Représentation du maillage plan d'une demi éprouvette et du champ des teneurs en eau libre : cas du mortier MA

Les figures III.7, III.8, III.9 et III.10 présentent les profils des teneurs en eau libre simulés au cours du temps pour les 4 mortiers et la comparaison avec les mesures. Quel que soit le type de mortier, on remarque dès les premiers jours d'importants gradients de teneur en eau entre la surface et le cœur du matériau.

Pour le mortier MB, le modèle sous-estime légèrement le séchage à 3 jours comparé aux 3 autres mortiers. Ce phénomène a déjà été observé sur la simulation de la perte de masse effectuée sur les prismes 40×40×160 mm.

Dans l'ensemble, on remarque que les profils simulés présentent une assez bonne corrélation avec les mesures effectuées.

Toutefois en observant les profils des teneurs en eau libre simulés pour les mortiers WA et WB (voir figures III.9 et III.10), on constate que le modèle sous estime la perte en eau au voisinage de la surface de séchage.

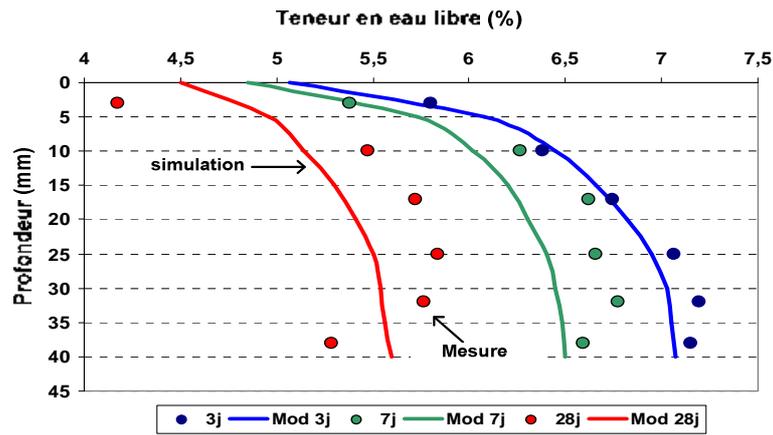


Figure III.7 - Profils de teneur en eau libre sur l'épaisseur de la couche de mortier MA

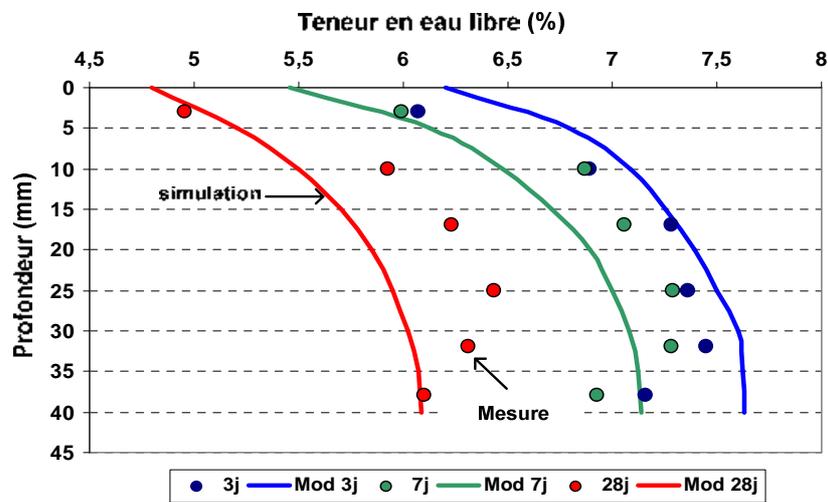


Figure III.8 - Profils de teneur en eau libre sur l'épaisseur de la couche de mortier MB

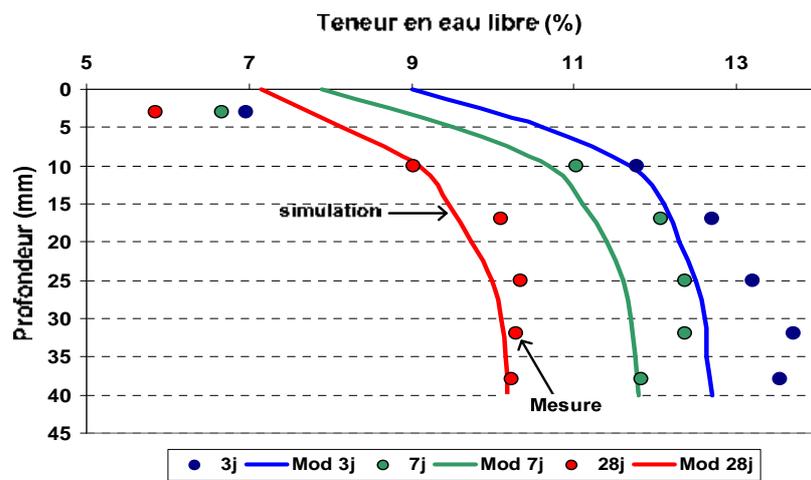
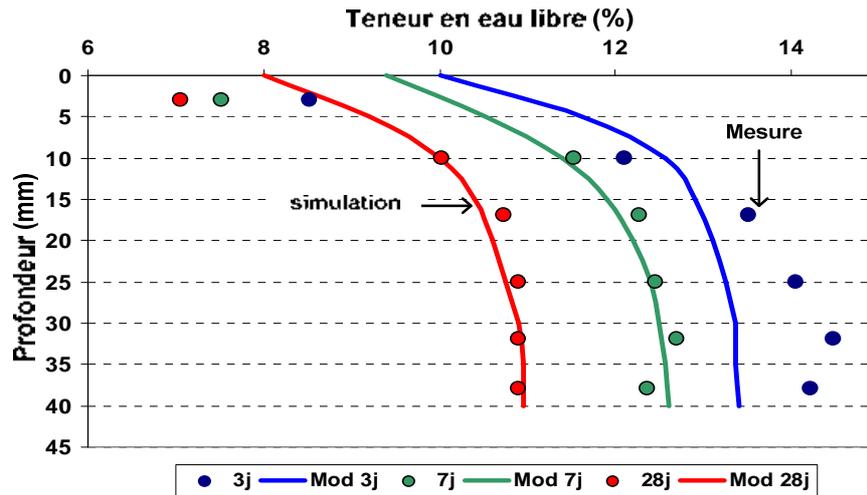


Figure III.9 - Profils de teneur en eau libre sur l'épaisseur de la couche de mortier WA



**Figure III.10** - Profils de teneur en eau libre sur l'épaisseur de la couche de mortier WB

### III.3 Modélisation des variations dimensionnelles en présence d'un support non adhérent

Cette étape consiste à modéliser les variations dimensionnelles qui sont générées par les mouvements d'eau libre à travers le réseau poreux du matériau. La déformation totale est ici prise en compte en ajoutant à la déformation provoquée par le séchage une déformation supplémentaire qui se développe dans toute la couche de mortier [Tran 2006]. Cette déformation supplémentaire correspond à la part attribuable au retrait endogène de l'éprouvette.

Dans cette partie, le comportement viscoélastique du matériau n'est pas pris en compte. Pourtant nous sommes conscients qu'il occupe une place importante dans le comportement du matériau qui subit un séchage différentiel. Ce phénomène se traduit notamment par la redistribution des contraintes dans la couche de mortier après l'apparition des microfissures au voisinage de la surface de séchage [Granger 1997b] [Sellier 2006]. Mais pour des raisons de temps, nous n'avons pas pu le prendre en compte.

#### III.3.1 Modélisation du retrait de séchage

En se basant sur les travaux effectués par Granger et al. [Granger 1997a], le retrait de séchage d'un élément de volume peut être considéré comme proportionnel à sa perte de masse. L'auteur a démontré que localement le retrait de séchage exogène pouvait être relié à la variation de la teneur en eau par une loi linéaire [Granger 1997a].

$$\varepsilon_s = p \cdot \Delta C \quad (\text{III.14})$$

avec :

- $\varepsilon_s$  le retrait de séchage exogène,
- $\Delta C$  la variation de la teneur en eau,
- $p$  le coefficient de contraction hydrique ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) qui peut être obtenu à partir des courbes  $\varepsilon_s - \Delta C$  donnant l'évolution du retrait de dessiccation en fonction de la variation de la teneur en eau  $\Delta C$  (%) [Feron 2002] [Laurence 2001] [Sadouki 1997].

### III.3.1.1 Détermination du coefficient de contraction hydrique

Sur les figures III.11, III.12, III.13 et III.14, sont présentées les courbes  $\varepsilon_s - \Delta C$  donnant l'évolution du retrait de séchage en fonction de la perte de masse pour les 4 mortiers. Les mesures de retrait et de perte de masse sont effectuées sur des éprouvettes de dimensions  $40 \times 40 \times 160$  mm séchant sur une seule face (voir § II.2.4.3). Le coefficient de contraction hydrique correspond ici au rapport de la pente de la droite  $\varepsilon_s - \Delta C$  sur la masse volumique du mortier.

$$p = \frac{y}{\rho_{\text{mortier}}} \quad (\text{III.15})$$

avec :

- $y$  la pente de la droite  $\varepsilon_s - \Delta C$ ,
- $\rho_{\text{mortier}}$  la masse volumique apparente du mortier.

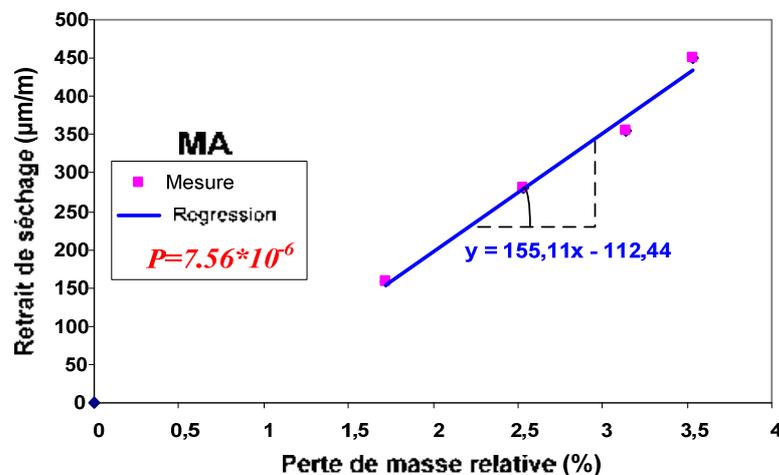


Figure III.11- Détermination du coefficient de contraction hydrique  $p$  pour le mortier MA

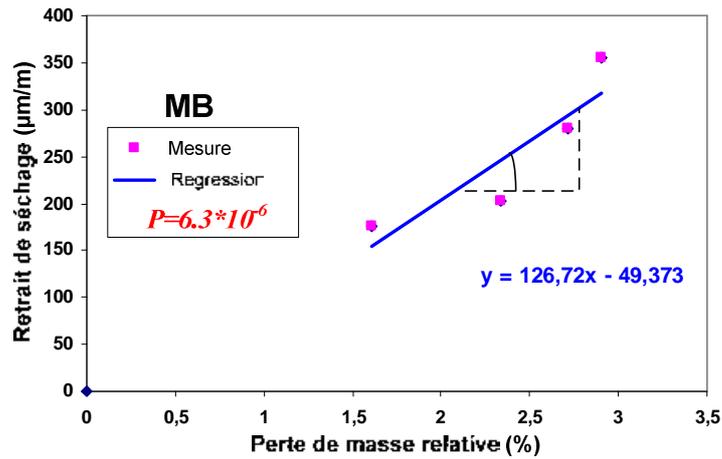


Figure III.12 - Détermination du coefficient de contraction hydrique  $p$  pour le mortier MB

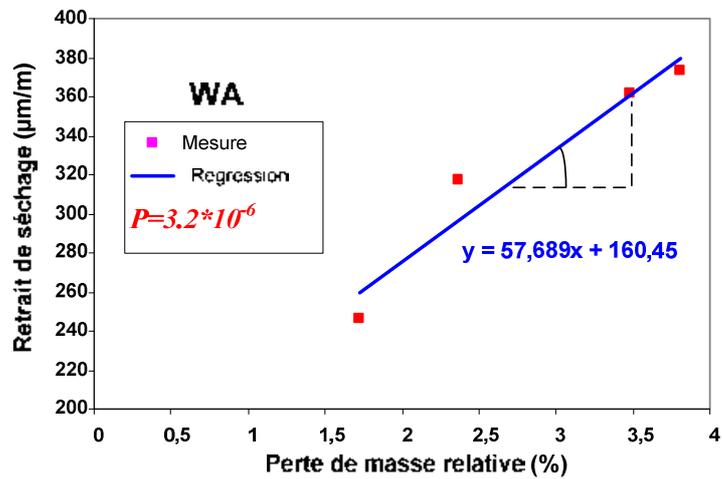


Figure III.13 - Détermination du coefficient de contraction hydrique  $p$  pour le mortier WA

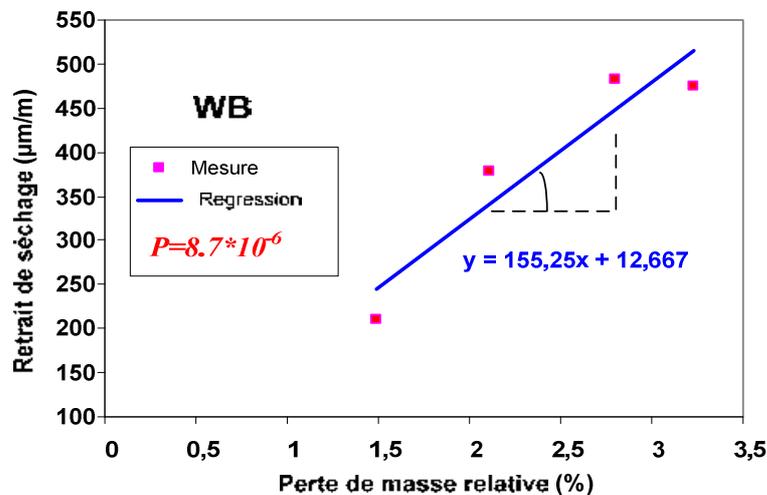


Figure III.14 - Détermination du coefficient de contraction hydrique  $p$  pour le mortier WB

On remarque que le mortier MA a un coefficient de contraction hydrique plus grand que le mortier MB qui contient du polymère. En revanche, le coefficient de contraction hydrique du mortier WB est plus élevé que celui du mortier WA.

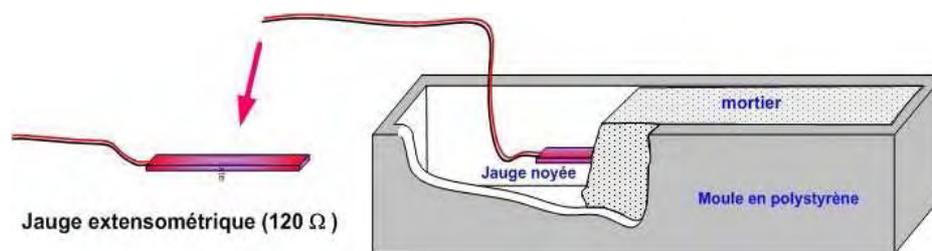
### III.3.1.2 Validation sur éprouvette 40×40×160 mm

La validation du modèle est effectuée au moyen de la simulation des variations dimensionnelles mesurées sur des prismes de 40×40×160 mm de dimensions séchant sur une seule face (voir figure III.15).

Pour simuler les variations dimensionnelles dues au séchage dans Cast3M, les paramètres mécaniques et physiques suivants sont requis en plus des paramètres hydriques mentionnés dans la section III.1.4:

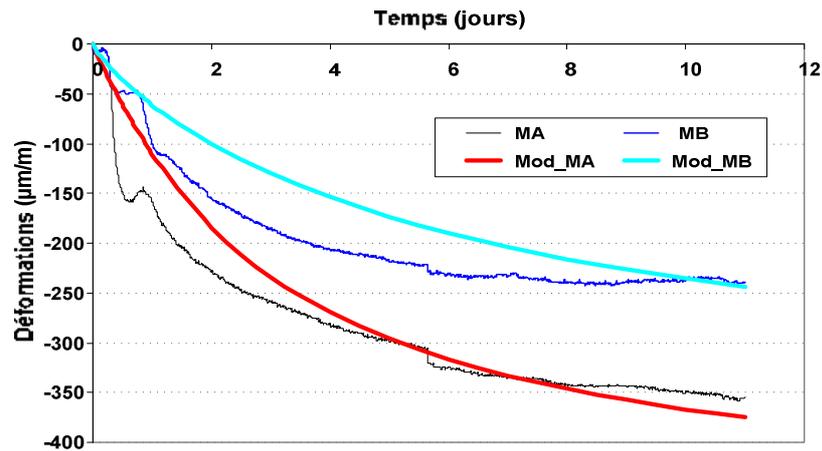
- le module de Young en traction du matériau ( $E$ ),
- le coefficient de poisson du matériau ( $\nu$ ),
- la masse volumique du matériau ( $\rho$ ),
- le coefficient de contraction hydrique du matériau ( $p$ ).

Les paramètres  $E$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  sont déduits des mesures expérimentales.



**Figure III.15** - Principe de mesure des variations dimensionnelles avec des jauges noyées

La figure III.16 présente les courbes de simulation du retrait de séchage pour les mortiers MA et MB. Les paramètres d'entrée sont présentés sur le tableau III.4. Expérimentalement, la déformation générée par le séchage est obtenue en soustrayant à la déformation totale la part de déformation mesurée en conditions endogènes. Les courbes issues de la simulation sont comparées aux mesures effectuées à l'aide de jauges noyées.

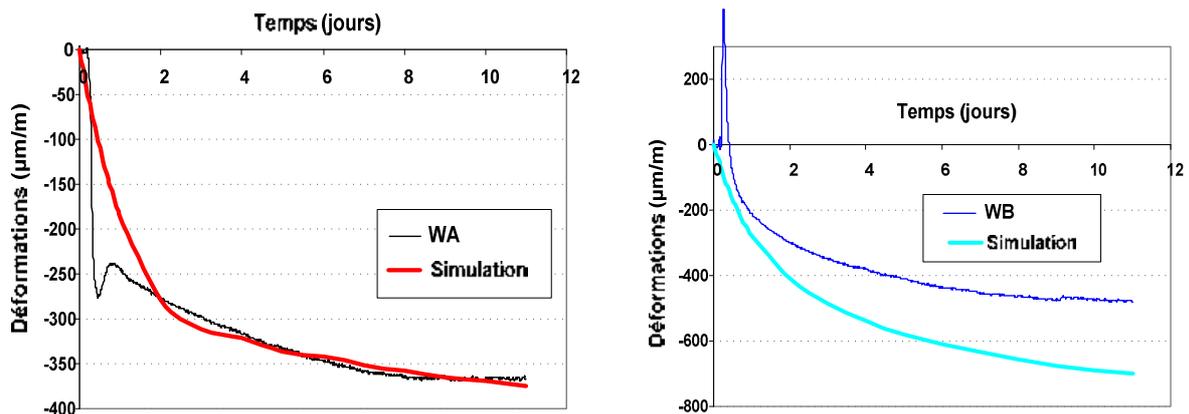


**Figure III.16** - Simulation du retrait de séchage sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas des mortiers MA et MB

**Tableau III.4** - Paramètres d'entrée pour la simulation du retrait de séchage

	E (MPa)	$\nu$	$p$ (m <sup>3</sup> /kg)
MA	15500	0,13	7,56
MB	14500	0,13	6,3
WA	13500	0,2	3,2
WB	13000	0,2	8,7

Les courbes de simulation du retrait de séchage pour les mortiers WA et WB sont présentées sur la figure III.17.



**Figure III.17** - Simulation du retrait de séchage sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas des mortiers WA et WB

Les paramètres d'entrée sont présentés sur le tableau III.4. Expérimentalement, la déformation induite par le séchage est obtenue en soustrayant à la déformation totale la déformation mesurée en conditions endogènes.

Pour les trois mortiers MA, MB et WA on note une assez bonne corrélation entre les courbes des déformations simulées et les déformations de séchage mesurées, bien que le modèle semble sous – estimer les déformations durant les premiers jours. En revanche pour le mortier WB, un écart important est observé entre le modèle et les déformations de séchage calculées. Cela peut être dû à un artefact de mesure soit sur les courbes des déformations en condition de séchage soit sur les courbes de déformations mesurées en condition endogène. L'erreur peut provenir également d'une surestimation du coefficient de contraction hydrique  $p$ .

### III.3.2 Modélisation du retrait total avec prise en compte du retrait endogène

#### III.3.2.1 Cas des mortiers MA et MB

D'après Tran et al. [Tran 2005], le retrait endogène peut être traité comme une perte en eau qui se produit de façon uniforme dans tout le volume de mortier et qui est générée par le processus d'hydratation. Ce phénomène peut être traité comme une perte en eau additionnelle et peut ainsi être superposé à la perte en eau due au séchage. La relation (III.14) devient alors :

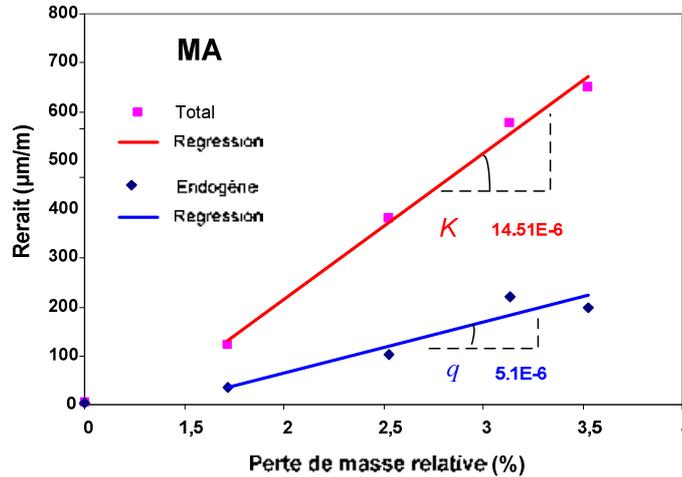
$$\varepsilon_t = \varepsilon_h + \varepsilon_s = q.\Delta C' + p.\Delta C \quad (\text{III.16})$$

avec :

- $\varepsilon_s$  le retrait de séchage exogène,
- $\varepsilon_h$  le retrait endogène,
- $p$  le coefficient de contraction hydrique de séchage,
- $q$  le coefficient de contraction hydrique endogène,
- $C$  la teneur en eau libre dans le matériau,
- $C'$  la teneur en eau non évaporable du matériau.

Dans la littérature, les phénomènes d'hydratation et de séchage sont généralement traités de façon couplée [Buffo 2007] [Feron 2002] [Adnan 2007].

Dans cette étude, nous avons opté pour une approche simplifiée pour traiter le problème de retrait. Les courbes  $\varepsilon_h - \Delta C$  et  $\varepsilon_t - \Delta C$  donnant respectivement les évolutions du retrait endogène et du retrait total en fonction de la perte de masse pour le mortier MA sont représentées sur la figure III.18.



**Figure III.18** - Détermination des coefficients  $K$  et  $q$  dus au retrait pour le mortier MA

On remarque que cette variation est quasiment linéaire. Les coefficients  $q$  et  $K$  peuvent être déduits par calcul de la pente de la droite de régression.

En reliant les deux composantes du retrait (on considère ici la perte en eau en condition endogène comme une perte en eau supplémentaire qui se produit dans le volume du matériau) par l'expression (III.17):

$$\frac{\varepsilon_h}{(\varepsilon_h + \varepsilon_s)} \approx \frac{q}{K} = \phi \quad (\text{III.17})$$

avec  $\phi$  une constante qui dépend du matériau et des conditions d'exposition.

Si nous réécrivons l'équation (III.16) :

$$\varepsilon_t = \left(1 + \frac{\phi}{(1-\phi)}\right) \cdot p \cdot \Delta C = \left(1 + \frac{\phi}{1-\phi}\right) \cdot \varepsilon_s \quad (\text{III.18})$$

L'équation (III.18) nous permet ainsi d'exprimer le retrait total en fonction du retrait de séchage, soit encore:

$$\varepsilon_t = P \cdot \Delta C \quad (\text{III.19})$$

avec :

$$\begin{cases} P = \left(1 + \frac{\phi}{1-\phi}\right) \cdot p = (1 + \chi) \cdot p \\ \chi = \frac{\phi}{1-\phi} > 0 \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

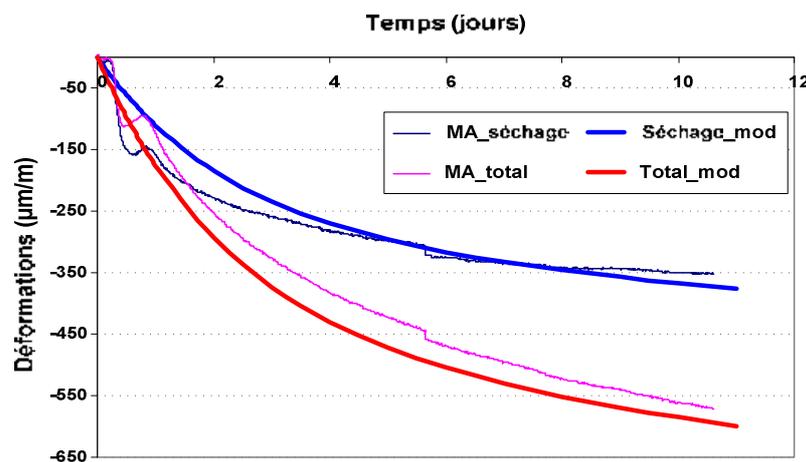
Le coefficient  $P$  qui tient compte du retrait endogène est proportionnel au coefficient de contraction hydrique  $p$ .

Les valeurs du coefficient  $\chi$  (que nous appellerons paramètre d'autodessiccation) obtenues par calcul pour les mortiers MA et MB sont présentées sur le tableau III.5.

**Tableau III.5** - Paramètre d'autodessiccation pour les mortiers MA et MB

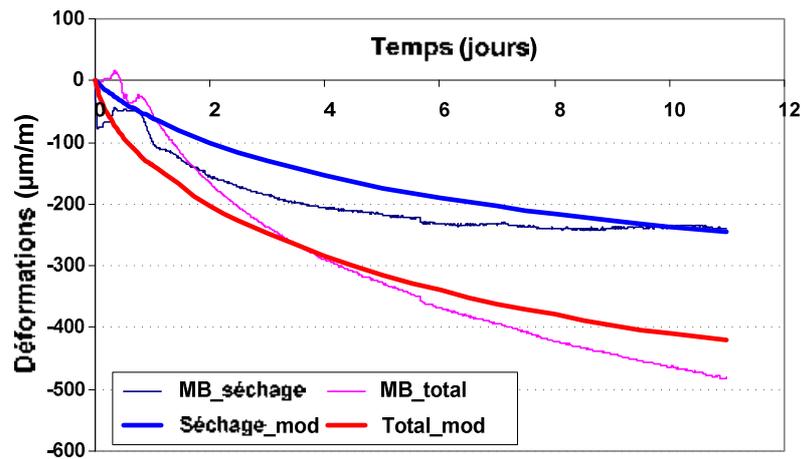
Mortier	MA	MB
$\chi$	0,53	0,51

Les figures III.19 et III.20 présentent les résultats de la simulation des déformations totales pour les mortiers MA et MB avec la prise en compte de la part de déformation générée par le retrait endogène.



**Figure III.19** - Simulation des retraits de séchage et total sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas de mortiers MA

Dans le cas du mortier MA, on remarque une assez bonne corrélation entre la courbe simulée et la mesure. En revanche pour le mortier MB, le modèle a tendance à sous-estimer la déformation, en particulier à long terme.



**Figure III.20** - Simulation des retraits de séchage et total sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas de mortiers MB

### III.3.2.2 Cas des mortiers WA et WB

Pour les mortiers WA et WB, la déformation endogène est considérée dans le calcul comme une déformation imposée (dans Cast3m, cette déformation peut être prise en compte comme une déformation thermique), ce qui nous permet de prendre en compte la phase de gonflement qui se produit durant les premières heures. La variation thermique s'exprime de la manière suivante :

$$\Delta T = \frac{\varepsilon_{th}}{\alpha_{th}} \quad (III.21)$$

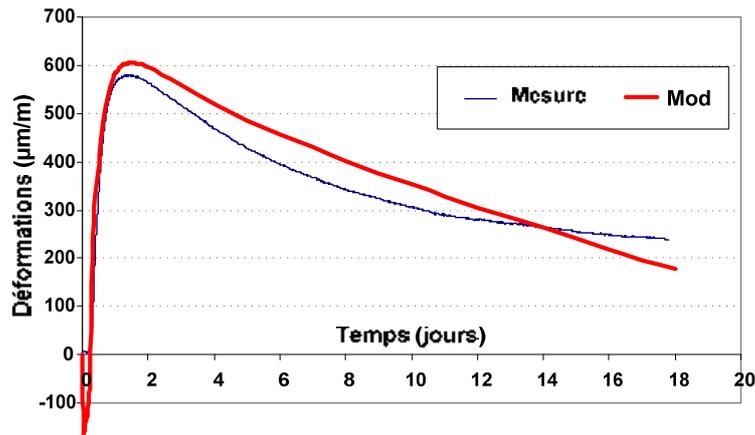
Avec :

- $\varepsilon_{th}$  la déformation d'origine thermique,
- $\Delta T$  la variation de température,
- $\alpha_{th}$  le coefficient de dilatation thermique du mortier.

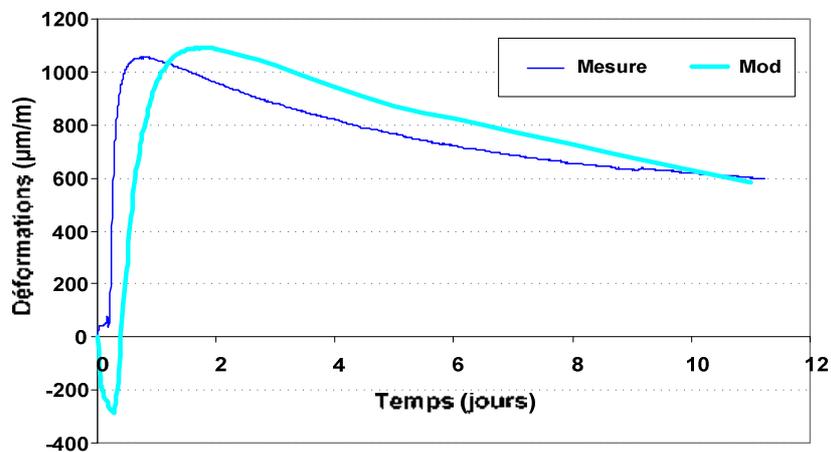
La déformation endogène est mesurée sur des prismes de dimensions 40×40×160 mm pour lesquels aucun échange hydrique n'est possible avec le milieu ambiant (voir § II.2.4.3). Le coefficient de dilatation thermique  $\alpha_{th}$  est considéré constant et égal à  $1 \times 10^{-6}$  ( $\alpha_{béton}$ ).

Les figures III.21 et III.22 présentent les résultats de simulation des déformations totales pour les mortiers WA et WB avec la prise en compte des déformations endogènes.

On remarque dans le cas du mortier WA une assez bonne corrélation entre la courbe simulée et les mesures durant les premiers jours. En revanche à long terme, le modèle a tendance à surestimer la déformation qui se produit pendant la phase de retrait.



**Figure III.21** - Simulation du retrait total sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas de mortiers WA



**Figure III.22** - Simulation du retrait total sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas de mortiers WB

### III.3.3 Modélisation des profils de déformations sur l'épaisseur de la couche de mortier

Comme pour la modélisation des profils hydriques, la structure modélisée est une couche de mortier de 50×40×900 mm de dimensions qui est soumise aux mêmes conditions de séchage que l'éprouvette 40×40×160 mm représentée dans la section III.2.3.1. L'humidité extérieure est considérée constante et égale à 65%. Pour cette étude, les paramètres d'entrée sont les suivants :

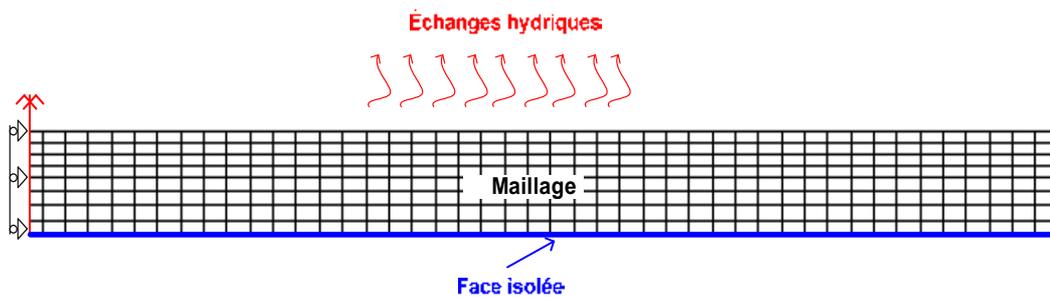
- les paramètres de séchage sont les mêmes que ceux utilisés pour la modélisation des profils hydriques (voir § III.2.4),
- les paramètres mécaniques sont ceux utilisés pour la modélisation du retrait libre sur prismes 40×40×160 mm (voir § III.3.1.2).

Les paramètres d'entrée du modèle pour les 4 mortiers sont résumés sur le tableau III.6. L'épaisseur de la couche de mortier est de 40 mm.

**Tableau III.6** - Paramètres d'entrée pour la simulation des déformations

	Paramètres de diffusion			Paramètres mécaniques		Coefficient de contraction hydrique	
	$C_0$ (l/m <sup>3</sup> )	$C_{eq}$ (l/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> /s)	E (MPa)	$\nu$	$p$ (m <sup>3</sup> /kg)	P (m <sup>3</sup> /kg)
MA	171	94	10. E <sup>-13</sup>	15500	0,13		10,7E <sup>-6</sup>
MB	159	87	7. E <sup>-13</sup>	14500	0,13		9,7E <sup>-6</sup>
WA	220	116	10. E <sup>-13</sup>	13500	0,2	3,2E <sup>-6</sup>	
WB	220	116	7. E <sup>-13</sup>	13000	0,2	5,7E <sup>-6</sup>	

Le maillage de la structure ainsi que les conditions aux limites hydriques sont présentés sur la figure III.23. Les calculs sont effectués en contraintes planes sans prise en compte de l'endommagement.



**Figure III.23** - Maillage de la demi - éprouvette

La figure III.24 présente l'évolution du champ de contraintes suivant la direction xx dans la structure déformée pour le mortier MA. On remarque un effet de tuilage qui se produit aux extrémités de la couche de mortier du fait du retrait différentiel. Les contraintes sont plus grandes au voisinage de la surface de séchage là où les gradients hydriques sont les plus importants.

Sur les figures III.25, III.26, III.27 et III.28 sont présentées les courbes de simulation des variations dimensionnelles dans la couche de matériau ainsi que les profils de déformation à 1, 3 et 7 jours.

Les figures III.25 et III.26 montrent ainsi que pour les mortiers MA et MB, l'approche utilisée pour modéliser les variations dimensionnelles dans la couche de mortier soumise au séchage permet de reproduire correctement l'amplitude et la cinétique d'évolution des variations

dimensionnelles ainsi que les gradients de déformations générés par le retrait différentiel. Les résultats de la simulation sont en adéquation avec les mesures.

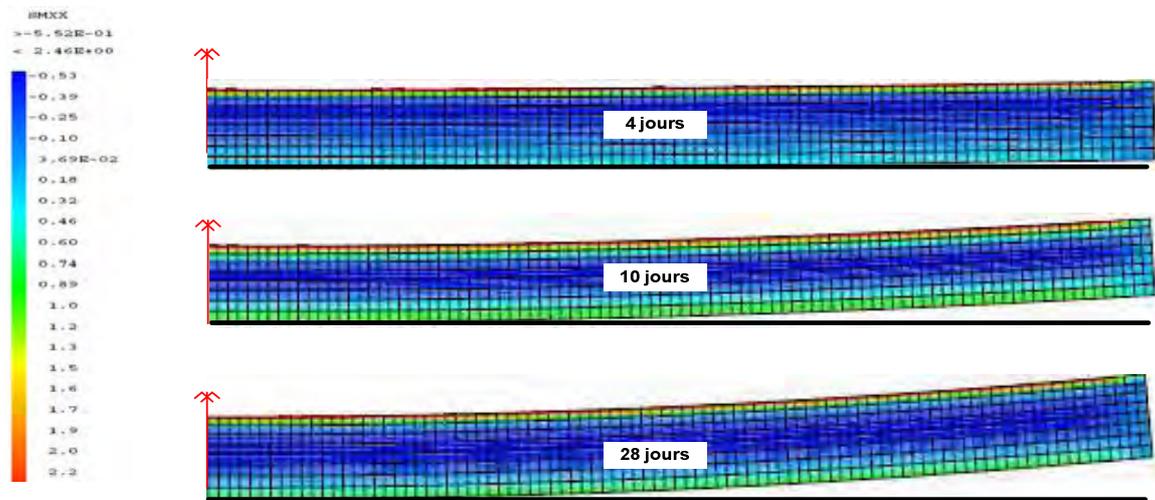


Figure III.24 - Evolution du champ de contraintes  $\sigma_{xx}$  dans la couche de mortier MA

Pour les mortiers WA et WB, les figures III.27 et III.28 montrent globalement qu'au delà de 1 jour de séchage, le modèle permet de reproduire de façon adéquate l'amplitude, la cinétique d'évolution des variations dimensionnelles, ainsi que les gradients de déformations générés par le retrait différentiel induit par le séchage. Les résultats de la simulation sont comparés aux mesures des déformations effectuées dans la couche de mortier. On note toutefois un décalage entre le modèle et la mesure durant les 24 premières heures. Ceci démontre que dans les calculs, le séchage est légèrement surestimé (on sous-estime sans doute les effets de la température et de l'expansion chimique).

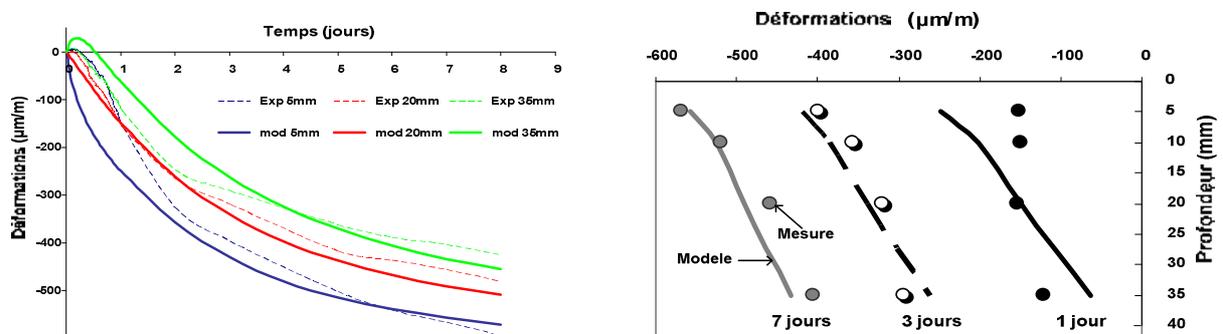


Figure III.25 - Evolution des profils des déformations simulées dans la couche de mortier MA : comparaison avec les résultats expérimentaux

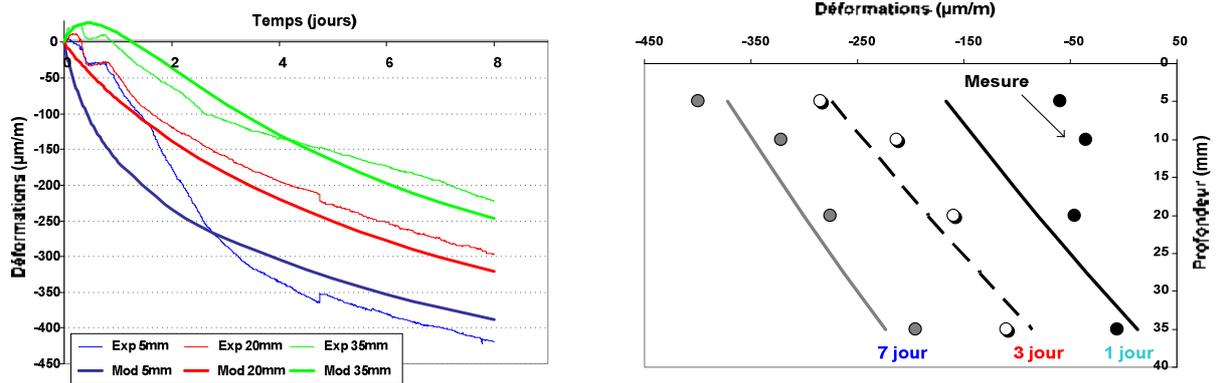


Figure III.26 - Evolution des profils des déformations simulées dans la couche de mortier MB : comparaison avec les résultats expérimentaux

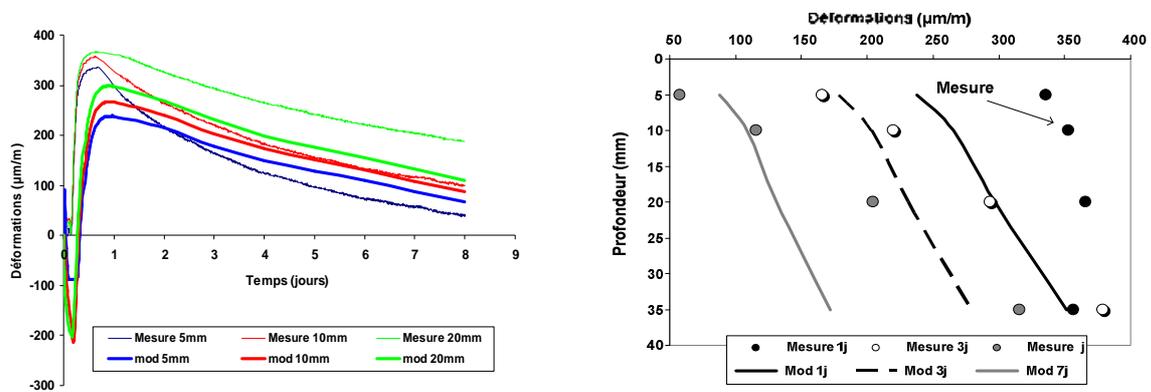


Figure III.27 - Evolution des profils des déformations simulées dans la couche de mortier WA: comparaison avec les résultats expérimentaux

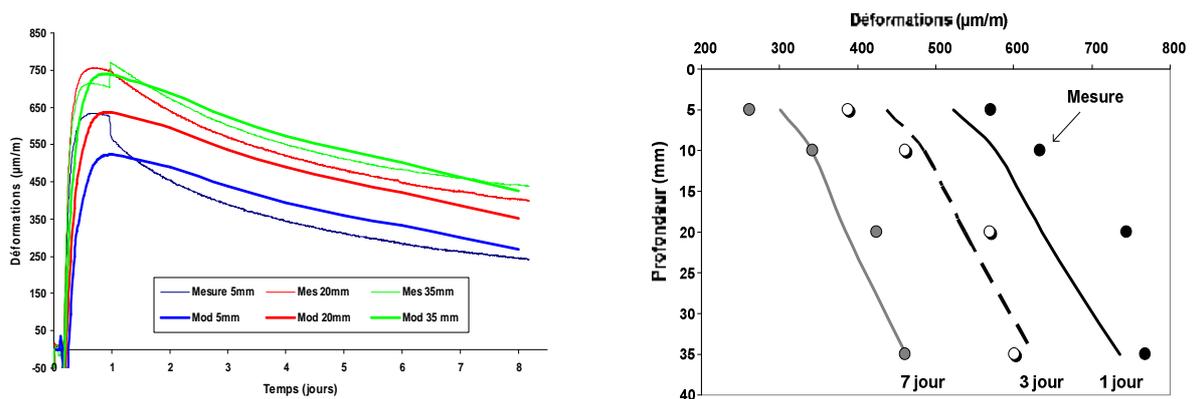


Figure III.28 - Evolution des profils des déformations simulées dans la couche de mortier WB: comparaison avec les résultats expérimentaux

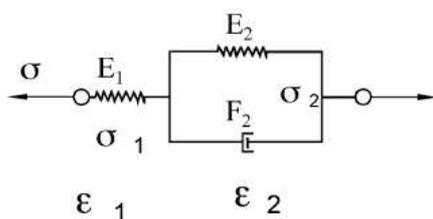
### III.4 Modélisation des variations dimensionnelles en présence d'un support adhérent

Dans cette section, nous nous intéressons à l'endommagement des structures de couches minces de mortier appliquées sur support adhérent. Nous présentons une approche qui met en avant l'influence des effets combinés du séchage et de la gêne du support sur l'endommagement du matériau. Le mortier est appliqué sur un support non poreux et peu déformable. L'adhérence au niveau de l'interface est assurée par une grille métallique qui est soudée sur le support (voir § II.4.1). Le séchage se fait uniquement par la face supérieure.

Dans le cas des travaux de rechargements minces, le fluage peut s'avérer bénéfique en soulageant les contraintes induites par les variations dimensionnelles empêchées [Weiss 1999] [Benbou 2002], améliorant ainsi la capacité de déformation du matériau de réparation en lui permettant de mieux s'adapter aux conditions d'exposition. En général, la fissuration de ce type de structure se caractérise par une localisation des contraintes dans la couche de rechargement du fait du retrait différentiel entre le matériau et le support [Beushausen 2007] [Turatsinze 2000].

#### III.4.1 Prise en compte du comportement différé du matériau

Dans notre étude, la prise en compte du comportement différé s'est faite en superposant aux déformations de retrait une déformation de fluage  $\epsilon_f$ . Le modèle de viscoélasticité proposé par Yuan et al. [Yuan 2003] pour l'estimation de la déformation de fluage en traction des mortiers a été utilisé. Ce modèle est proche du modèle de Kelvin-Voigt proposé par De Schutter [De Schutter 1999] pour représenter la déformation de fluage propre du béton au jeune âge. Le modèle rhéologique est présenté sur la figure III.29.



**Figure III.29** - Modèle physique de fluage en traction proposé par Yuan et al. [Yuan 2003]

Le système d'équations suivant permet de gérer le modèle viscoélastique :

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \\ \sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 + F_2 \dot{\varepsilon}_2 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Avec :

- $E$  le module d'Young du matériau,
- $F$  le coefficient de viscosité du matériau.

Yuan et al. [Yuan 2003] proposent les expressions des fonctions de fluage et de relaxation de contraintes suivantes:

$$\varepsilon(t, \tau) = \frac{\sigma_0}{q_0} \left( 1 - \left( 1 - \frac{p_1 q_0}{q_1} \right) e^{-\frac{q_0}{q_1}(t-\tau)} \right) \quad (\text{III.23})$$

$$\sigma(t, \tau) = q_0 \varepsilon_0 \left( 1 - e^{-\frac{-(t-\tau)}{p_1}} \right) + \frac{q_1}{p_1} \varepsilon_0 e^{-\frac{-(t-\tau)}{p_1}} \quad (\text{III.24})$$

Expressions dans lesquelles :

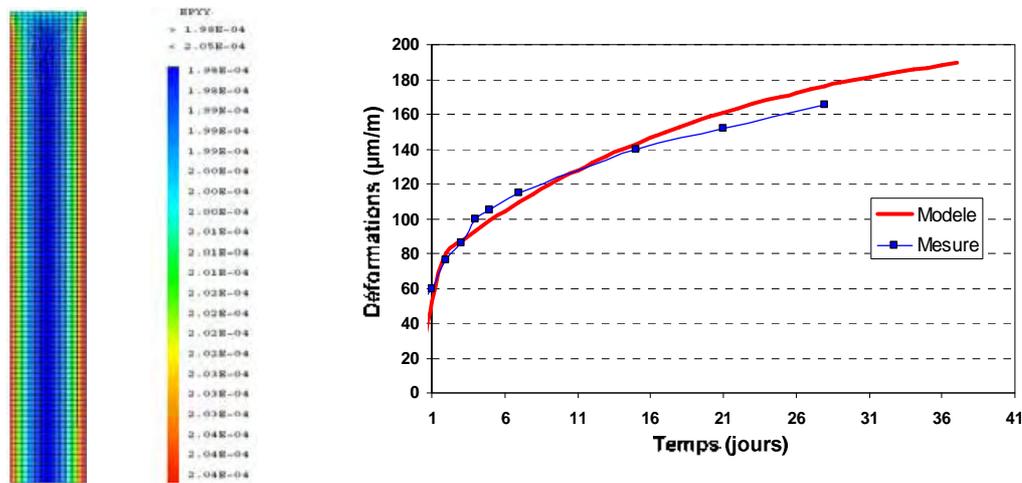
- $\varepsilon(t, \tau)$  la déformation de fluage à l'instant  $t$ , causée par la contrainte initiale  $\sigma_0$  à l'instant  $\tau$ ,
- $\sigma(t, \tau)$  la contrainte de relaxation à l'instant  $t$ , causée par la déformation initiale  $\varepsilon_0$  à l'instant  $\tau$ ,
- $\tau$  est l'âge du chargement
- $q_0, q_1, p_1$  sont les paramètres du matériau qui sont déterminés à partir des résultats expérimentaux dans l'essai de fluage de traction.

Les paramètres  $q_0, q_1, p_1$  peuvent être exprimés par les relations suivantes :

$$p_1 = \frac{F_2}{E_1 + E_2}, \quad q_1 = \frac{E_1 F_2}{E_1 + E_2}, \quad q_0 = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$$

Ne disposant pas de données expérimentales pour le calage des paramètres de fluage  $q_0, q_1, p_1$ , nous avons simulé l'essai de fluage de traction réalisé par Yuan et al. [Yuan 2003] pour l'étude du comportement différé d'un mortier contenant du polymère SBR qui est assez proche de nos mélanges. Les dimensions des éprouvettes testées sont de 60×60×508 mm. Les résultats des simulations ainsi que les mesures obtenues expérimentalement sont présentés sur

la figure III.30. Les valeurs des paramètres de fluage identifiés à partir des résultats expérimentaux sont regroupées sur le tableau III.7.



**Figure III.30** - Simulation du fluage de traction total sur mortier ; les mesures tirées des travaux de Yuan et al. [Yuan 2003]

**Tableau III.4** - Paramètres de fluage identifiés à partir des résultats expérimentaux

$q_0$	$q_1$	$P_1$
4700	96000	6,3

### III.4.2 Prise en compte de l'endommagement sur le comportement des couches minces de mortier

Dans le souci de mieux décrire le mode de dégradation des structures de couches minces de mortier, nous avons choisi le modèle d'endommagement proposé par Mazars [Mazars 1984] [Hubert 2004]. C'est un modèle isotrope écrit dans un formalisme thermodynamique simple dans lequel la loi d'évolution de la variable d'endommagement  $d$  (scalaire) dépend de l'énergie élastique [Lemaitre 1985]. Dans ce modèle, un endommagement isotrope est appliqué à tous les coefficients du tenseur d'élasticité  $E$  tel que :

$$E = (1 - d) E_0 \quad (\text{III.25})$$

Soit encore :

$$d = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (\text{III.26})$$

Où  $E_0$  et  $E$  sont respectivement le tenseur de rigidité du matériau sain et du matériau dégradé. La variable d'endommagement  $d=0$  pour un matériau vierge et  $d=1$  pour un matériau rompu.

### III.4.2.1 Formulation générale du modèle d'endommagement

Nous nous plaçons dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles, plus précisément celui de l'élasto-plasticité endommageable isotrope. Nous supposons que le coefficient de poisson reste constant. La variable d'endommagement est supposée isotrope.

Les lois d'état sont supposées dériver du potentiel thermodynamique  $\psi$  suivant la relation :

$$\psi = \psi(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_e, \boldsymbol{\varepsilon}_p, d, k) \quad (\text{III.27})$$

avec :

- $\boldsymbol{\varepsilon}$  le tenseur des déformations,
- $\boldsymbol{\varepsilon}_e$  le tenseur des déformations élastiques,
- $\boldsymbol{\varepsilon}_p$  le tenseur des déformations plastiques,
- $d$  l'endommagement mécanique,
- $k$  le tenseur des variables d'écrouissage.

En partitionnant les déformations, on a :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_e + \boldsymbol{\varepsilon}_p \quad (\text{III.28})$$

Le potentiel d'énergie libre décrit la réversibilité des processus (restitution de l'énergie emmagasinée au moment de la décharge de la structure) et s'écrit en conditions isothermes:

$$\psi = \psi^e(\boldsymbol{\varepsilon}^e, d) + \psi^p(\boldsymbol{\varepsilon}^p, k) \quad (\text{III.29})$$

avec :

- $\psi^e$  le potentiel élastique,
- $\psi^p$  le potentiel plastique.

$$\rho \psi^e = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^e : \boldsymbol{E} : \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (\text{III.30})$$

La variable d'endommagement  $d$  est une variable interne, non directement observable. L'inégalité de Clausius-Duhem exprime le fait que l'énergie mécanique est positive :

$$\left( \sigma - \rho \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon^e} \right) : \dot{\varepsilon}^e + \sigma : \dot{\varepsilon}^p - \rho \frac{\partial \psi}{\partial d} \cdot \dot{d} - \rho \frac{\partial \psi}{\partial k} \cdot \dot{k} \geq 0 \quad (\text{III.31})$$

Le tenseur de rigidité  $E$  est défini par l'équation (III.25), avec  $E_0$  le tenseur de rigidité initial et  $d$  la variable d'endommagement.

Les lois d'état se déduisent à partir de l'équation (III.27) :

$$\sigma = \rho \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon^e} = E : \varepsilon^e = (1-d)E_0 : \varepsilon^e \quad (\text{III.32})$$

Les forces thermodynamiques associées aux variables d'endommagement et d'écroutissement sont respectivement le taux de restitution d'énergie  $Y$  et la force d'écroutissement  $A$ .

Le taux d'énergie dissipée dû à l'endommagement mécanique  $Y$  est donné par l'expression suivante :

$$\begin{cases} Y = \rho \frac{\partial \psi}{\partial d} = -\frac{1}{2}(1-d) \varepsilon^e : E_0 : \varepsilon^e \\ Y \leq 0 \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

$A$  est le tenseur d'écroutissement.

$$A = \rho \frac{\partial \psi}{\partial k} \quad (\text{III.34})$$

### III.4.2.2 Evolution de l'endommagement

Dans le modèle d'endommagement de Mazars [Mazars 1984], le béton est considéré comme un matériau non standard, c'est-à-dire que la variable d'endommagement ne dérive pas du potentiel. Pour un état d'endommagement  $d$  (ou  $d_m$  endommagement mécanique) donné, le seuil d'évolution est donné par une fonction  $f_d$  de la déformation équivalente  $\varepsilon_{eq}$  telle que :

$$f_d = \varepsilon_{eq} - K^m(d_m) \leq 0 \quad (\text{III.35})$$

Avec  $K^m(d_m)$  la variable d'histoire liée à l'endommagement et  $K^m(d_m = 0) = k_0$  est le seuil initial d'endommagement.

Pour décrire l'endommagement, cette déformation  $\varepsilon_{eq}$  est calculée à partir du tenseur des déformations élastiques  $\varepsilon^e$  suivant:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\langle \varepsilon_i^e \rangle_+)^2} \quad (\text{III.36})$$

avec  $\langle \varepsilon_i^e \rangle_+$  la déformation principale dans la direction  $i$ .

L'évolution de la variable d'endommagement est contrôlée par la déformation équivalente.

L'endommagement  $d_m$  peut donc être exprimée suivant une composante en traction  $d_t$  et une composante en compression  $d_c$  selon :

$$d_m = \alpha_t d_t + (1 - \alpha_t) d_c \quad (\text{III.37})$$

avec  $\alpha_t$  un paramètre qui dépend de l'état de contrainte.

Les endommagements en traction et en compression s'écrivent alors:

$$d_t = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1 - A_t)}{\varepsilon_M} - \frac{A_t}{\exp[B_t(\varepsilon_M - \varepsilon_{d0})]} \quad (\text{III.38})$$

$$d_c = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1 - A_c)}{\varepsilon_M} - \frac{A_c}{\exp[B_c(\varepsilon_M - \varepsilon_{d0})]} \quad (\text{III.39})$$

Avec  $\varepsilon_{d0}$  la déformation limite du matériau et  $\varepsilon_M$  la déformation maximale équivalente.  $A_c$ ,  $B_c$  sont les paramètres qui gouvernent l'endommagement en compression alors que  $A_t$ ,  $B_t$  sont les paramètres qui gouvernent l'endommagement en traction.

#### III.4.2.3 Identification des paramètres d'endommagement pour le mortier

L'identification des paramètres du modèle d'endommagement de Mazars  $A_c$ ,  $B_c$ ,  $A_t$ ,  $B_t$ ,  $\varepsilon_{d0}$ ,  $\beta$  s'effectue au moyen de la simulation d'un essai de flexion trois points à 7 jours sur une éprouvette prismatique de dimensions 40×40×160 mm entaillée. Le principe de mesure est présenté sur la figure III.31.

Les paramètres d'endommagement identifiés pour les 4 mortiers sont présentés sur le tableau III.5.

Les courbes de simulations Force - CMOD sur éprouvette 40×40×160 mm entaillée pour les mortiers MA, MB et WA sont représentées sur les figures III.32 et III.33.



Figure III.31- Principe de mesure de la force en fonction de l'ouverture de fissure

Tableau III.5 - Identification des paramètres pour l'endommagement

	$A_t$	$B_t$	$A_c$	$B_c$	$\beta$	$\epsilon_{d0}$	$\nu$	$E$ (MPa)
MA	0,7	2400	0,95	1000	1,06	$1,5 \times 10^{-4}$	0,13	15500
MB	0,65	1800	1,2	800	1,06	$1,9 \times 10^{-4}$	0,13	15000
WA	0,45	3800	1,5	800	1,06	$0,85 \times 10^{-4}$	0,2	13500
WB	0,45	3800	1,5	800	1,06	$0,85 \times 10^{-4}$	0,2	13000

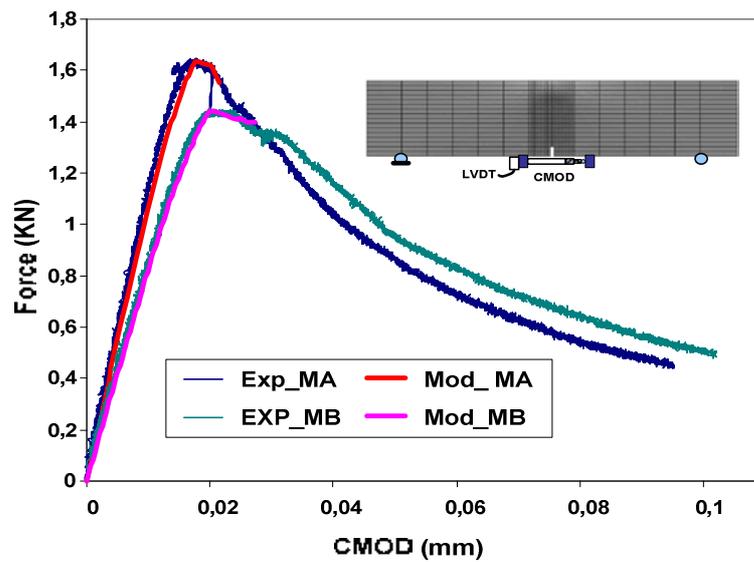
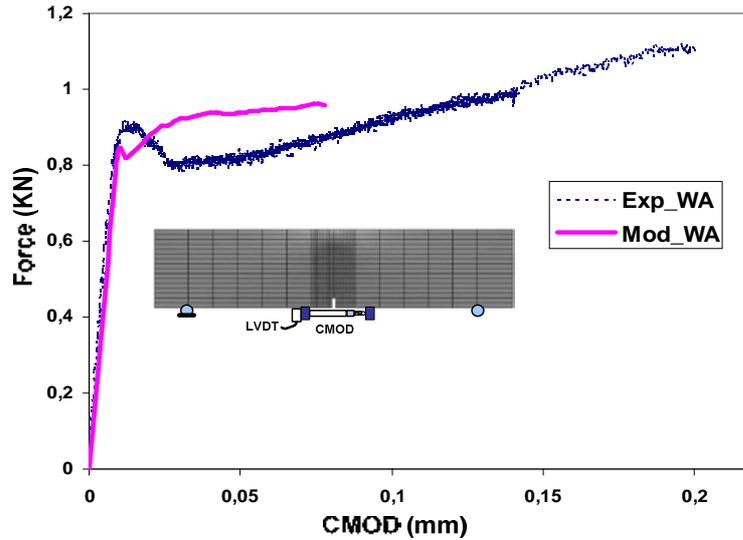


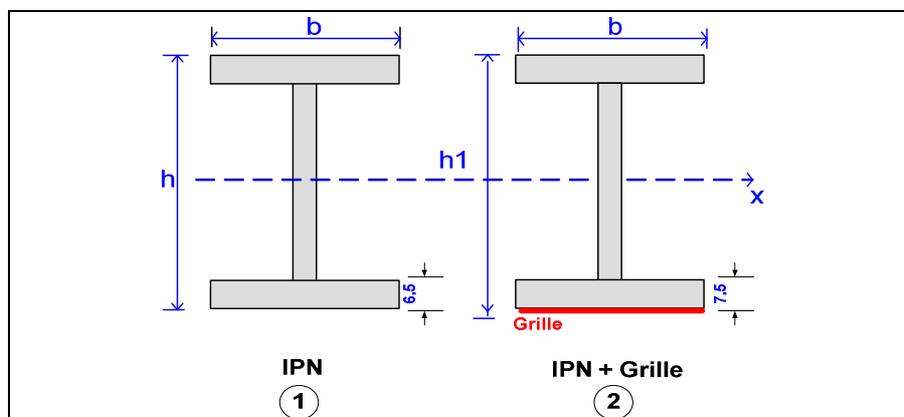
Figure III.32 - Courbes Force -CMOD sur éprouvette 40×40×160 mm entaillée : mortier MA et MB



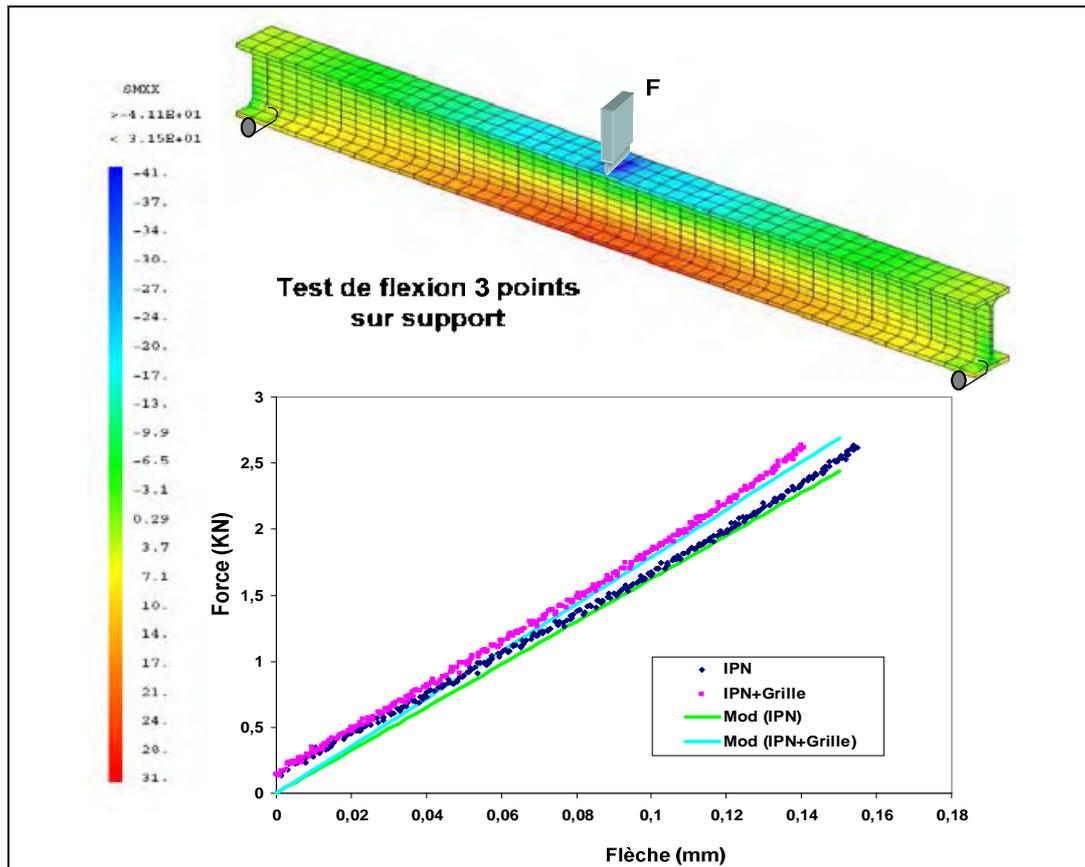
**Figure III.33** - Courbes Force -CMOD sur éprouvette 40×40×160 mm entaillée : mortier WA

#### III.4.2.4 Influence de la prise en compte de la grille dans la modélisation du support

La prise en compte du support dans la modélisation des variations dimensionnelles de la structure support-mortier s'est faite en considérant l'ensemble support grille comme un seul élément (voir figure III.34). Dans ce cas, la hauteur devient  $h_1$  au lieu de  $h$ . La détermination de la hauteur  $h_1$  s'est faite par simulation du test de flexion trois points sur support IPN seul (cas 1) et sur l'ensemble support-grille (cas 2). Les caractéristiques géométriques de la section équivalente sont présentées sur la figure III.34. Les courbes simulées sont ensuite comparées aux mesures expérimentales (voir figure III.35).



**Figure III.34** - Schématisation de la section équivalente



**Figure III.35** - Simulation du test de flexion sur support:  
Cas 1 : IPN                      Cas 2 : IPN + Grille

Si on observe les courbes force-flèche présentées sur la figure III.35, on constate que le fait de lier la grille au support IPN améliore légèrement sa résistance en flexion.

#### III.4.2.5 Modélisation des variations dimensionnelles en présence d'un support adhérent : cas de la maquette (mortier- support)

Dans cette section, nous intégrons l'influence du support sur le développement des variations dimensionnelles dans la couche de mortier. L'adhérence au niveau de l'interface mortier-support est considérée comme parfaite (voir § II). Le comportement du support est supposé élastique, seul le mortier a un comportement endommageable. Le maillage de la structure ainsi que les conditions aux limites mécaniques considérées sont présentés sur la figure III.36. Le poids propre n'est pas pris en compte dans la simulation, pourtant nous sommes conscient du fait qu'il a une influence sur la distribution des contraintes ainsi que la déformée de la structure.

Les paramètres d'entrée pour la simulation des variations dimensionnelles pour les mortiers MA, MB et WA sont présentés dans les tableaux III.6 et III.7. En dehors des paramètres

visqueux qui ont été obtenus en simulant l'essai de fluage en traction effectué par Yuan dans ses travaux [Yuan 2003], tous les autres paramètres ont été identifiés sur des prismes de 40×40×160 mm pour lesquels les échanges hydriques avec le milieu environnant ont lieu sur une seule face. Il est à noter que pour le mortier MB, le comportement visqueux est pris en compte par le biais du modèle de fluage de Lemaître implanté dans le code Cast3M. Les résultats obtenus numériquement sont ensuite comparés aux mesures expérimentales.

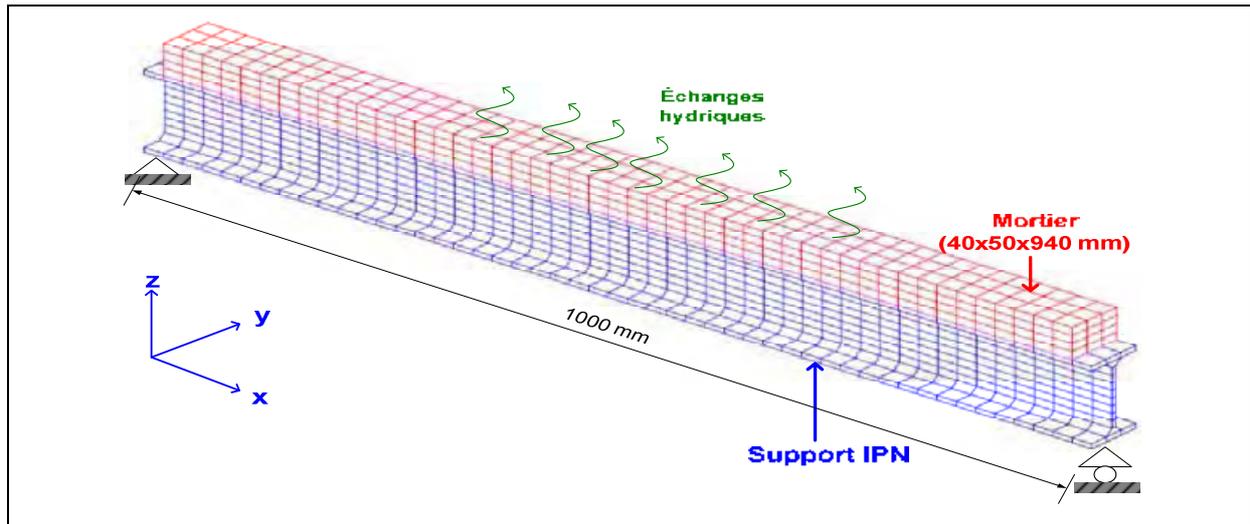


Figure III.36 - Schéma du maillage de la maquette mortier-support

Tableau III.6 - Paramètres mécaniques et rhéologiques pour la simulation des variations dimensionnelles en présence d'un support adhérent

Paramètres	Paramètres d'endommagement						Paramètres élastiques			Paramètres rhéologiques		
	At	Bt	Ac	Bc	$\beta$	$\epsilon_{d0}$	$\nu$	E (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$q_0$	$q_1$	$P_1$
Mortier MA	0,7	2400	0,95	1000	1,06	$1,5 \times 10^{-4}$	0,13	15500	2050	4700	96000	6,3
Mortier MB	0,65	1800	1,2	800	1,06	$1,9 \times 10^{-4}$	0,13	15000	2030	<b>Modèle fluage de Lemaître</b>		
Mortier WA	0,45	3800	1,5	800	1,06	$0,8 \times 10^{-4}$	0,2	13500	1800	4700	96000	6,3
Support	-	-	-	-	-	-	0,3	210000	7800	-	-	-

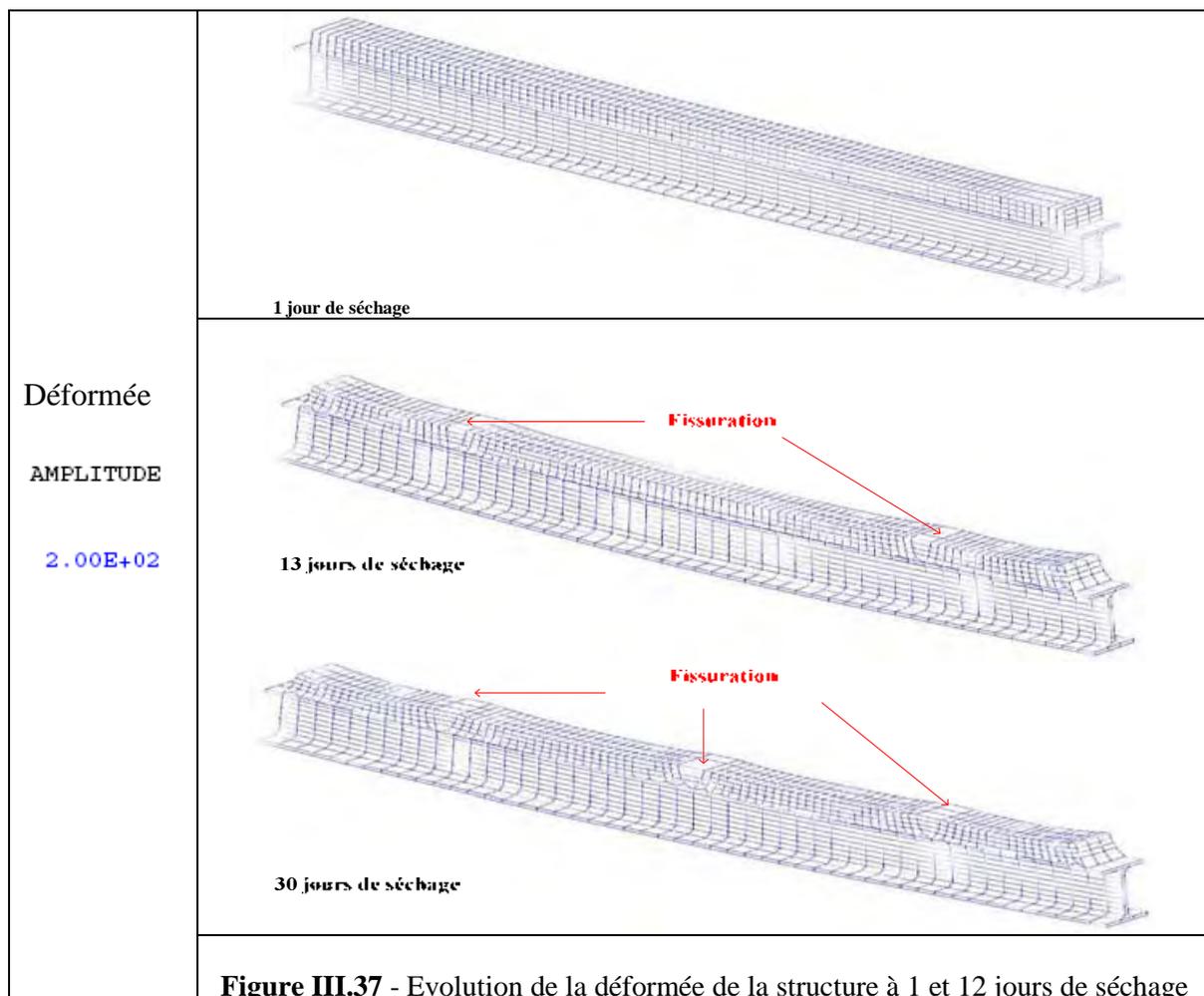
Tableau III.7 - Paramètres de séchage pour la simulation des variations dimensionnelles

	Paramètres de diffusion			Coefficient de contraction hydrique	
	$C_0$ (l/m <sup>3</sup> )	$C_{eq}$ (l/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> /s)	$p$ (m <sup>3</sup> /kg)	P (m <sup>3</sup> /kg)
MA	171	94	$10 \cdot E^{-13}$	$3,2E^{-6}$	$10,7E^{-6}$
MB	159	87	$7 \cdot E^{-13}$		$9,7E^{-6}$
WA	220	116	$10 \cdot E^{-13}$		

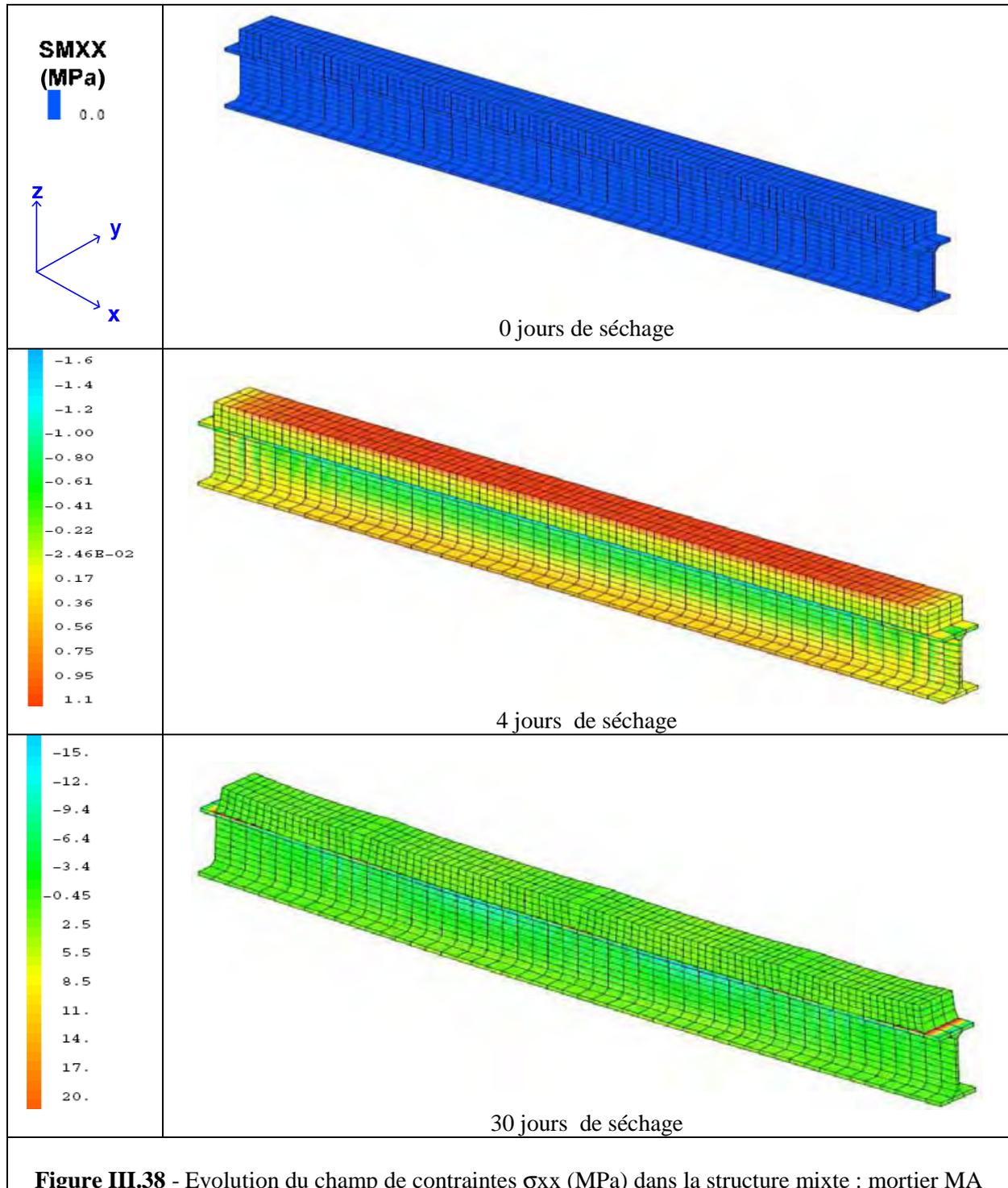
### - Cas du mortier MA

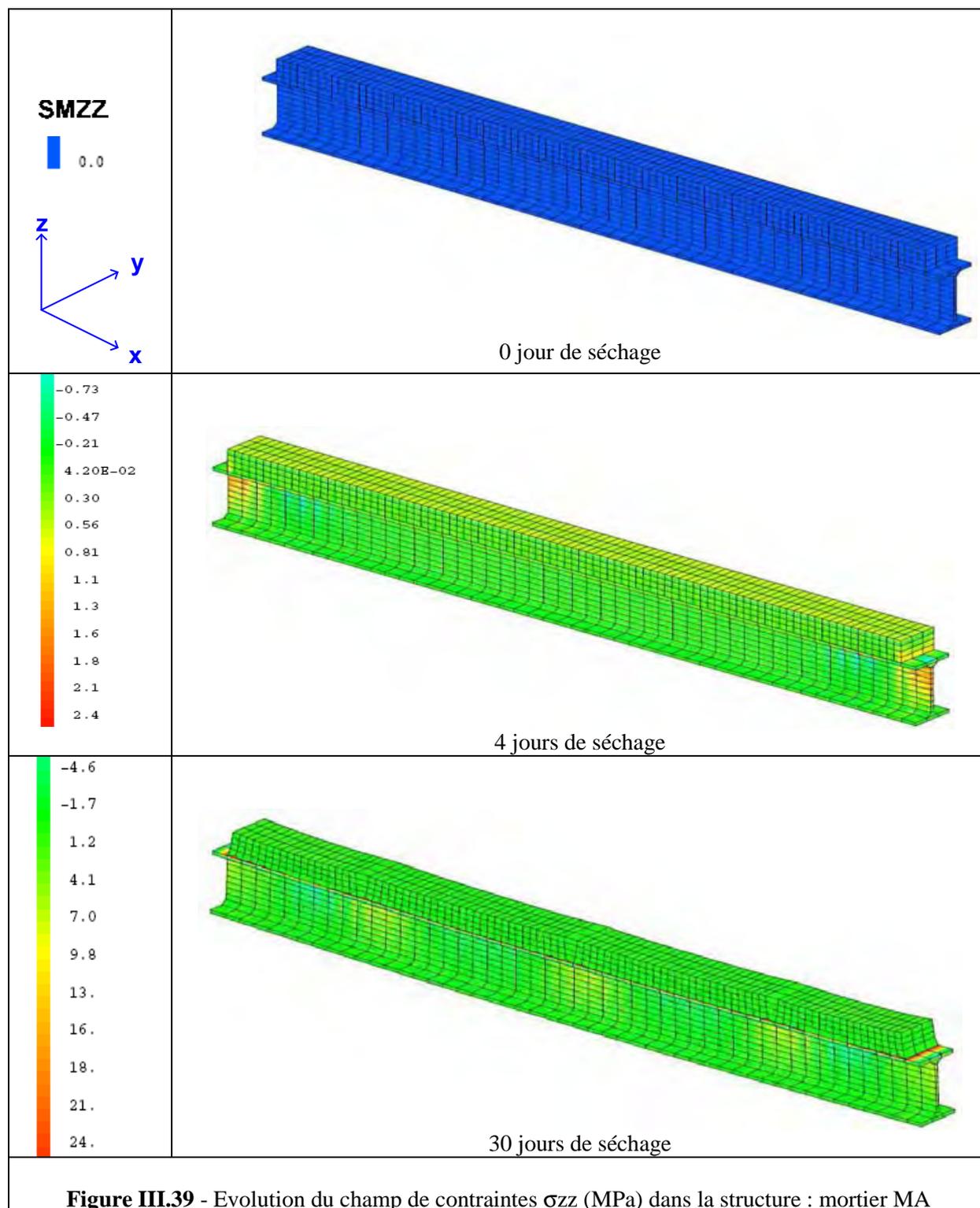
Les évolutions respectives des champs des contraintes  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{zz}$  pour le cas du mortier MA sont présentées sur les figures III.38 et III.39. En observant le champ des contraintes  $\sigma_{xx}$  il apparaît évident que, dès les premiers jours de séchage, il se développe des gradients importants entre la surface et le cœur du matériau. La couche de mortier est essentiellement sollicitée en traction du fait des déformations différentielles qui se développent entre le matériau et le support IPN. Au bout de 12 jours de séchage, on observe une localisation des contraintes dans certaines zones du matériau notamment au niveau de l'interface.

Sur la figure III.37 nous pouvons voir la déformée de la structure à 1, 13 et 30 jours de séchage ainsi que la fissuration de la couche de mortier. Si on observe l'évolution de la déformée de la structure entre 13 et 30 jours, on remarque que la structure se relâche une fois le matériau fissuré. Ceci explique sans doute la redistribution des contraintes emmagasinées sous l'effet du retrait empêché.



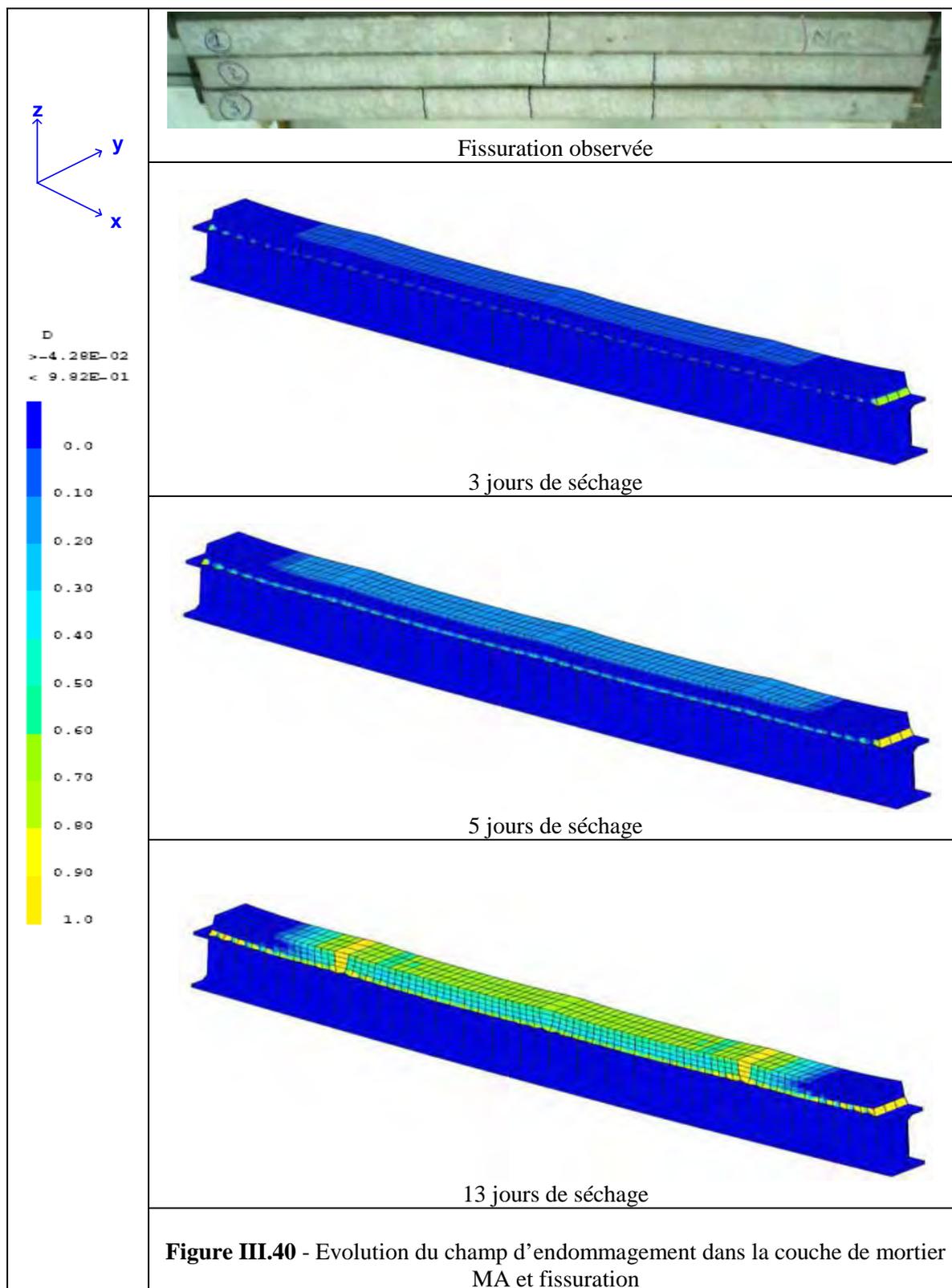
Par la suite, nous nous sommes intéressé à l'évolution de l'endommagement dans la couche de mortier MA. Les paramètres d'endommagement utilisés sont ceux identifiés sur des essais simples (essai de flexion trois points sur prismes 40×40×160 mm) comme nous l'avons présenté dans le tableau III.6.





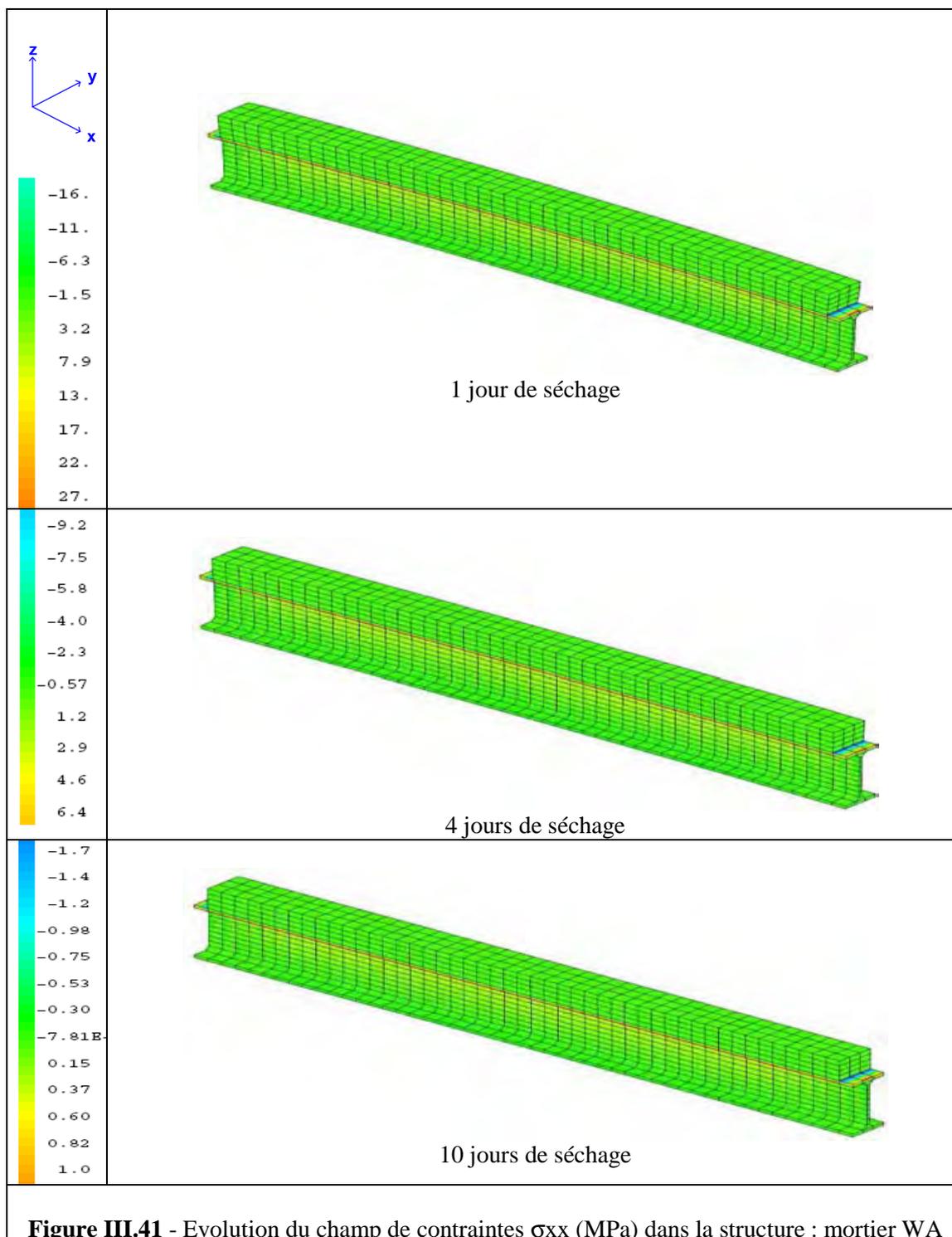
La figure III.40 présente l'évolution du champ d'endommagement dans la couche de mortier entre 1 et 13 jours de séchage. En observant l'évolution de l'endommagement, il apparaît dès les premiers jours suivant le séchage que le front d'endommagement s'amorce en surface où les gradients de contraintes sont plus importants avant de s'étendre dans le reste de la couche de mortier.

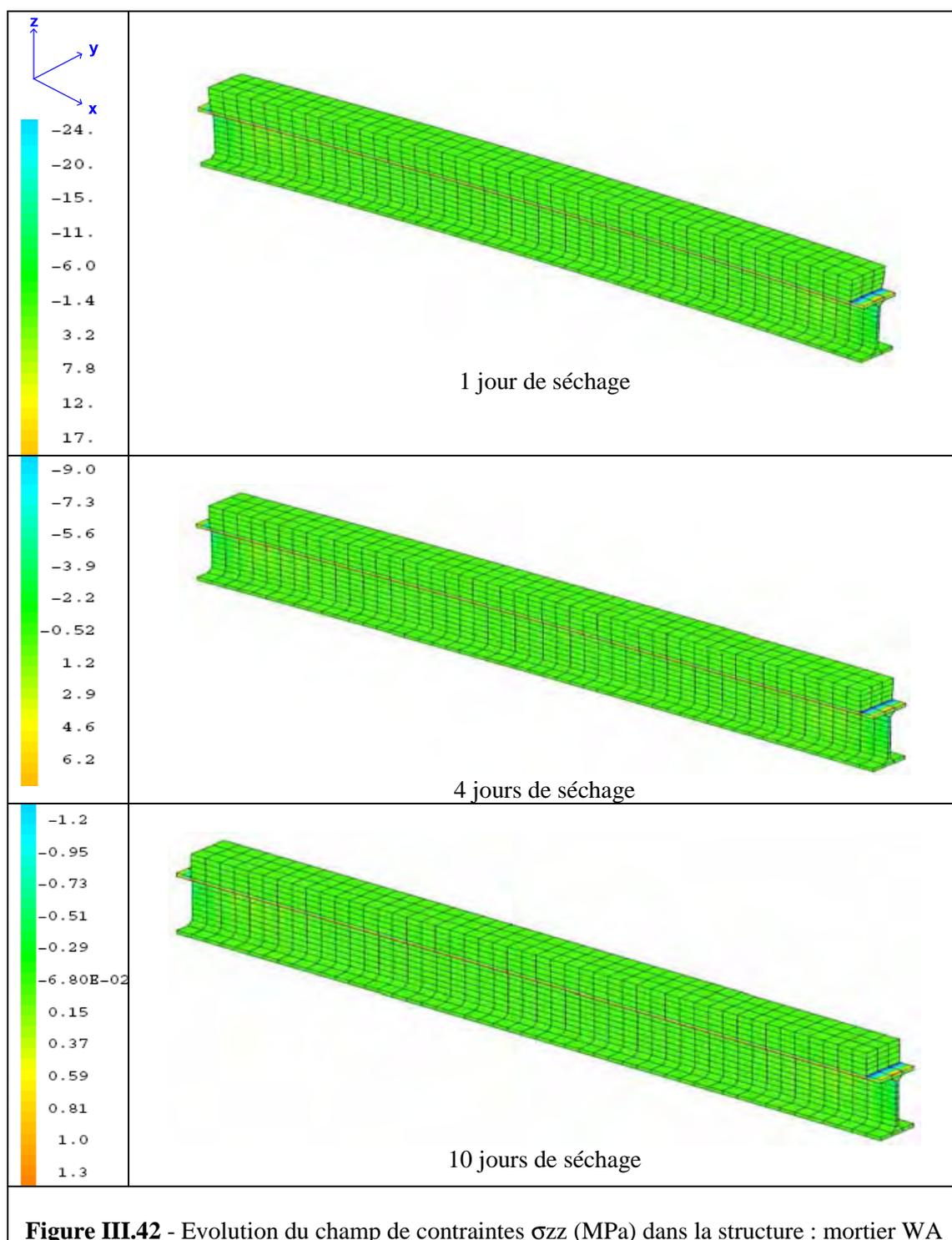
Un autre type d'endommagement prend place très tôt au niveau de l'interface mortier-support aux extrémités où on a un phénomène de tuilage important. Au bout de 12 jours de séchage, on observe une localisation de l'endommagement dans certaines zones de la couche de mortier. Cette localisation est à relier à la fissuration macroscopique du matériau observée expérimentalement. Si on compare le champ d'endommagement simulé avec les résultats expérimentaux, on constate que le modèle reproduit assez bien les échéances de fissurations ainsi que la distribution des fissures de la couche de mortier.



- Cas du mortier WA

Les évolutions respectives des champs des contraintes  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{zz}$  pour le cas du mortier WA sont présentées sur les figures III.41 et III.42.





En observant pur le mortier WA le champ des contraintes  $\sigma_{xx}$  après 1 jour de séchage, il apparaît que le matériau a amorcé sa phase de retrait qui se caractérise par une diminution des contraintes dans la structure. Par contre, durant les premiers jours de séchage, on n'observe pas de gradients de contraintes importants entre la surface et le cœur du matériau.

**- Cas du mortier MB**

Pour simuler les variations dimensionnelles dans la couche de mortier MB, nous avons couplé le modèle d'endommagement de Mazars avec le modèle de fluage de Lemaître. Le modèle de Lemaître implanté dans Cast3M donne l'évolution de la déformation de fluage  $\varepsilon_{fl}$  telle que :

$$\varepsilon_{fl} = A_1 \times (X^{A_2} + Y) \quad (III.40)$$

Dans cette loi, les évolutions temporelles des paramètres X et Y sont données selon:

$$\frac{dX}{dt} = \left( \frac{S}{kx} \right)^{\left( \frac{A_3}{A_2} \right)} \times A_4 \left( \frac{1}{A_2} \right) \quad (III.41)$$

$$\frac{dY}{dt} = \left( \frac{S}{ky} \right)^{A_3} \times A_4 \quad (III.42)$$

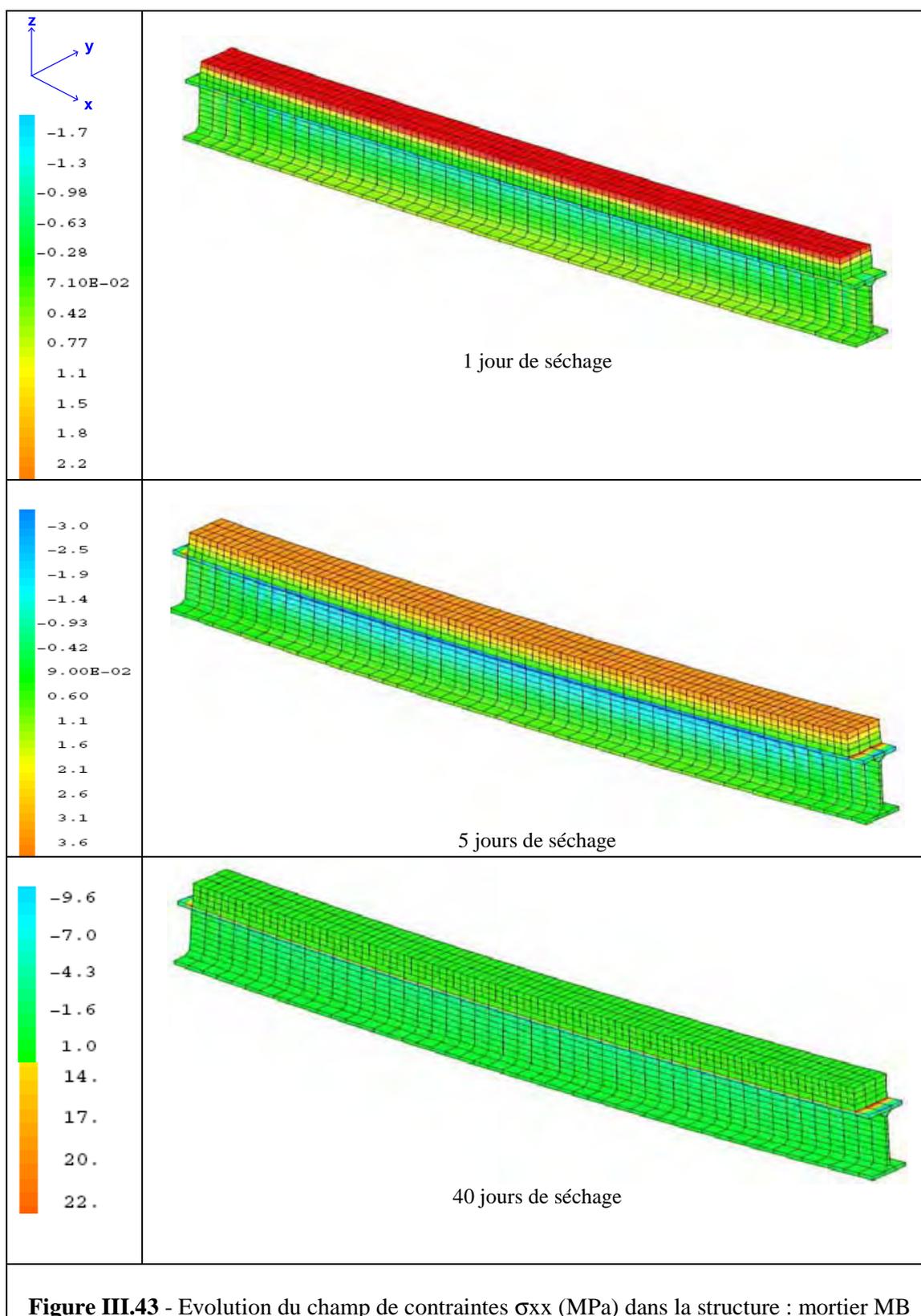
$A_1, A_2, A_3, A_4, kx, ky$  sont les paramètres matériaux ;  $S$  est la contrainte de référence.

Les paramètres du modèle de Lemaître utilisés pour la simulation des variations dimensionnelles du mortier MB sont présentés dans le tableau III.8.

Tableau III.8 - Paramètres visqueux pour la simulation des variations dimensionnelles : mortier MB

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$kx$	$ky$	$S$
$3 \times 10^{-13}$	1	1,2	1,5	100	3	1,5

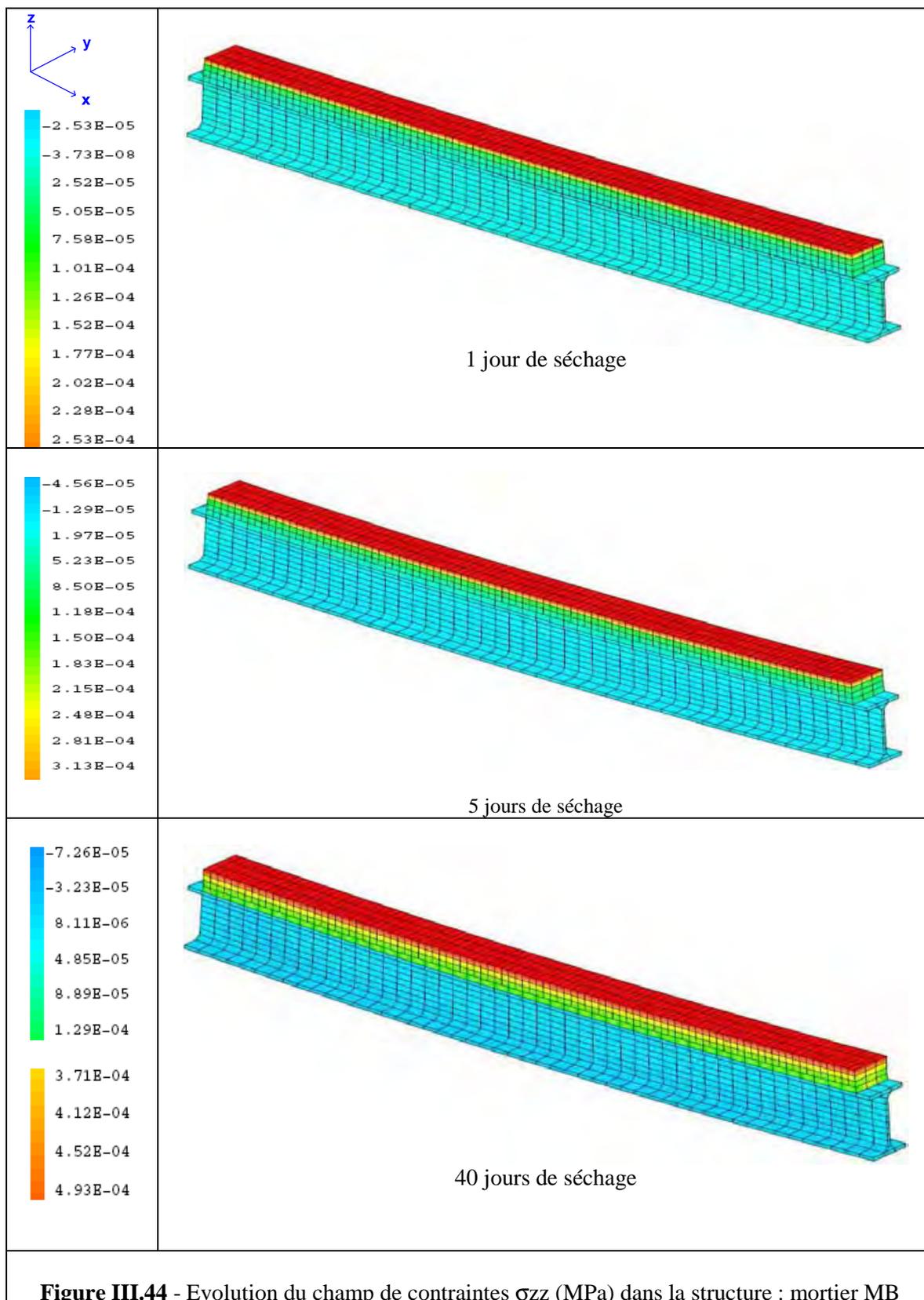
Les évolutions respectives des champs de contraintes  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{zz}$  pour le cas du mortier MB sont présentées sur les figures III.43 et III.44.

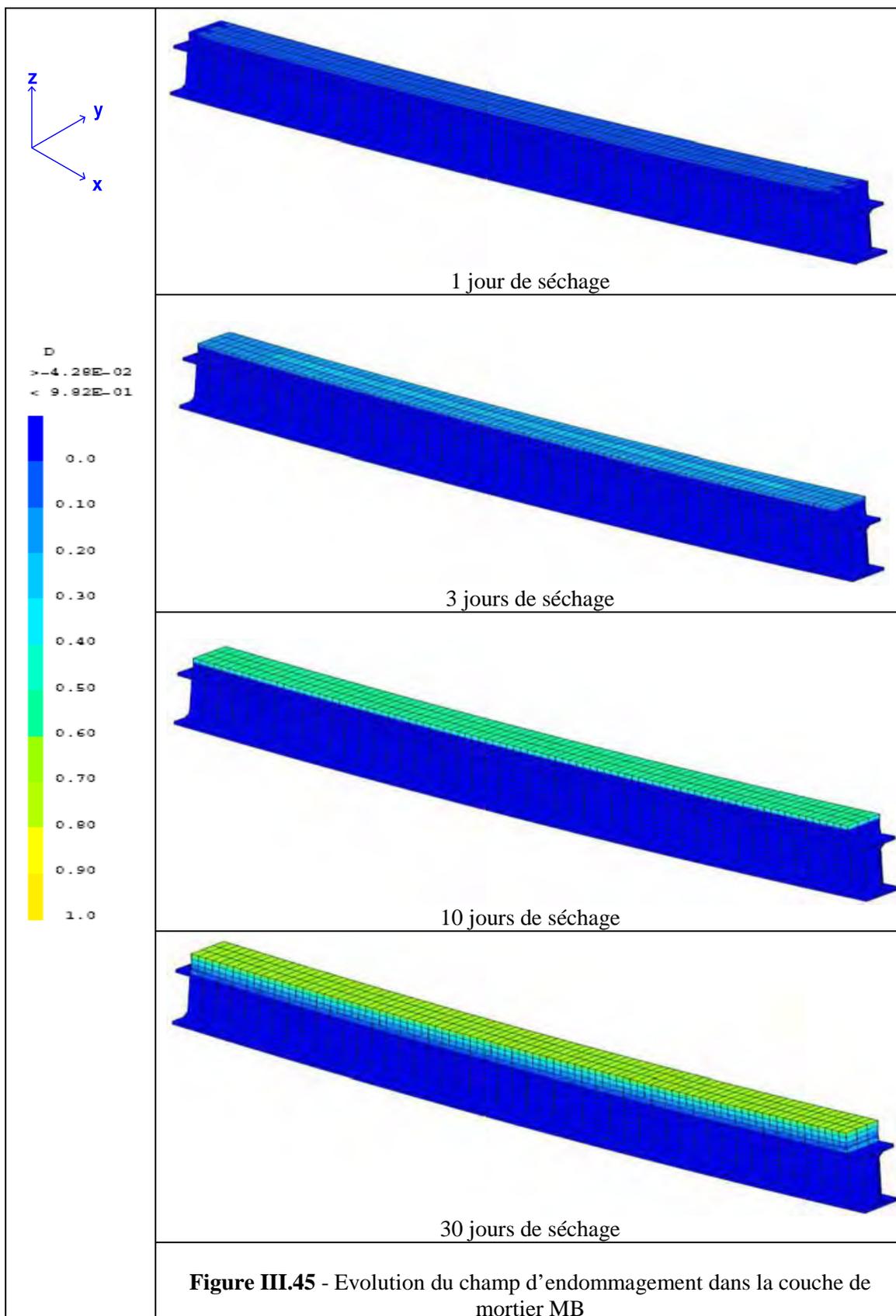


En observant le champ des contraintes, il apparaît dès les premiers jours de séchage des gradients importants entre la surface et le cœur du matériau. Au bout de 5 jours de séchage, le développement des contraintes dans la structure est essentiellement provoqué par le retrait.

Au-delà de 5 jours, on commence à observer une diminution des contraintes. Par exemple quand on s'intéresse aux couches situées au voisinage de la surface de séchage, on observe une diminution des contraintes  $\sigma_{xx}$  entre 5 et 40 jours de séchage, mais aucune localisation des contraintes n'est relevée (sans doute à cause du choix du modèle de fluage). Le modèle permet néanmoins de reproduire le phénomène de relaxation des contraintes dans la couche de mortier.

La figure III.45 présente l'évolution du champ d'endommagement dans la couche de mortier MB après 30 jours de séchage. En observant l'évolution de l'endommagement pendant les premiers jours suivant le séchage, il apparaît que le front d'endommagement s'amorce en surface où l'on a des gradients de contraintes importants avant de s'étendre dans le reste de la couche de mortier. Contrairement au mortier MA, on remarque qu'on a un endommagement diffus dans la couche de mortier.



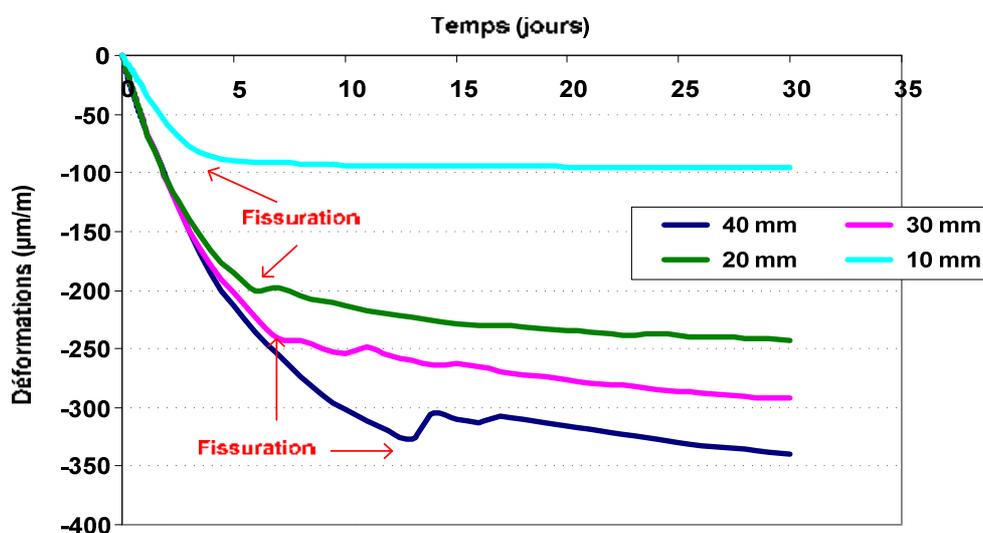


### III.5 Etude paramétrique

Dans cette partie, nous avons analysé l'influence de certains paramètres sur l'endommagement des couches minces de mortier. Les paramètres étudiés sont l'amplitude de séchage, l'épaisseur de la couche de mortier, les conditions de conservation. L'étude a porté uniquement sur le mortier MA.

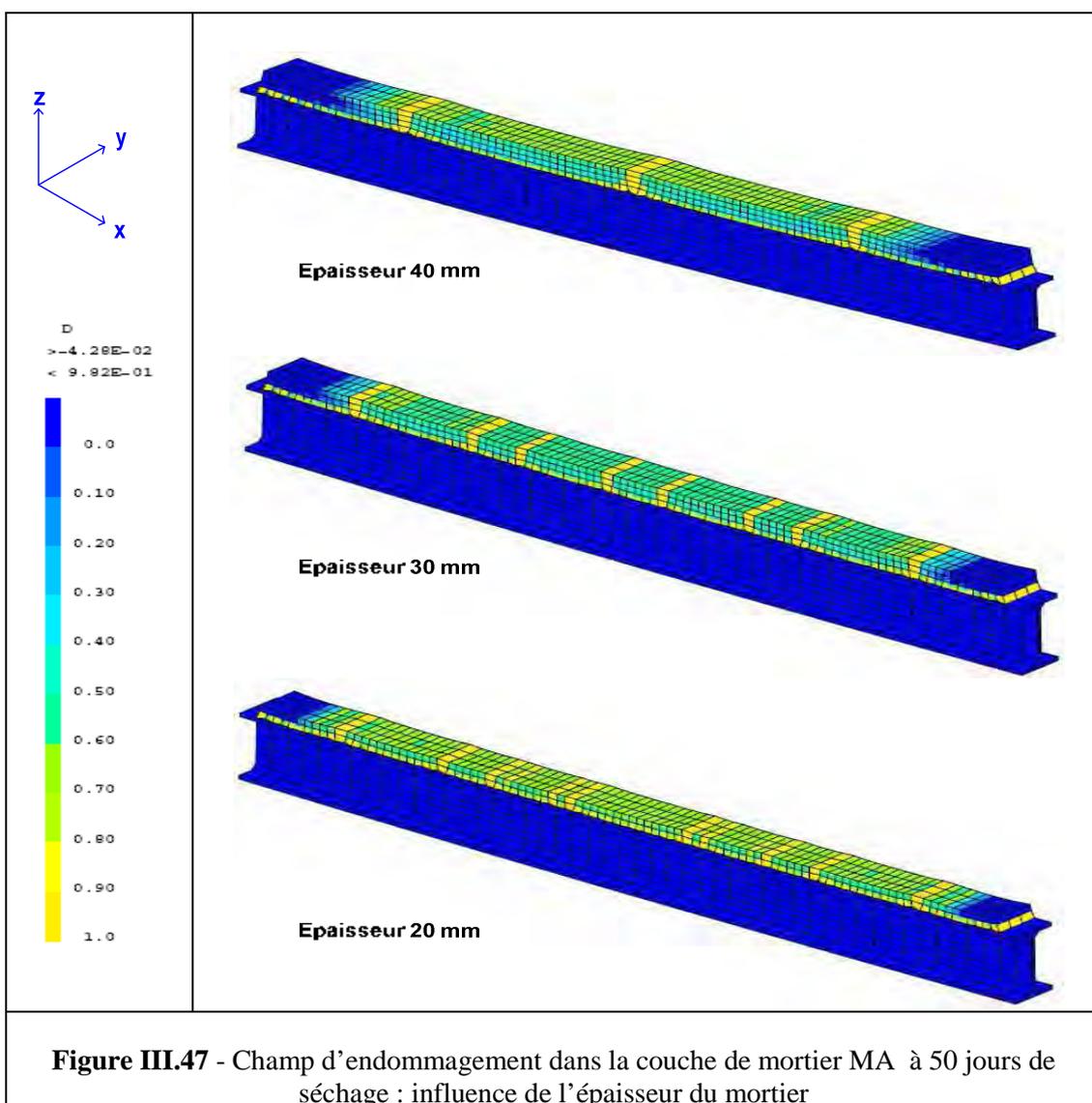
#### III.5.1 Influence de l'épaisseur de la couche de mortier

Dans ce cas, nous faisons varier l'épaisseur de la couche de mortier ; les paramètres de séchage, mécaniques et d'endommagement sont les mêmes que ceux utilisés dans les sections précédentes (voir § III.1 et § III.3). La figure III.46 présente l'évolution des déformations  $\epsilon_{xx}$  dans la couche de mortier pour des épaisseurs respectives de 40, 30, 20 et 10 mm. On remarque que l'échéance de fissuration (localisation de l'endommagement pour un paramètre d'endommagement  $D = 1$ ) diminue avec l'épaisseur du matériau. Ainsi quand on diminue de moitié l'épaisseur de la couche de mortier, l'échéance de fissuration est également écourtée de moitié pour ce type de mortier.



**Figure III.46** - Influence de l'épaisseur de la couche de mortier sur l'évolution des déformations  $\epsilon_{xx}$ : mortier MA

Sur la figure III.47, on peut également observer la distribution de l'endommagement au bout de 50 jours de séchage dans la structure mixte pour plusieurs épaisseurs de la couche de mortier. On peut ainsi remarquer que plus l'épaisseur de la couche de mortier est faible, plus le nombre de fissures est important.



### III.4.2 Influence de la vitesse de séchage sur la fissuration

L'influence de la vitesse de séchage est étudiée en faisant varier les valeurs du paramètre de diffusion  $A$ . Dans notre cas, nous avons simulé l'évolution des déformations dans la structure mortier-support pour des valeurs de  $A$  égales à  $10.E^{-13}$ ,  $5.E^{-13}$  et  $10.E^{-14}$ . L'épaisseur du mortier est de 40 mm. Les courbes d'évolutions des déformations correspondant aux différentes valeurs du paramètre  $A$  sont présentées sur la figure III.48.

On remarque que plus l'amplitude de séchage est grande, plus l'échéance de fissuration est écourtée. Lorsqu'on réduit de moitié l'amplitude du paramètre de diffusion  $A$ , on retarde ainsi l'échéance de fissuration. Toutefois, l'amplitude des déformations dans la couche de mortier augmente. En revanche quand on divise la valeur du paramètre  $A$  par 10, l'amplitude des

déformations change très peu alors que l'échéance de fissuration est considérablement retardée.

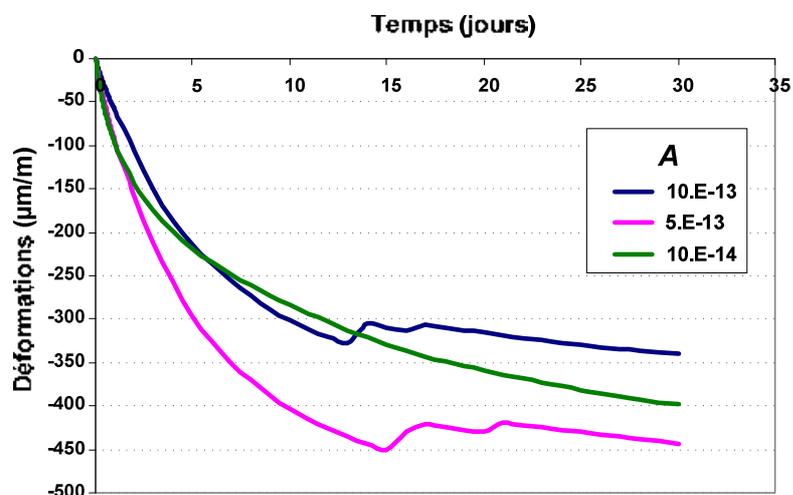


Figure III.48 - Influence de l'amplitude de séchage sur la fissuration : simulation de l'évolution des déformations  $\epsilon_{xx}$

### III.4.3 Influence de la variation d'hygrométrie sur la fissuration

Dans ce cas, nous faisons varier les conditions aux limites hydriques par la prise en compte d'une hygrométrie variable (voir figure III.49). L'épaisseur de la couche de mortier est de 20 mm. Les paramètres mécaniques et d'endommagement sont les mêmes que ceux utilisés dans les sections précédentes (voir § III.1 et § III.3).

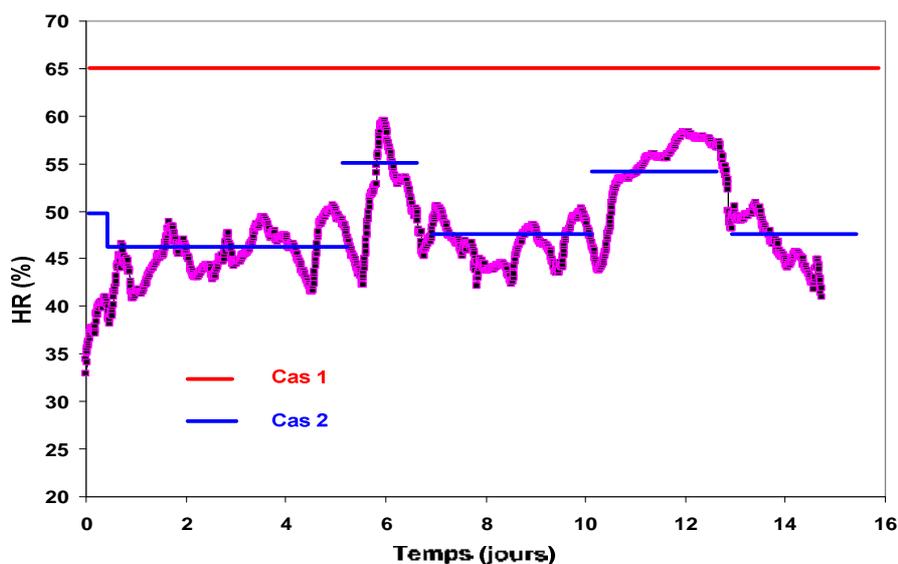
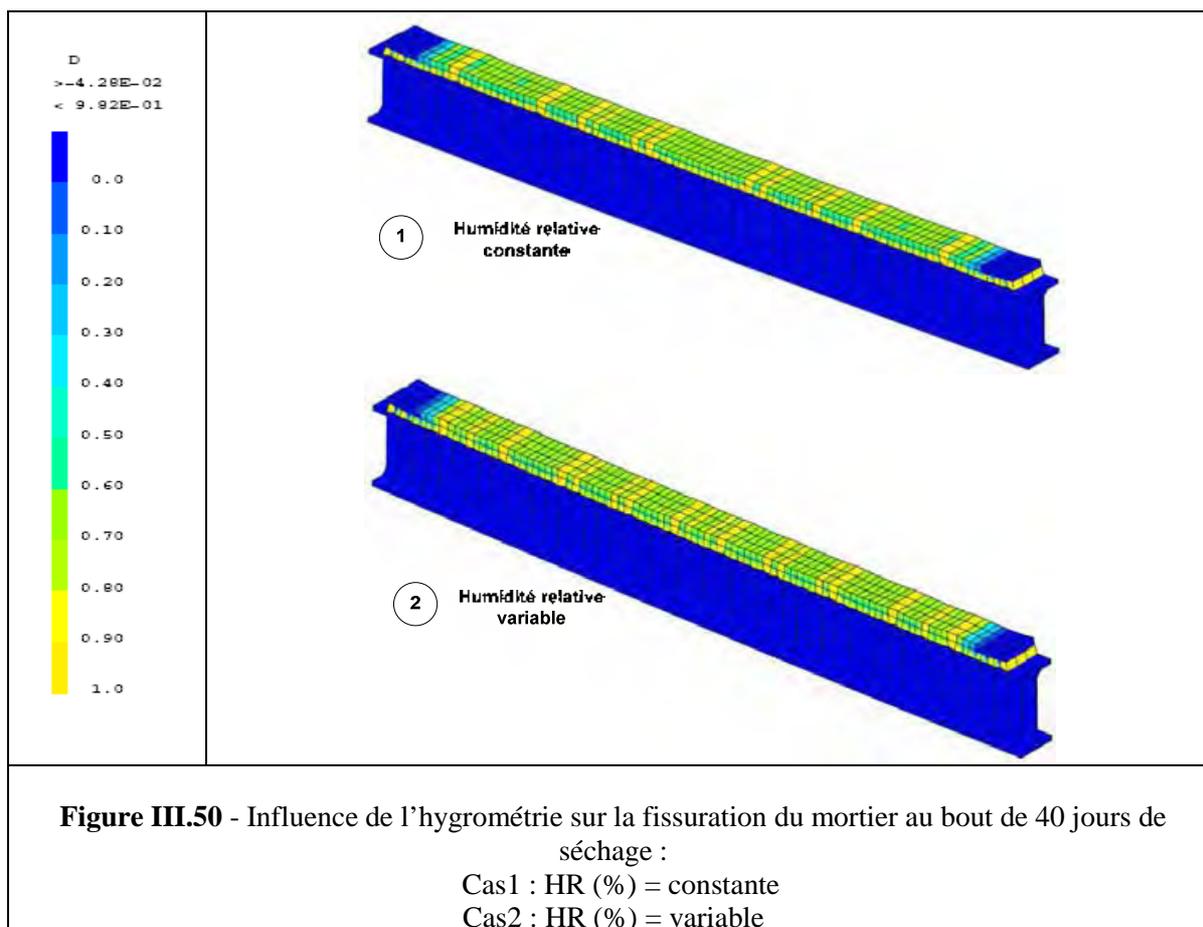


Figure III.49 - Variation d'hygrométrie considérée pour la simulation : mortier MA

La figure III.50 présente la distribution des fissures sur la couche de mortier MA pour les deux cas considérés à savoir une hygrométrie constante pour le premier et une hygrométrie variable pour le second. Pour ce dernier, nous avons considéré les relevés d'humidité relative effectués pour l'étude en atmosphère ventilée (voir figure III.49).

On remarque que dans des conditions d'hygrométrie variable, la susceptibilité à la fissuration du mortier est plus grande comparée au cas avec une hygrométrie et une température constantes. Ces observations sont en adéquation avec les résultats expérimentaux.



### III.6 Conclusion

Dans cette partie consacrée à l'approche numérique du comportement des couches minces de mortier, nous avons abordé plusieurs aspects tels que le comportement hydrique, le comportement mécanique et le comportement vis-à-vis de la fissuration lorsque le mortier est appliqué au contact d'un support. Dans tous les cas, nous nous sommes intéressés à l'évolution des gradients de propriétés induits par le séchage non uniforme de la couche de mortier. Les principales observations sont les suivantes :

- le séchage entraîne des gradients de teneurs en eau significatifs dans la couche de mortier, notamment au voisinage de la surface où se produisent les échanges hydriques entre le matériau et le milieu environnant ; la prise en compte de la loi de diffusion de Fick permet de reproduire de manière satisfaisante la perte de masse ainsi que la distribution des teneurs en eau dans le volume du matériau,
- en l'absence d'un support adhérent, la prise en compte du coefficient de contraction hydrique établi par Granger et al. [Granger 1997] permet de simuler le retrait de séchage dans la couche de mortier,
- pour la modélisation du retrait total des mortiers MA et MB, la prise en compte du retrait endogène peut se faire par le biais d'un paramètre  $\chi$  (paramètre d'autodessiccation) qui permet de simuler le retrait endogène que subit le matériau comme une perte en eau supplémentaire ; en revanche pour les mortiers WA et WB à base ternaire, la déformation endogène peut être assimilée une déformation thermique qui se produit dans le volume du matériau,
- dans cette étude le modèle d'endommagement de Mazars [Mazars 1984] a permis de modéliser l'évolution de l'endommagement et de prédire la fissuration,
- une étude paramétrique (réalisée numériquement) a montré que la susceptibilité à la fissuration dépend de paramètres influents tels que l'épaisseur de la couche de mortier, les variations d'hygrométrie, l'amplitude de séchage, la nature de l'interface utilisée (têflon ou grille),
- la prise en compte du comportement viscoélastique dans la modélisation des variations dimensionnelles des couches de mortier a pour effet de retarder l'échéance de fissuration.



**Partie IV: PROPOSITION D'UN OUTIL  
D'AIDE POUR L'EVALUATION DU RISQUE  
DE FISSURATION**



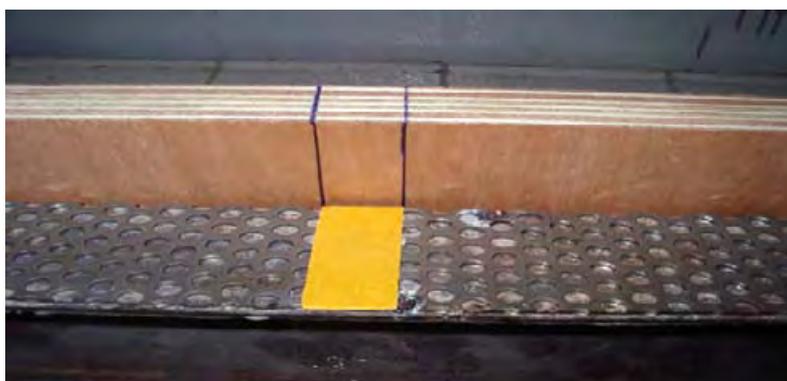
## **Partie IV: PROPOSITION D'UN OUTIL D'AIDE POUR L'EVALUATION DU RISQUE DE FISSURATION**

### **IV.1 Introduction**

Dans cette partie, nous proposons un outil d'aide pour la formulation des mortiers en laboratoire. Le test a pour but d'identifier l'aptitude à la fissuration de la couche de mortier appliquée sur un support, plus précisément d'évaluer le complément de sollicitation qu'il est nécessaire d'apporter au matériau ayant déjà été sollicité par le retrait empêché pour le conduire à la fissuration.

### **IV.2 Préparation des éprouvettes composites**

Le système composite développé pour ce test est le même que celui utilisé dans la partie II pour le suivi de la fissuration sur maquette (1D). Le principe consiste à couler une couche de mortier au contact d'un support en acier sur lequel est soudé une grille pour assurer l'adhérence. Dans ce cas, une zone non adhérente est réalisée au moyen d'un ruban adhésif qui est directement collé sur la grille de façon à ce que la face lisse soit en contact avec le matériau lors de sa mise en place dans le moule. Le but est de localiser la zone de fissuration. Le principe de mise en œuvre de cette "longueur décollée " est présenté sur la figure IV.1.

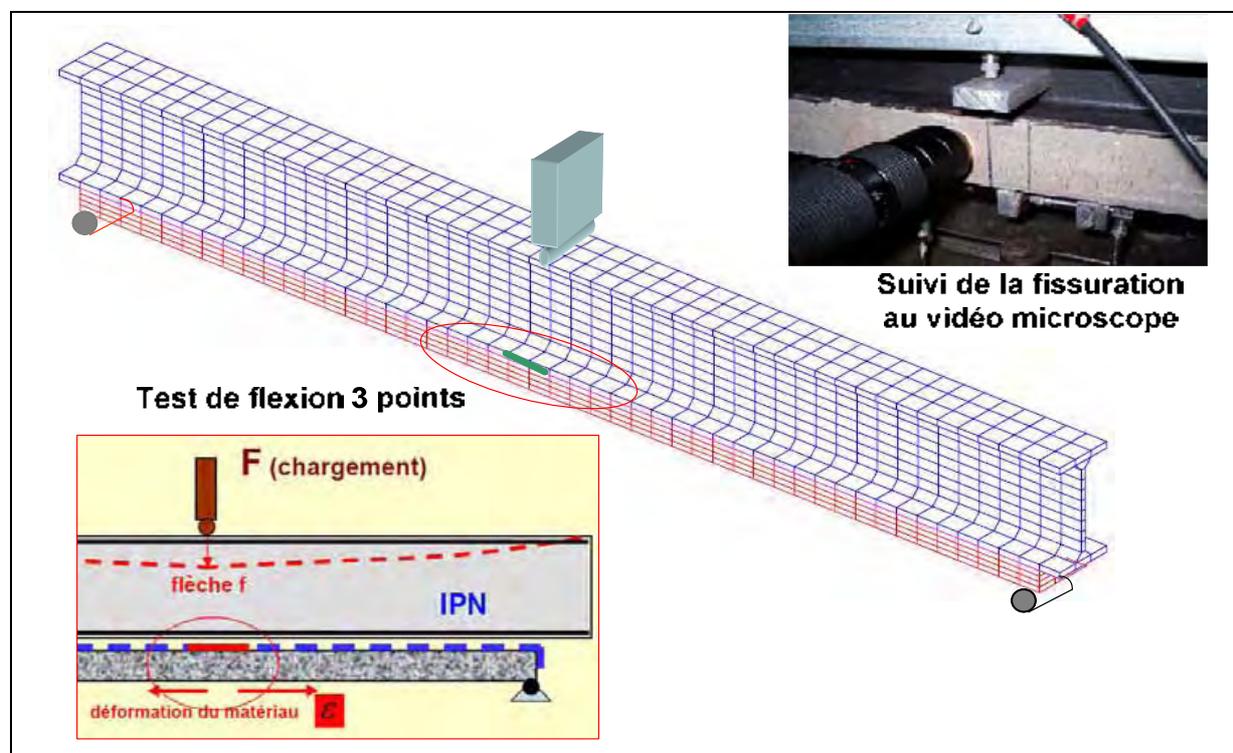


**Figure IV.1** - Principe de mise en oeuvre d'une longueur décollée de 2 cm

### **IV.3 Le test de fissurabilité sur éprouvettes composites**

Le principe du test de fissurabilité est basé sur le fait que le matériau doit fissurer sous l'effet du chargement mécanique. Le test choisi pour l'étude du composite est un essai de flexion 3

points avec la couche de mortier à l'extrados comme décrit sur la figure IV.2. Le test nous permet de déduire la force qu'il faut appliquer à l'éprouvette composite pour endommager la couche de mortier.



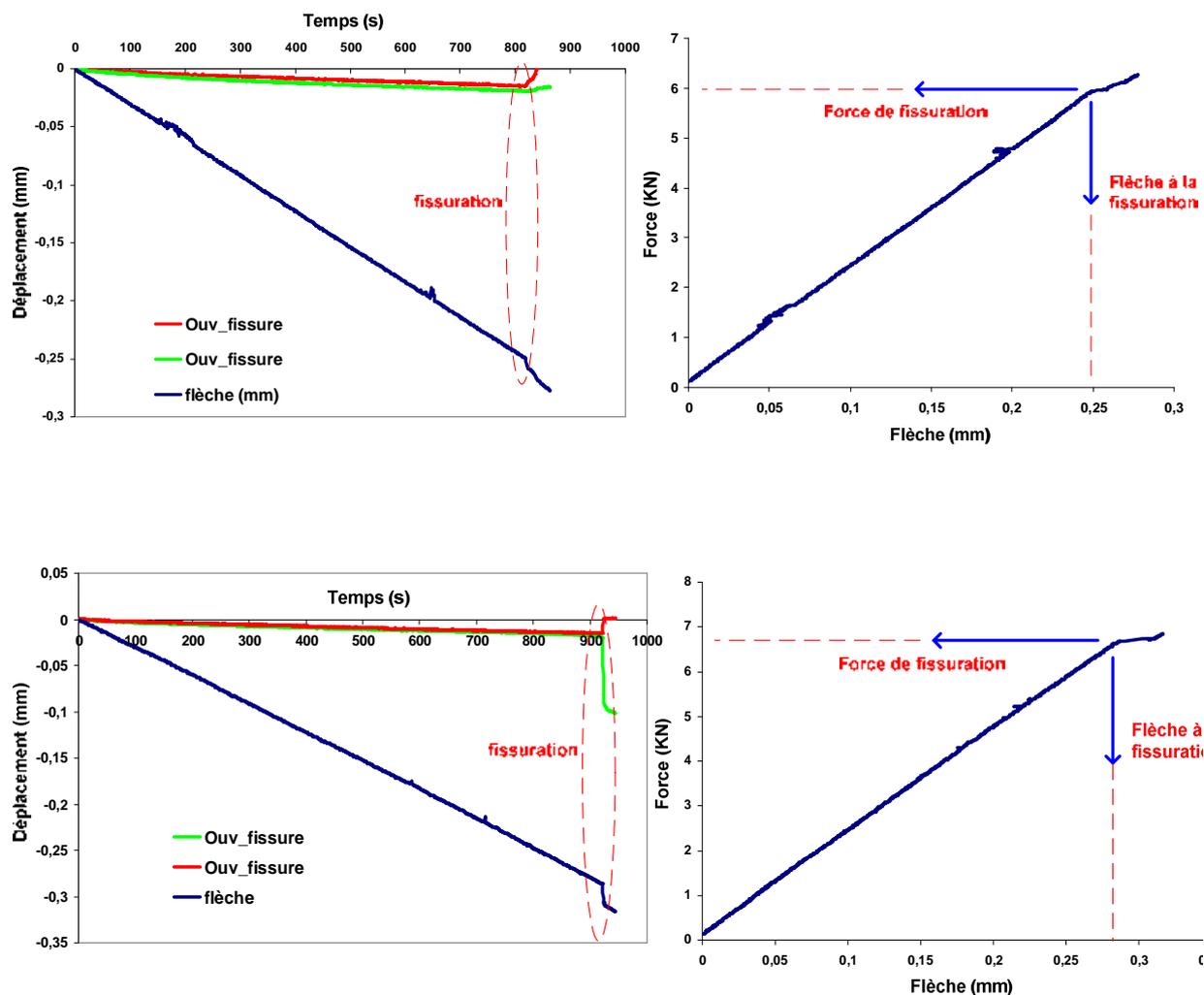
**Figure IV.2** - Test de fissurabilité, schéma du montage expérimental et instrumentation

Les paramètres exploitables sont la force de fissuration, la flèche et la déformation du matériau (notée  $fiss\_a$  et  $fiss\_b$  sur la figure IV.3).

#### IV.4 Résultats

La figure IV.3 présente quelques exemples de courbes obtenues avec le mortier WB pour une épaisseur de la couche de 20 mm.

L'indicateur de fissuration est ici matérialisé par un changement de pente observé sur les courbes déplacements - temps et force - flèche. L'exploitation des graphes (déplacement - temps) nous permet de déduire la déformation à la rupture du mortier, c'est-à-dire la déformation qu'il faudrait imposer au matériau pour que celui-ci fissure. Ici, l'hypothèse est basée sur la continuité des déformations entre le bâti rigide en acier et la couche d'enduit, avec l'hypothèse que la section droite reste plane après déformations (Hypothèse de Navier) [Timoshenko 1955].



**Figure IV.3** - Courbes déplacements - temps et force - flèche à 7 jours pour le mortier WB : mesures effectuées sur 2 éprouvettes issues d'une même gâchée

## IV.5 Modélisation du test de fissurabilité et validation

### IV.5.1 Modèle analytique

Pour modéliser le test de fissurabilité, on va considérer que la section de la poutre est homogène. Les calculs sont faits par rapport au barycentre du système composite en pondérant les paramètres géométriques de chaque composant par leurs sections respectives et en les divisant par la section totale de la poutre mixte. Les composants sont ici au nombre de trois à savoir, le bâti en acier, la grille en acier et enfin la couche d'enduit. Dans les calculs, le coefficient d'équivalence acier-mortier n'est pas pris en compte.

En considérant :

$Y_i$  la position du centre de gravité de l'élément  $i$  par rapport au barycentre de la section homogène,

$S_i$  la section de l'élément  $i$ ,

$E_i$  le module d'Young en traction de l'élément  $i$ ,

$I_i$  l'inertie de l'élément  $i$ .

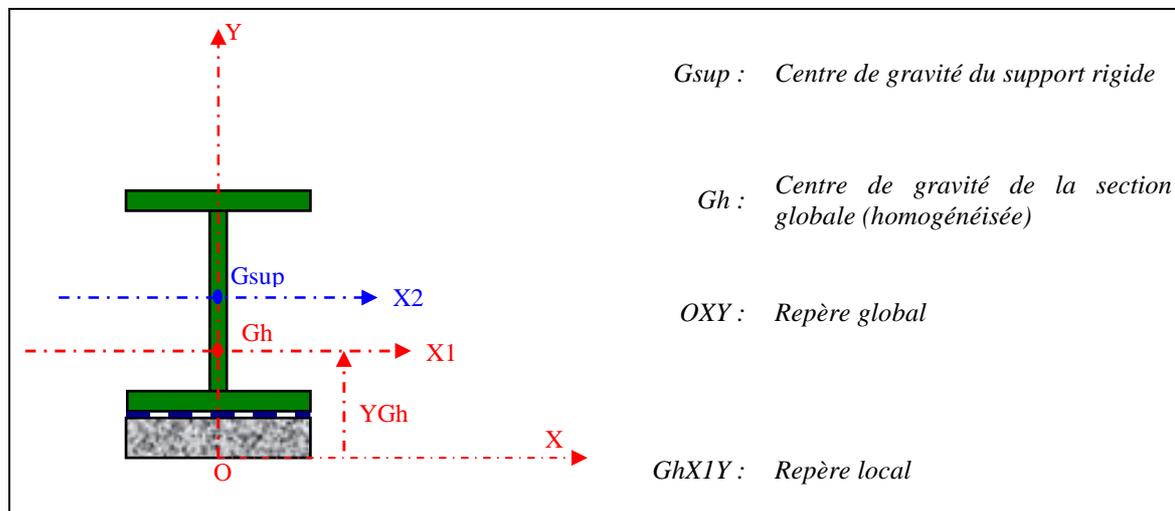


Figure IV.5 - Modélisation du test de fissurabilité

La prise en compte des rigidités différentes affectent la position du centre de gravité et l'inertie de la section homogénéisée.

En considérant  $n_i$  tel que,

$$n_i = \frac{E_i}{E_r} \quad (IV.1)$$

avec  $E_r$  la rigidité du matériau de référence (mortier).

La position du centre de gravité de la section globale par rapport au repère global,

$$Y_{Gh} = \frac{\sum(n_i Y_i S_i)}{\sum(n_i S_i)} \quad (IV.2)$$

L'inertie de la section homogène,

$$I_{Gh} = \sum(n_i I_{i/Gh}) \quad (IV.3)$$

Le module de Young en traction de la section globale,

$$E_{Gh} = \frac{\sum E_i \times S_i}{\sum S_i} \quad (IV.4)$$

On fait ensuite un calcul théorique de la flèche suivant les formules de résistance des matériaux [Timoshenko 1955].

Pour une poutre sollicitée en flexion trois points, la flèche en section centrale est donnée par la formule suivante:

$$f_c = \frac{F \times l^3}{48 \times E_{Gh} \times I_{Gh}} \quad (IV.5)$$

avec :

$l$  la distance entre appuis

$F$  la force de flexion

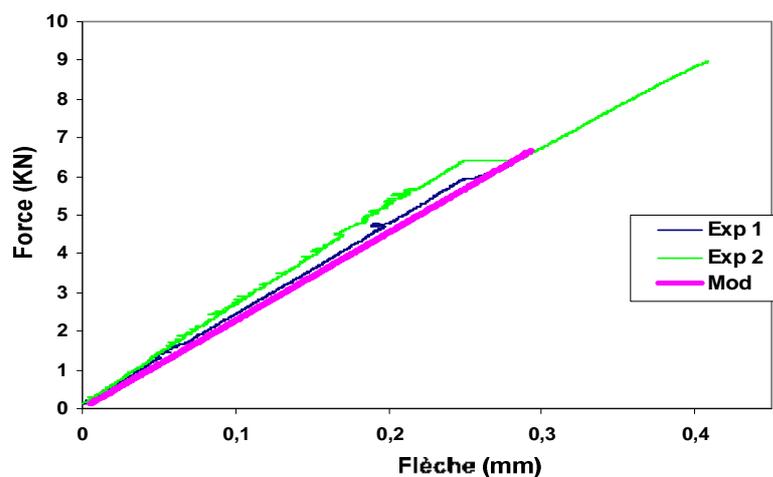


Figure IV.6 - Courbes force – flèche modélisées pour le mortier WB

On constate que le modèle est assez représentatif. En outre, une étude a montré que la rigidité du matériau, comparée à celle du support en acier, influe peu sur le comportement global du système en phase de chargement mécanique. Ceci implique que l'évaluation du module de déformation en traction du matériau ne nécessite donc pas une grande précision ce qui est un avantage car c'est une mesure délicate.

### IV.5.2 Calcul par éléments finis

L'objectif est d'effectuer la modélisation par éléments finis du test de flexion trois points de la poutre composite chargée en son milieu. Le code de calcul utilisé est Cast3M.

On considère ici deux matériaux qui ont des caractéristiques différentes à savoir le module d'Young en traction, l'inertie, ainsi que la section. La validation est faite par comparaison des courbes force - flèche obtenues lors des essais et celles obtenues par la simulation.

Dans ce cas, le calcul est effectué en mécanique élastique isotrope avec prise en compte de l'endommagement du matériau. L'endommagement est pris en compte dans la simulation par le biais du critère de Mazars [Mazars 1984]. Les résultats de la simulation sont présentés sur la figure IV.7. On remarque que la simulation reproduit de façon satisfaisante l'endommagement de la couche de mortier sous l'effet du chargement mécanique.

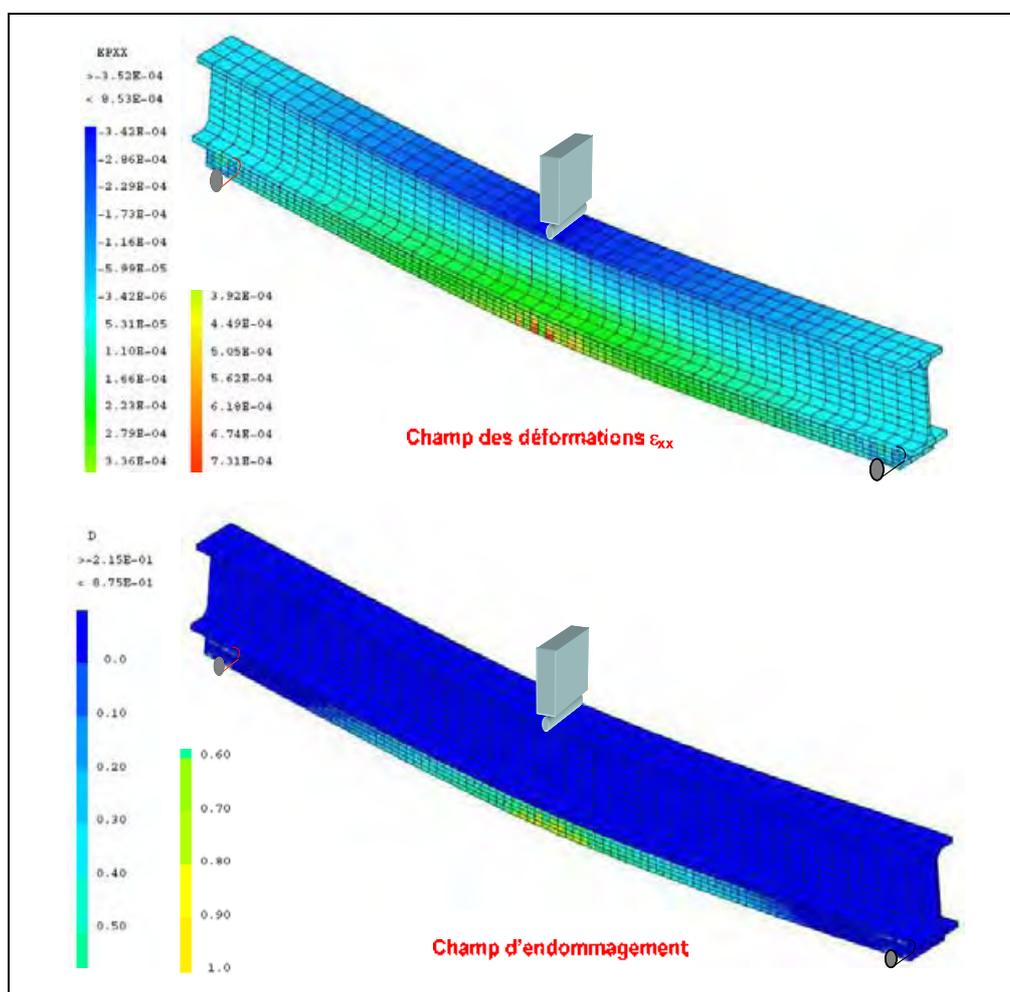
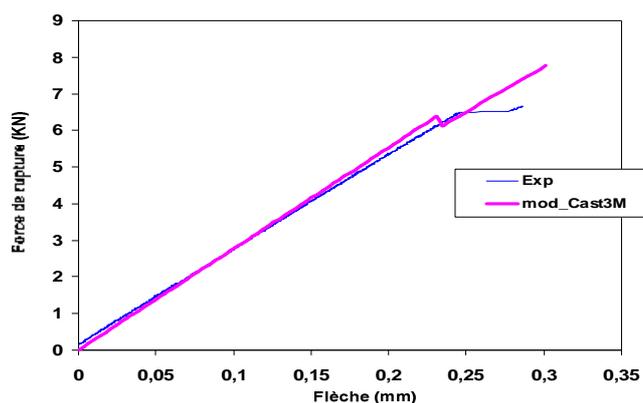


Figure IV.7 - Champs des déformations et d'endommagement au niveau de la couche de mortier

Les courbes force - flèche obtenues par simulations sont présentées sur la figure IV.8.



**Figure IV.8** - Modélisation du test de fissurabilité : mortier WB

On remarque une assez bonne corrélation entre la simulation et les résultats expérimentaux obtenus.

#### IV.6 Exploitation du test

Le test de fissurabilité peut être utilisé comme un outil de comparaison en terme de performances mécaniques entre différentes formulations et nous permet de classer les produits selon leur susceptibilité à fissurer, et donc de préciser leur domaine d'applicabilité.

On peut ainsi faire varier le taux de polymère dans le mélange Weber, l'objectif étant ici de voir son influence sur la susceptibilité à la fissuration des produits. Les détails des compositions sont fournis dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1** - Composition (%) des mortiers Weber

	<b>Liant ternaire</b>	<b>Filler + Sable siliceux (0,08-3mm)</b>	<b>Adjuvants</b>	<b>Polymère</b>
	(Ciment Portland + Ciment Alumineux + gypse)			
<b>WA</b>	37	50	13	0
<b>WC</b>	36,3	49	12,7	2
<b>WB</b>	35,5	48	12,5	4
<b>WD</b>	34,7	47	12,3	6

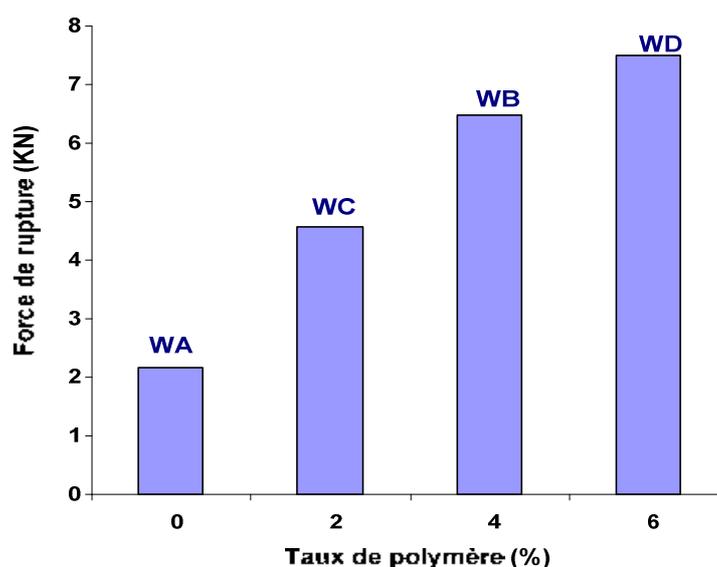
**Eau de gâchage** : 20% de la masse des constituants secs

Des tests de fissurabilité ont été effectués à une échéance de 7 jours sur les différents mortiers. L'épaisseur testée est de 20 mm et chaque résultat est la moyenne de trois essais effectués sur chaque matériau. Le tableau IV.2 présente les résultats obtenus. A la lecture du tableau, on peut constater que l'ajout du polymère dans le mélange diminue sensiblement la susceptibilité à la fissuration des mortiers.

**Tableau IV.2** - Influence du polymère sur la susceptibilité à fissurer des différents mortiers

	WA (0%)		WC (2%)		WB (4%)		WD (6%)	
	Force à la fissuration (KN)	Flèche à la fissuration (mm)	Force à la fissuration (KN)	Flèche à la fissuration (mm)	Force à la fissuration (KN)	Flèche à la fissuration (mm)	Force à la fissuration (KN)	Flèche à la fissuration (mm)
<b>Moyenne 3 mesures</b>	2,36	0,08	4,58	0,16	6,41	0,25	7,5	0,3
<b>Coefficient de Variation (%)</b>	10,7	8,8	7,1	12,1	1,43	0,8	13,2	9,6

La figure IV.9 nous permet de comparer les différentes formules en fonction de leur susceptibilité à fissurer. On remarque que la force à la fissuration augmente sensiblement avec le taux de polymère. Ceci laisse présager une meilleure résistance à la fissuration des mélanges WB et WD.

**Figure IV.9** - Influence du taux de polymère sur la susceptibilité à fissurer du mortier Weber

On peut également faire varier l'épaisseur de la couche de mortier pour une même formulation, l'objectif ici est de définir une épaisseur d'application optimale sur site. Dans le cas du mortier WB, les résultats du test sont présentés sur la figure IV.10 pour les épaisseurs de 20, 30 et 40 mm.

On constate que l'épaisseur optimale d'application se situe entre 20 et 30 mm. Des observations similaires ont été faites sur des planches d'essais réalisées au laboratoire **Weber et Broutin** de Servas.

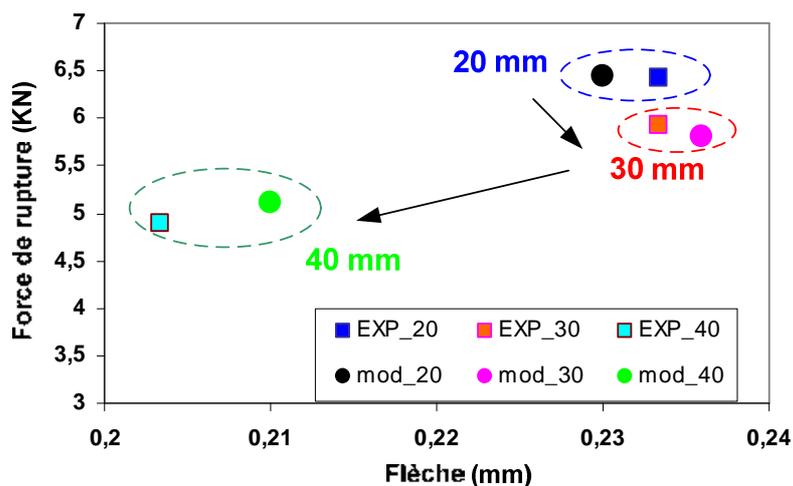


Figure IV.10 - Influence de l'épaisseur de la couche de mortier sur la susceptibilité à fissuration

## IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, le but était d'évaluer l'aptitude à la fissuration de la couche de mortier appliquée sur un support. On a constaté dans la partie II que, en ambiance contrôlée, les mortiers WA et WB ne fissurent pratiquement pas. Afin d'évaluer à court terme la susceptibilité à la fissuration de ces mortiers, un test de fissurabilité a été développé et validé. Ce test nous donne la possibilité à une échéance précise de chiffrer la contrainte mécanique donc la déformation en traction qu'il faut imposer au matériau pour que celui-ci fissure. Il nous permet de classer les produits en fonction de leur susceptibilité à fissurer et peut être utilisé pour plusieurs épaisseurs d'application. C'est un test simple et facile à interpréter qui peut servir d'outil d'aide à la formulation des mortiers en laboratoire.



**CONCLUSION GENERALE ET  
PERSPECTIVES**



## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de cette étude était de caractériser les gradients de propriétés d'une couche de mortier et d'étudier leur influence sur la fissuration. Le but était de mettre en évidence les phénomènes qui régissent le comportement en place des couches minces de mortiers. L'étude a été menée autour de deux principaux volets à savoir expérimental et numérique.

L'étude expérimentale nous a permis de caractériser les différents mortiers et de mieux cerner l'influence de la formulation sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des matériaux étudiés. Cette analyse a révélé que les mortiers à base de ciment Portland MA et MB développent des résistances mécaniques plus élevées à terme que ceux à base ternaire WA et WB. En revanche les mortiers WA et WB possèdent de meilleures résistances au jeune âge (< 10 h), du fait de la réactivité de leur phase liante qui est beaucoup plus rapide et plus importante durant les premières heures suivant la mise en œuvre du matériau. En outre, l'ajout du polymère dans la matrice a non seulement pour effet d'augmenter la déformabilité du matériau, mais aussi sa capacité de rétention d'eau.

L'étude du phénomène de dessiccation de la couche de mortier dû à l'évaporation d'une partie de son eau de gâchage vers le milieu ambiant a révélé que le déséquilibre hydrique se traduit essentiellement par le développement des gradients de teneurs en eau entre la surface de séchage et le cœur du matériau, générant ainsi des gradients d'hydratation et de déformations. Il apparaît clairement que la progression du front de séchage dans la couche de mortier a non seulement une influence directe sur la distribution des teneurs en eau libre, mais aussi sur la structuration du matériau. En outre, les techniques de mesures utilisées au cours de ce travail nous ont permis de caractériser les gradients de propriétés dans la couche de mortier; ainsi:

- la méthode des tranches nous a permis de quantifier les gradients de teneurs en eau libre, les gradients de teneurs en eau chimiquement liée ainsi que les gradients de porosité sur la couche de mortier,
- la technique de mesure par jauges noyées nous a permis de quantifier les gradients de déformations générés par le retrait différentiel sur la couche de mortier.

Le tracé des profils de teneur en eau, d'hydratation, de porosité et des profils des déformations montrent clairement que les gradients de propriétés sont plus importants au voisinage de la surface de séchage.

L'étude de la susceptibilité à la fissuration de la couche de mortier est basée sur l'association du matériau avec un support adhérent. Dans ce cas, le support choisi est non absorbant et peu déformable. Ceci nous a permis de développer des maquettes pour le suivi de la fissuration. A cet effet, des barrettes (maquette 1D) et des plaques (maquette 2D) ont été conçues et instrumentées. L'étude de la fissuration sur maquettes a révélé que la susceptibilité à la fissuration des couches de mortier est fortement influencée par les paramètres tels que la formulation, les conditions de conservation, l'épaisseur du matériau et l'évolution des gradients de déformations dans la couche de mortier. Ainsi on a pu observer que :

- en atmosphère contrôlée, la fissuration observée sur les structures à base de mortiers MA et MB peut être liée à l'augmentation dans le temps des gradients de déformations au voisinage de la surface de séchage, puisque dans le même temps les gradients de déformations calculés sur les structures à base de mortiers WA et WB qui ne fissurent pas diminuent dans le temps,
- le fait de diminuer l'épaisseur de la couche de mortier ou alors de conserver les maquettes dans une atmosphère ventilée a pour conséquence d'écourter l'échéance de fissuration pour les mortiers MA et MB, donc d'augmenter leur susceptibilité à la fissuration,
- les variations de température et d'humidité relative ont également pour effet une augmentation de la susceptibilité à la fissuration y compris pour les mortiers industriels pour lesquels on n'observe pas de fissuration dans des conditions de laboratoire,
- le fait d'ajouter le polymère aux mélanges a pour effet soit de retarder considérablement l'échéance de fissuration (cas du mortier MB), soit de l'éradiquer (cas du mortier WB),
- les études sur maquettes (1D) et sur plaques (2D) ont montré que pour les mêmes conditions d'essai, les échéances de fissuration ainsi que les amplitudes de déformation au moment de la fissuration sont pratiquement les mêmes dans les deux cas de figures, dans ces conditions, on remarque que l'étude de la fissuration sur maquettes (1D) peut être considérée comme représentative du comportement du mortier en terme de déformations dans le plan,
- enfin, l'instrumentation de la plaque nous a permis de constater que les déformations mesurées à différents points sont du même ordre de grandeur, ceci révèle donc que le

comportement du mortier dans le plan peut être considéré comme isotrope en terme de déformations.

L'approche numérique du comportement des couches minces de mortier nous a permis d'aborder plusieurs aspects tels que le comportement hydrique, le comportement mécanique et le comportement vis-à-vis de la fissuration lorsque le mortier est appliqué au contact d'un support. Nous nous sommes intéressés à l'évolution des gradients de propriétés induits par le séchage non uniforme de la couche de mortier. Les principales observations sont les suivantes :

- le séchage entraîne des gradients de teneurs en eau significatifs dans la couche de mortier notamment au voisinage de la surface où se produisent les échanges hydriques entre le matériau et le milieu environnant, la prise en compte de la loi de diffusion de Fick permet de reproduire fidèlement la perte de masse ainsi que la distribution des teneurs en eau dans le volume du matériau,
- en l'absence d'un support adhérent, la prise en compte du coefficient de contraction hydrique établi par Granger et al. [Grange 1997] permet de simuler le retrait de séchage dans la couche de mortier,
- pour la modélisation du retrait total des mortiers MA et MB, la prise en compte du retrait endogène peut se faire par le biais d'un paramètre  $\chi$  (paramètre d'autodessiccation) qui permet de simuler le retrait endogène que subit le matériau comme une perte en eau supplémentaire, en revanche pour les mortiers WA et WB à base ternaire, la déformation endogène peut être assimilée une déformation thermique qui se produit dans le volume du matériau,
- le modèle d'endommagement de Mazars [Mazars 1984] permet de modéliser l'évolution de l'endommagement dans la couche de mortier,
- il a clairement été identifié que la susceptibilité à la fissuration dépend de paramètres influents tels que l'épaisseur de la couche de mortier, les variations de température d'hygrométrie, l'amplitude de séchage, la nature de l'interface utilisée (téflon ou grille),
- la prise en compte du comportement viscoélastique dans la modélisation des variations dimensionnelles des couches de mortier a pour effet de retarder l'échéance de fissuration.

Enfin, un outil d'aide pour la formulation des mortiers en laboratoire a été développé dans le but d'évaluer à court terme l'aptitude à la fissuration de la couche de mortier appliquée sur un support. Un test de fissurabilité a donc été développé et validé. Ce test nous donne la possibilité à une échéance précise de chiffrer la contrainte mécanique donc la déformation en traction qu'il faut imposer au matériau pour que celui-ci fissure. Il nous permet de classer les produits en fonction de leur susceptibilité à fissurer et peut être utilisé pour plusieurs épaisseurs d'application.

Les perspectives de cette étude sont nombreuses. On peut citer par exemple :

- l'influence du type de support (donc de l'adhérence et la porosité) sur la susceptibilité à la fissuration, ici on peut s'intéresser aux supports brique, béton, piseau, polystyrène,
- l'étude de la susceptibilité à la fissuration sur plaques dans des conditions de laboratoire,
- l'étude de la susceptibilité à la fissuration sur plaques pour plusieurs épaisseurs d'application,
- l'étude de la susceptibilité à la fissuration sur maquettes dans des conditions de laboratoire,
- l'influence des cycles de température et d'hygrométrie sur la susceptibilité à la fissuration.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

[Acker 1990] Acker P., Mamillan M., Miao B. (1990) Drying and shrinkage of concrete: the case of massive parts, Suprenant, B.A. (Ed.), Serviceability and Durability of Construction Materials. ASCE, New York pp. 1072–1081.

[Acker 1992] Acker P. (1992) Retrait et fissuration du béton. Association Française Pour la Construction, Documents scientifiques et techniques.

[Acker 2003] Acker P. (2003) Sur les origines du retrait et du fluage du béton. Revue Française de Génie Civil, vol. 7, n°6, pp.761-776.

[Adnan 2007] Adnan Haouas (2007) Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires - Caractérisation et Modélisation chimico-hydro-mécanique du retrait. Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.

[AFREM 1997] AFPC-AFREM (1997) Durabilité des bétons, Compte-rendu des journées techniques « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », Toulouse France.

[Aly 2007] Aly T., Sanjayan J. G. (2007) Factors contributing to early age shrinkage cracking of slag concretes subjected to 7 – days moist curing. Materials and Structures, in press.

[Auvray 2003]. Auvray J. M (2003) Elaboration et caractérisation à haute température de bétons réfractaires à base d'alumine spinelle. Thèse de Doctorat, Université de Limoges.

[Balayssac 1992] Balayssac J.P. (1992) Relations entre performances mécaniques, microstructure et durabilité des bétons. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse.

[Banthia 1993] Banthia N., Azzabi M. and Pigeon M. (1993) Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced cementitious composites. Materials and Structures, vol 26, pp. 405-413.

[Banthia 1996] Banthia N., Yan C. and Mindess S. (1996) Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced concrete: A novel test technique. Cement and Concrete Research, vol 26, n° 1, pp. 9-14.

[Barluenga 2004] Barluenga G., Hernandez-Olivares F. (2004) SBR latex modified mortar rheology and mechanical behaviour. Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 527-535.

[Baroguel 1994] Baroguel-Bouny V. (1994) Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ISBN 2-7208-5030-1.

[Baron 1999] Baroghel-Bouny V., Mainguy M., Lassabatere T., Coussy O. (1999) Characterisation and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high performance cementitious materials. Cement and Concrete Research, vol. 29, pp. 1225-1238.

[Baron 1992] Baron J., Ollivier J.-P. (1992) La durabilité des bétons. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 453p.

[Baron 1982] Baron J. (1982) Les retraits de la pâte de ciment, dans le béton hydraulique. Presse de l'ENPC, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey, 1972, Paris, p. 485-501.

[Bazant 1972]. Bazant Z. P, Najjar L. J. (1972) Non-linear water diffusion in no-saturated concrete. Materials and Structures, vol. 5, n° 25, pp. 3-20.

- [Benbou 2002] Benboudjema F. (2002) Modélisation des déformations différées sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires. Thèse de Doctorat, Université de Marne la Vallée, 257p.
- [Bensted 2002] Bensted J. and Barnes P. (2002) Structure and performance of cements. 2<sup>nd</sup> edition Spon Press, pp. 565, ISBN: 0-419-23330-X.
- [Bentur 2003] Bentur A. & Kovler K. (2003) Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems. *Materials and Structures*, vol 36 April, pp. 183-190.
- [Bernard 2002] Bernard O. and Brühwiler E. (2002) Influence of autogenous shrinkage on early age behaviour of structural elements consisting of concretes of different ages. *Materials and Structures*, vol 35, November, pp. 550-556.
- [Bernard 2003] Bernard O. and Brühwiler E. (2003) The effect of reinforcement in the new layer on hygral cracking in hybrid structural elements. *Materials and Structures*, vol 36, March, pp. 118-126.
- [Bertrand 2004] Bertrand L. (2004) <http://www.insa-lyon.fr/mateis/index.php?Rub=98>, Laboratoire MATEIS.
- [Bertron 2004] Bertron A. (2004) Durabilité des matériaux cimentaires soumis aux acides organiques. Cas particulier des effluents d'élevage. Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse, Toulouse.
- [Beushausen 2007] Beushausen H., Alexander M. G. (2007) Localised strain and stress in bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage. *Materials and Structures*, 40: pp 189-199.
- [Bisshop 2002] Bisshop J., Van Mier J. G. M. (2002) How to study shrinkage microcracking in cement-based materials using optical and scanning electron microscopy. *Materials and Structures*, vol 32(2): pp 279-287.
- [Bissonnette 1995] Bissonnette B. and Pigeon M. (1995) Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, vol 25 (5), pp. 1075 - 1085.
- [Bissonnette 1996] Bissonnette B. (1996) Le fluage en traction: un aspect important de la problématique des réparations minces en béton. Ph.D. thesis, Université Laval, Québec, Canada.
- [Bissonnette 1999] Bissonnette B., Pierre P., Pigeon M. (1999) Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1655-1662.
- [Bissonnette 2000] Bissonnette B., Pigeon M. (2000) Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations. *Materials and Structures*, vol. 33, pp. 108-118.
- [Bonin 2005] Bonin K. (2005) The function of polymer dispersion powder in cement based dry mix products. Wacker Polymer Systems GmbH & Co. KG.
- [Bradley 2005] Bradley J.P. (2005) The role of shrinkage reducing admixtures on shrinkage, stress development, and cracking. Master Thesis, May, Purdue University.
- [Breugel 1991] Breugel V. (1991) Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-Based Materials. Phd Thesis of Technische Universiteit Delft.
- [Buffo 2007] Buffo-Lacarrière L. (2007) Prévion et évaluation de la fissuration précoce des ouvrages en béton. Thèse de Doctorat INSA de Toulouse, 246 p.

- [Buil 1979] Buil M. (1979) Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante. Rapport de recherche LPC n°92, Laboratoire Central des ponts et Chaussées, 72 pages.
- [Capener 2004] Capener C.M.J. (2004) Effect of admixtures on the fresh and hardened properties of modern rendering system. Thèse d'ingénierie, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 60 p.
- [Carré 2005] Carré S., Nicolle O. (2005) Caractérisation des gradients de microstructure des matériaux cimentaires induits par les couplages hydratation-transfert d'eau : application aux structures de béton armé réparées. 17<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Sept, Troyes.
- [Chanvillard 1999] Chanvillard G. (1999) Le matériau béton : Connaissances générales. Les cours de l'ENTPE.LYON: ENTPE ALEAS. 175.
- [Chotard 2003] Chotard T. J., Smith A. et al. (2003) Characterisation of early stage calcium aluminate cement hydrations by combination of non-destructive techniques: acoustic emission and X-ray tomography. Journal of the European Ceramic Society 23, pp. 2211-2223.
- [Chung 2004] Chung D.D.L. (2004) Review. Use of polymers for cement-based structural materials. Journal of Materials Science, vol. 39, pages 2973-2978.
- [Colina 2000] Colina H. and Acker P. (2000) Drying cracks: Kinematics and scale laws. Materials and Structures, 33, March, pp. 101-107.
- [De Schutter 1999] De Schutter G. (1999) Degree of hydration based Kelvin model for the basic creep of early age concrete. Materials and Structures, 32: pp 260-265.
- [Détriché 1978] Détriché C. H. (1978) Analyse expérimentale du retrait de couches minces de mortier Mesure depuis le moulage. Materials and Structures, 11(4), pp. 247-259.
- [Détriché 1983a] Détriché C.H. (1983) Contribution à l'étude du comportement des couches minces de mortiers de liants hydrauliques applications aux enduits. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse.
- [Détriché 1983b] Détriché C.H., Grandet J., Maso J. C. (1983) Dessiccation des mortiers d'enduit Matériaux et construction, vol.16 n° 94.
- [Do 2003] Do J., Soh Y. (2003) Performance of polymer-modified self-leveling mortars with high polymer-cement ratio for floor finishing. Cement and Concrete Research, 33 pp. 1497-1505.
- [Emmons 1994] Emmons P. H. et Vaysburd A. M. (1994) Factors affecting the durability of concrete repair: the contractor's viewpoint. Construction and building materials 8(1).
- [Evju 2001] Evju C., Hansen S. (2001) Expansive properties of ettringite in a mixture of calcium aluminate cement, Portland cement and  $\beta$ -calcium sulfate hemihydrate. Cement and Concrete Research, 31, pp. 257-261.
- [Feron 2002] Feron C. Etude des mécanismes de génération des contraintes et de fissuration par retrait gêné dans les structures à base de matériaux cimentaire. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon.
- [Gallias 1982] Gallias J.L. (1982) Mouvement de l'eau et hydratation du liant dans une couche mince de mortier, application aux enduits extérieurs. Thèse de doctorat-ingénierie Université Paul Sabatier, Toulouse.

- [Garcia 2001] Garcia-Boivin S. (2001) Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène. Thèse de Doctorat ENPC : Paris, 251 p.
- [Gemert 2004] Van Gemert D., Knapen E. (2004) Recent Development of Concrete Polymer Composites in Belgium. 11th ICPIG Congress in Berlin.
- [Gomes 2005] Gomes C.E.M., Ferreira O.P., Fernandes M.R. (2005) Influence of Vinyl acetateversatic vinylester copolymer on the microstructural characteristics of cement pastes. *Materials Research*, vol 8, pages 51-56.
- [Goto 2006] Goto T. (2006) Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex. Thèse de doctorat de l'Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles, Université Paris VI, 201 p.
- [Granger 1997a] Granger L., Torrenti J. M., Acker P. (1997) Thoughts about drying shrinkage: scale effect and modelling. *Materials and Structures*, 30, mars, pp.96-105.
- [Granger 1997b] Granger L., Torrenti J. M., Acker P. (1997) Thoughts about drying shrinkage: Experimental results and quantification of structural drying creep. *Materials and Structures*, 30, December, pp.588-598.
- [Granju 2004] Granju J. L., Sabathier V., Turatsinze A. et al. (2004) Interface between an old concrete and a bonded overlay. *Interface Science*, 12:381-388.
- [Grasley 2002] Grasley Z. C. and Lange D. A. (2002) Modeling drying stress gradients in concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol 20, n°10 Sept.
- [Gu 1997] Gu P., Beaudoin J. J. et al. (1997) Early Strength Development and Hydration of Ordinary Portland Cement/Calcium Aluminate Cement Pastes. *Advanced Cement Based Materials*, pp. 6:53-58.
- [Hammer 2006] Hammer T.A., Foss<sup>o</sup> K.T. (2006) Influence of entrained air voids on pore water pressure and volume change of concrete before and during setting. *Materials and Structures*, 39, pp. 801-808
- [Hua 1995] Hua C., Acker P. and Ehlacher A. (1995) Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n° 7, pp. 1457-1468.
- [Jenni 2003] Jenni A. (2003) Evolution microstructurale et propriétés physiques des mortiers polymère-modifiés. Université de Berne. <http://www.earthsci.unibe.ch/tectonics/Research/Elotex-KIT-1/A.Jenni/PhD.html>
- [Jenni 2005] Jenni A., Holzer L., Zurbriggen R., Herwegh M. (2005) Influence on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 35-50.
- [Jennings 2000] Jennings H.M. (2000) A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste. *Cement and Concrete Research*, vol.30, n°1, pp. 567-572.
- [Jensen 1995] Jensen O. M. & Hansen P. F. (1995) A dilatometer for measuring autogenous deformations in hardening Portland cement paste. *Materials and Structures*, 28 (181), pp. 406-409.
- [Jolicoeur 1998] Jolicoeur C. & Simard Marc-André (1998) Chemical Admixture-Cement Interactions: Phenomenology and Physico-chemical Concepts. *Cement and Concrete Research* 20, pp. 87-101.

- [Justness 1994] Justness H., Reyniers B. et al. (1994) An evaluation of methods for measuring chemical shrinkage of cementitious pastes. Nordic concrete research publication, n° 14, pp. 45-61.
- [Kamen 2006] Kamen A. (2006) Time dependent behaviour of Ultra High Performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). 6<sup>th</sup> International Phd Symposium in Civil Engineering, Zurich, August 23-26.
- [Kanna 1998] Kanna V., Olson R.A., Jennings H.M. (1998) Effect of shrinkage and moisture content on the physical characteristics of blended cement mortars. Cement and Concrete Research, 18 (10), pp. 1467-1477.
- [Khayat 1996] Khayat K.H. (1996) Effects of anti-washout admixtures on properties of hardened concrete. ACI Materials Journal, vol. 93 (2), pp. 169-183.
- [Khayat 1998] Khayat K.H. (1998) Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials-An overview. Cement and Concrete Composites, vol. 20, pp. 171-188.
- [Khelidj 1998] Khelidj A., Loukeli A. et Bastian G. (1998) Etude expérimentale du couplage hydro-chimique des bétons en cours de maturation: Incidence sur les retraits. Materials and Structures, vol 31, november, pp. 588-594.
- [Kim 1997] Kim J., Robertson R. E. (1997) Prevention of Air void formation in polymer-modified cement mortar by pre-wetting. Cement and Concrete Research, vol. 27 (2), pp. 171- 176.
- [Kim 2004]. Kim J. K and Lee C. S. (2004) Prediction of differential drying shrinkage in concrete. Cement and concrete research, vol. 28, No. 7, pp. 985-994
- [Klemm 1997] Klemm A.J., Klemm P. (1997) The effect of the alternate freezing and thawing cycles on the pore structure of cementitious composites modified by MHEC and PVA. Building and Environment, vol. 32 (6), pp. 509-512.
- [Laurence 2001] Laurence O. (2001) La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton : Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation . Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [LCPC 2002] LCPC (2002) Caractérisation microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons. Méthodes d'essai n° 58, LCPC; 1<sup>er</sup> trimestre.
- [LEA 2004] Hewlett P. C. (2004) Chemistry of cement and concrete, Fourth edition. Elsevier Science & Technology Books 2004.
- [Lemaître 1985] Lemaître J., Chaboche J. L. (1985) Mécanique des matériaux solides. 2<sup>ème</sup> édition DUNOD. ISBN 2 10 048632 2, 544 p.
- [Locher 1976] Locher F. W., Richartz W. et al. (1976) Zement Kalk Gips (en Allemand), vol.29 (10) pp. 435-442.
- [Loukeli 1999] Loukeli A., Khelidj A., Richard P. (1999) Hydration kinetics, change of relative humidity and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete. Cement and Concrete Research, vol 29, n°4, pp. 577-584.
- [Lura 2003] Lura P. (2003) Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete. Phd Thesis of Technische Universiteit Delft.

- [Malatrait 1992] Malatrait M.C. (1992) Propriétés hydriques du mortier pour enduits de façade en relation avec sa structure poreuse. Mise en œuvre, durabilité. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 282 pages.
- [Martinola 2001] Martinola G., Sadouki H. & Wittmann F. H. (2001) Numerical model for minimizing risk of damage in repair system. *Journal of materials in civil engineering*/march/april.
- [Mazars 1984] Mazars J. (2001) Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire de la rupture du béton de structure. PhD thesis of P. et M. Curie University, Paris 6.
- [Mensi 1988] Mensi R., Acker P., Attolou A. (1988) Séchage du béton : analyse et modélisation. *Materials and Structures*, vol. 21, n° 121, pp. 3-12.
- [Mindess 1981] Mindess S. and Young J. F. (1981) *Concrete*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- [Mitani 2003] Mitani H. (2003) Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : Approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux. Thèse de Doctorat ENPC : Paris, 181 p.
- [Mokarem 2002] Mokarem D. W. (2002) Development of concrete shrinkage performances specifications. Phd Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [Molez 2003] Molez L. (2003) Comportement des réparations structurales en béton : couplage des effets hydriques et mécaniques. Thèse de Doctorat Ecole Normale Supérieure de Cachan, 226 p.
- [Monge 2007] Monge Joachim (2007) Fissuration des Mortiers en couches minces – Effets de l'Hydratation, du Séchage et de la Carbonatation. Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [Mounanga 2003] Mounanga P. (2003) Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques. Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [Nicot 2007] Nicot Pierre, Balayssac J. P., Détriché C. H. et al. (2007) Mortar-substrate interactions : device factors for performances and adhesion of a mortar'. 2<sup>nd</sup> Portuguese Congress on Mortars, Lisbonne.
- [Nicot 2008] Nicot Pierre (2008) Interactions mortier – support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier. Thèse de Doctorat Université de Toulouse.
- [Ohama 1987] Ohama Y. (1987) Principle of latex modification and some typical properties of latex modified mortars and concretes. *ACI Materials Journal*, pp. 511-518.
- [Ohama 1995] Ohama Y. (1995) *Handbook of polymer-modified concretes and mortars*. Noyes Publications.
- [Ohama 1998] Ohama Y. (1998) Polymer based admixtures. *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, pp. 189-212.
- [Older 1972] Odler I., Hagymassy J. et al. (1972) Hardened portland cement pastes of low porosity IV. Surface area and pore structure. *Cement and Concrete Research*, vol. 2 (5) pp. 577-589.
- [Ollitrault 1998] Ollitrault-Ficher R., Gauthier C., Clamen G., Boch P. (1998) Microstructural aspects in a polymer modified cement. *Cement and Concrete Research*, vol. 28 (12), pp. 1687-1693.

- [Ollivier 2003] Ollivier J. P. (2003) Physico chimie des matériaux cimentaires. Cours Master 2 recherche génie civil, LMDC Toulouse.
- [Pascal 2002] Pascal S. (2002) Comportement mécanique de composites mortier-polymère. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Paris : Paris, 348 p.
- [Peschard 2002] Peschard A., Bertrand L., et al. (2002) 'Interactions ciments / polysaccharides dans les enduits. [http://pem.utbm.fr/materiaux\\_2002/file/pdf/AF06011.PDF](http://pem.utbm.fr/materiaux_2002/file/pdf/AF06011.PDF)
- [Pigeon 2003] Pigeon M., Toma G. et al. (2003) Etude expérimentale du retrait endogène restreint au jeune âge. *Materials and Structures*, vol.36, December, pp. 666-672.
- [Plank 2007] Plank J., Winter Ch. (2007) Competitive adsorption between superplasticizer and retarder molecules on mineral binder surface. *Cement and Concrete Research* vol. 31.
- [Pourchez 2006] Pourchez J., Govin A., Grosseau P. et al. (2006) Alkaline stability of cellulose ethers and impact of their degradation products on cement hydration. *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1252-1256.
- [Pourchez 2006a] Pourchez J. (2006) Aspects physico-chimiques de l'interaction des éthers de cellulose avec la matrice cimentaire. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines, 285 pages.
- [Pourchez 2007] Pourchez J., Debayle J., Grosseau P. et al. (2007) Structuration du réseau poreux des matériaux cimentaires frais par microtomographie par rayonnement synchrotron à acquisition rapide. Présentation aux Journées Annuelles de la SF2M.
- [Powers 1968] Powers T.C. (1968) The thermodynamics of volume change and creep. *Materials and Structures*, 1 (6), pp. 487-507.
- [Putterman 1999] Putterman M. (1999) Adhesion between polymers and concrete: Proceedings of the 2nd International RILEM Symposium, ISAP'99, edited by Ohama and M. Putterman, pp. 235-246.
- [Sabathier 2004] Sabathier V. (2004) Rechargements minces adhérents à base cimentaire renforcés de fibres métalliques. Condition de leur durabilité, modélisation et calcul. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [Sadouki 1997] Sadouki H. and Van Mier J. G. M. (1997) Simulation of hygral crack growth in concrete repair systems. *Materials and Structures*, Vol 30, Nov, pp. 518-526.
- [Saija 1995] Saija L.M. (1995) Waterproofing of Portland cement mortars with a specially designed polyacrylic latex. *Cement and Concrete Research*, vol. 25 (3), pages 503-509.
- [Sakata 1983] Sakata K. (1983) A study on moisture diffusion in drying and shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 13, pp. 216-224.
- [Sakai 1995] Sakai E., Sujita J. (1995) Composite mechanism of polymer modified-cement. *Cement and Concrete Research*, vol. 25 (1), pp. 127-135.
- [Sarkar 1995] Sarkar N., Walker L.C. (1995) Hydration-dehydration properties of methylcellulose and hydroxypropylmethylcellulose. *Carbohydrate Polymers*, vol. 27, pp. 177-185.
- [Scrivener 1999] Scrivener L. K., Cabiron J. L., Letourneux R. (1999) High-performance concretes from calcium aluminate cements. *Cement and Concrete Research*, vol 29, pp. 1215-1223.

- [Sellier 2006] Sellier A. (2006) Modélisations numériques pour la durabilité des ouvrages de Génie Civil. Mémoire de HDR, Université Paul Sabatier, Toulouse III, 156 p.
- [Shaker 1997] Shaker F.A., El Dieb A.S., Reda M.M. (1997) Durability of styrene-butadiene latex modified concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 27 (5), pp. 711-720.
- [Silva 2001] Silva D.A., John V.M., Ribeiro J.L.D. et al. (2001) Pore size distribution of hydrated cement pastes modified by polymers. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 1177-1184.
- [Smith 2002] Smith A., Chotard T. J. et al. (2002) Ultrasonic measurements as an in situ tool for characterising the ageing of an aluminous cement at different temperatures. *Journal of the European Ceramic Society*, 22. pp. 2261-2268.
- [Su 1995] Su Z. (1995) Microstructure of polymer cement concrete. PhD thesis. Delft University Press, The Netherlands, 189 pages.
- [Su 1996] Su Z., Sujata K., Bijen J.M.J.M. et al. (1996) The evolution of the microstructure in acrylate polymer-modified cement pastes at the early age of cement hydration. *Advanced Cement Based Materials*, vol. 3, pp. 87-93.
- [Tamin 1986] Tamin P. F. (1986) Etude du comportement mécanique des revêtements de façades-enduits. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [Taylor 1990] Taylor H. F. W. (1990) *Cement Chemistry*, Academic Press London.
- [Timoshenko 1955] Timoshenko S. (1955) *Strength of materials*. Van Nostrand Company, Princeton, New Jersey.
- [Tony 2006] Soetanto T. (2006) Investigation of Delamination on Concrete Slabs. Graduation thesis. Delft University Press, The Netherlands, 116 pages.
- [Torrenti 1992] Torrenti J. M. (1992) La résistance du béton au très jeune âge. *Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées*, mai-juin, n° 179, pp. 31-41.
- [Torrenti 1997] Torrenti J. M., Granger L. et al. (1997) Modélisation du retrait du béton en ambiance variable. *Revue française de génie civil*. vol. 1, n°4, pp. 687-698.
- [Tran 2005] Tran Q. T., Toumi A., Granju J.-L. (2005) Experimental and numerical investigation of the debonding interface between an old concrete and an overlay. *Materials and Structures*, vol 39, pp. 379-389.
- [Tran 2007] Tran Q. T. (2007) Interface ancien-nouveau béton : caractérisation du comportement adoucissant de l'interface en cours de décollement et son évolution dans le cas de sollicitations de fatigue. Thèse de Doctorat Université Paul Sabatier, Toulouse III, 192 p.
- [Turatsinze 2000] Turatsinze A., Hussein F. and Granju J.-L. (2000) Durability of metal-fibre reinforced concrete repairs: drying shrinkage effects. *Proceeding of the Sixth International Symposium on Brittle Matrix Composites BMC6*, held in Staszic Palace, Warsaw, Poland, 9-11 October.
- [Turcry 2004] Turcry P. (2004) Retrait et fissuration des bétons autoplaçants. Influence de la formulation. Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes.
- [Ulm 1999] Ulm F.-J., Le Maou F., Boulay C. (1999) Creep and shrinkage coupling: new review of some evidence, *Revue Française de Génie Civil*, 3, pp. 21-37.

- [Vallée 1999] Vallée F. (1999) Durabilité des composites polymères / ciment : applications au cas des enduits minces sur isolants. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 206 pages.
- [Veiga 2007] Veiga M. R., Velosa A. L., Magalhaes A. C. (2007) Evaluation of mechanical compatibility of renders to apply on old walls based on a restrained shrinkage test. *Materials and Structures*, vol 40, pp. 1115-1126.
- [Waller 2003] Waller V., D'Aloia V., Cussigh L. et al. (2003) Using the maturity method in concrete cracking control at early ages. *Cement and Concrete Composites* (Sous presse).
- [Weiss 1999] Weiss W. J. (1999) Prediction of early age shrinkage cracking in concrete. Phd Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, 1999.
- [Whang 2006] Whang R., Li X.G., Wang P.M (2006) Influence of polymer on cement hydration in SBR-modified cement pastes. *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1744- 1751.
- [William 2007] William P. B., van Zijl Gideon P.A.G. (2007) Time-dependent response of EEC: Characterisation of creep and rate dependence. *Cement and Concrete Research*, vol 37, pp. 725 - 734.
- [Witasse 2000] Witasse R. (2000) Contribution à la compréhension du comportement d'une coque d'aéroréfrigérant vielli : définition d'un état initial, influence des effets différés sous sollicitations hydro-mécaniques. Thèse de Doctorat INSA de Lyon, 174 p.
- [Wittmann 1980] Wittmann F. H., Roelfstra P. (1980) Total deformation of loaded drying creep. *Cement and Concrete Research*, 10, pp. 601-610.
- [Xi 1994] Xi Y., Bazant Z. P. et al. (1994) Moisture diffusion in cementitious materials: moisture capacity and diffusivity. *Advanced Cement Based Materials*, 1, pp. 258-266.
- [YE 2003] YE G. (2003) Experimental Study and Numerical Simulation of the development of the Microstructure and Permeability of Cementitious Materials. Phd Thesis of Technische Universiteit Delft.
- [Yokoyama 1994] Yokoyama K., Hiraishi S. et al. (1994) Shrinkage and cracking of high strength concrete and flowing concrete at early age. *Proceedings of 4th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete*. V.M. Malhotra, Editeur, ACI SP-148, American Concrete Institute, pp. 243-258.
- [Yoshinobu 2006] Yoshinobu Hirano, Koji Makida et al. (2006) Dimensional Change of Self-Leveling Materials Developed by Mixing Aluminous Cement, Portland Cement and Anhydrite at 35 °C. *Transactions of the Materials Research Society of Japan* 31[2] 325-328.
- [Young 1972] Young J. F. (1972) A review of the mechanisms of set-retardation in Portland cement pastes containing organic admixtures. *Cement and Concrete Research* 2, pp. 415-433.
- [Yssorche 1995] Yssorche M. P. (1995) Microfissuration et durabilité des bétons à hautes performances. Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse, Toulouse.
- [Yuan 2003] Yuan Y., Li G., Cai Y. (2003) Modeling for prediction of restrained shrinkage effect in concrete repair. *Cement and Concrete Research*, 33: pp. 347-352.
- [Yurtdas 2004] Yurtdas I., Burlion N. and Skoczylas F. (2004) Experimental characterisation of the drying effect on uniaxial mechanical behaviour of mortar. *Materials and Structures* vol 37, April, pp. 170-176.



# **ANNEXES**



## ANNEXE- A : Description des jauges utilisées

### A.1 Présentation

Les jauges utilisées pour la mesure des déformations ont spécialement été conçues pour être noyées dans le matériau.

Elles mesurent les déformations axiales dans le sens de leur longueur. L'élément sensible est fixé sur une feuille mince d'acier (du clinquant d'une épaisseur de  $3/10^{\text{ème}}$  de mm). L'ensemble est ensuite enrobé d'une résine permettant de protéger la jauge contre l'humidité. Pour optimiser l'adhérence du matériau à la jauge, du sable calcaire est aspergé sur la surface de la résine fraîche. Les détails de la fabrication de la jauge sont présentés sur la figure A.1.

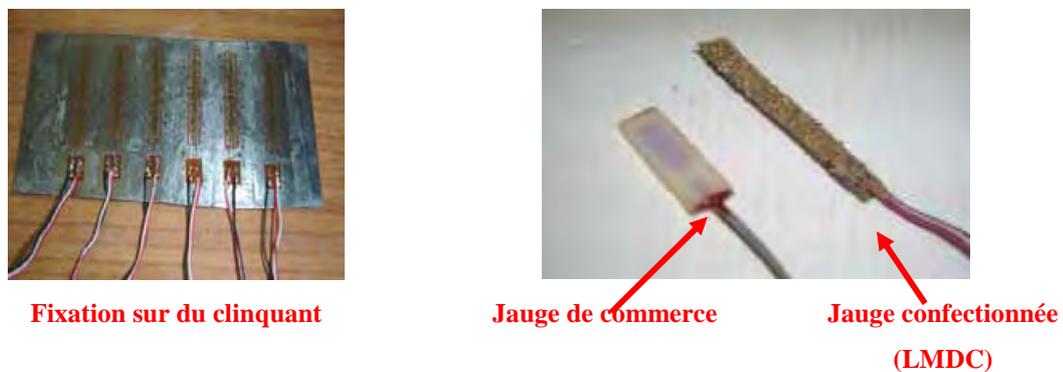


Figure A.1- Détails de la conception de la jauge utilisée

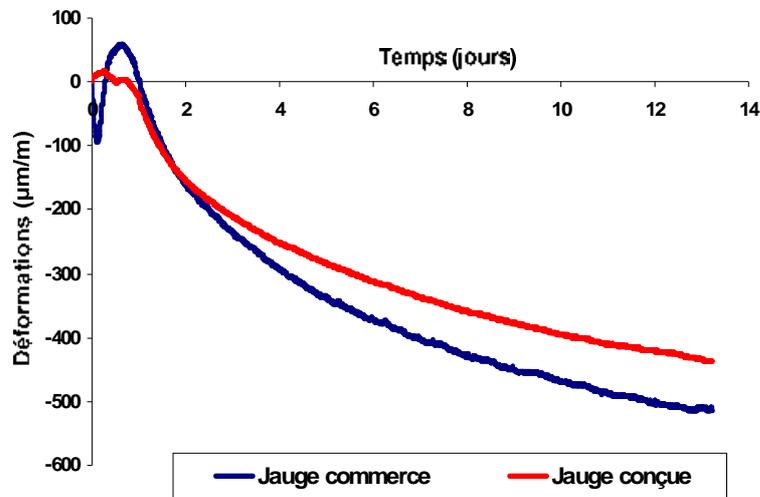
### A.2 Comparaison avec les jauges du commerce

Pour la validation, nous avons confronté les mesures obtenues avec les jauges fabriquées à celles obtenues avec les jauges du commerce spécialement conçues pour être noyées dans le matériau. Nous avons effectué des tests sur du mortier MA en ambiance contrôlée (température  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}=65 \pm 5\%$ ). La figure A.2 donne présente le dispositif de mesure utilisé.



Figure A.2 - Principe de mesure des variations dimensionnelles dans le cœur du matériau

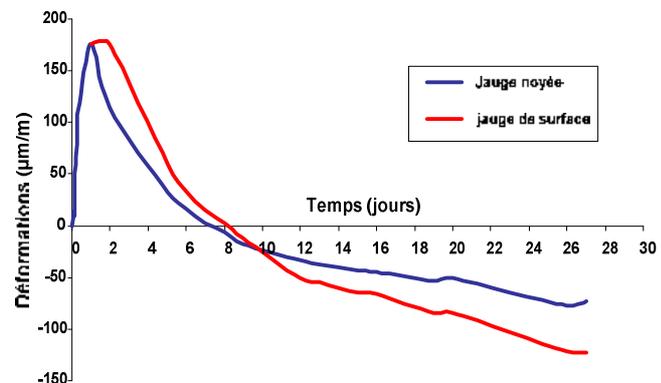
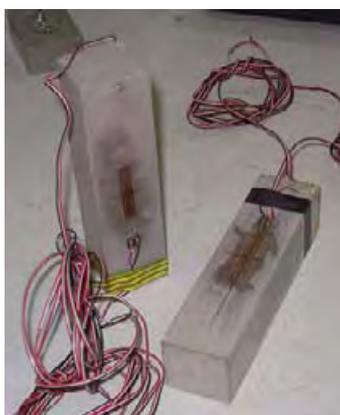
La figure A.3 présente les courbes de déformations obtenues. On remarque que les déformations mesurées sont du même ordre de grandeur.



**Figure A.3-** Mesure des variations dimensionnelles dans le cœur du matériau : Comparaison avec les jauges de commerce

### A.3 Sensibilité des jauges incluses

Pour tester la sensibilité des jauges, nous avons comparé les évolutions des déformations mesurées à partir d'une jauge collée directement sur la surface d'une éprouvette prismatique de mortier de dimensions 40×40×160 mm et d'une jauge noyée positionnée au centre de l'éprouvette. La jauge de surface est collée au bout d'1 jour de séchage lorsque le matériau a atteint une résistance suffisante et la déformation initiale est considérée comme étant la déformation donnée par la jauge noyée à 1 jour de séchage. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure A.4.



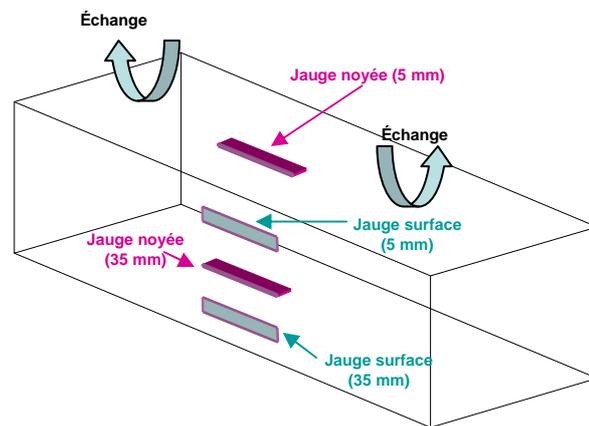
**Figure A.4-** Mesure des déformations en surface et dans le cœur de l'éprouvette pour un mortier industriel (formule commerciale pour travaux de chapes) en ambiance contrôlée

En observant l'évolution des déformations pour les 2 jauges, on remarque que les cinétiques d'évolutions sont tout à fait comparables.

Des essais en température ont montré qu'une élévation de la température jusqu'à 30°C entraîne une dilation de la jauge correspondant à une déformation d'environ 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

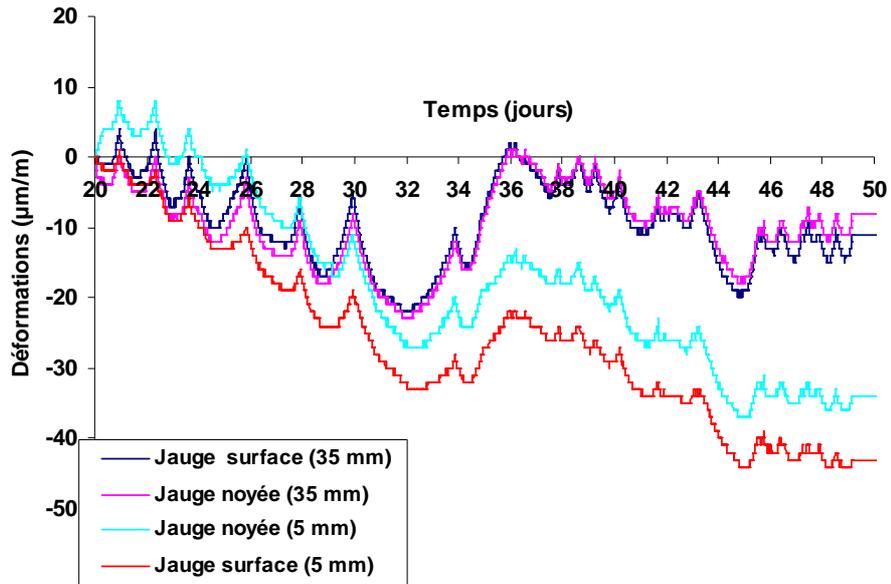
#### A.4 Variations de l'ambiance de conservation

Dans ce cas, des mesures des déformations sont également effectuées au moyen de jauges dont 2 noyées dans le matériau et 2 collées en surface à des profondeurs de 5 mm et 35 mm par rapport à la surface de séchage d'une éprouvette de dimensions 40×40×160 mm pour laquelle les échanges hydriques se font uniquement par la face supérieure. Les 5 autres sont protégées de la dessiccation au moyen de papier aluminium auto - adhésif (voir figure A.5). Les mesures sont effectuées après 20 jours de conservation dans une ambiance ventilée.



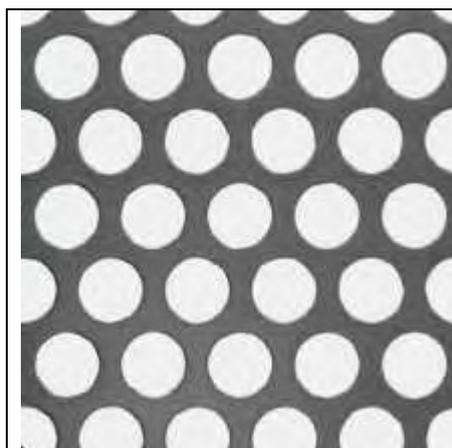
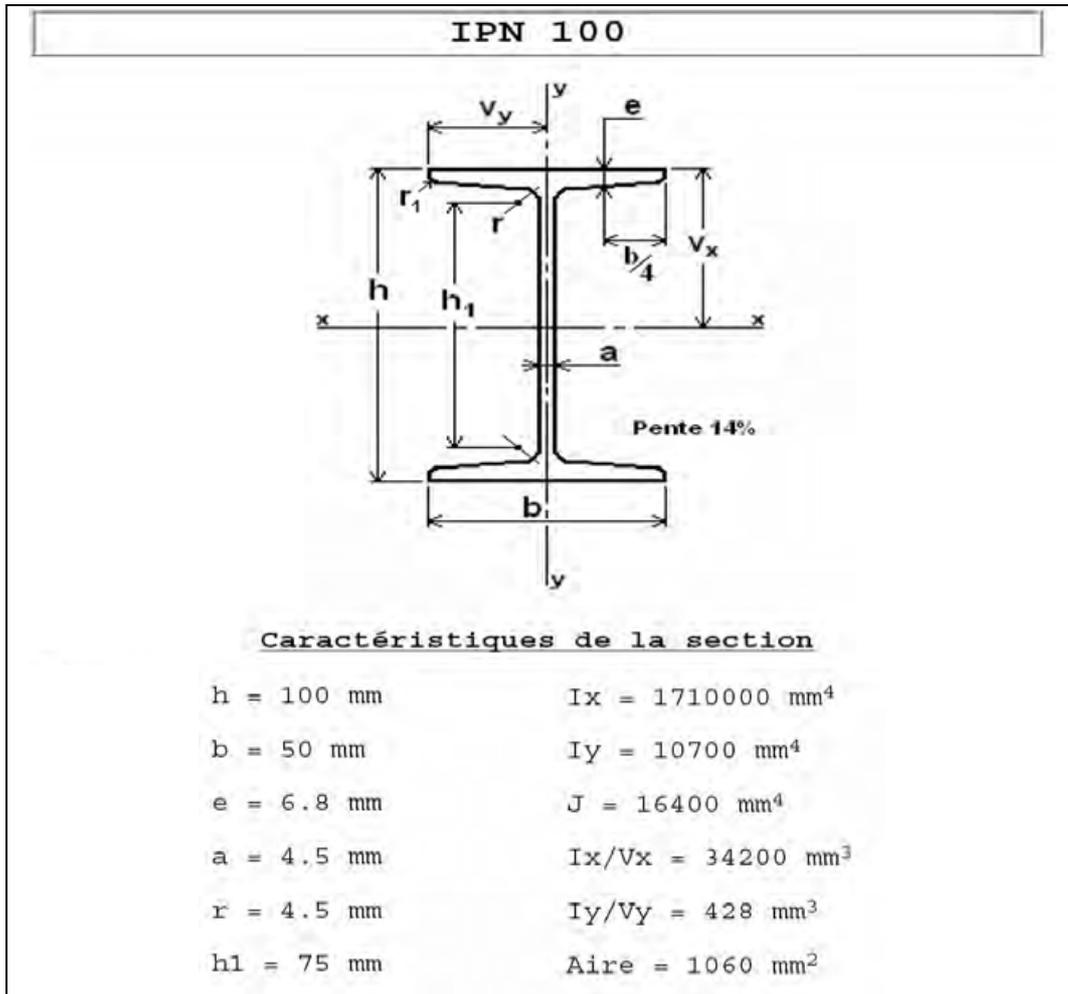
**Figure A.5-** Instrumentation de l'éprouvette prismatique de mortier MA de dimensions 40×40×160 mm pour la mesure des déformations

En observant la figure A.6, on remarque ainsi que les courbes de déformations mesurées présentent les mêmes amplitudes et les mêmes cinétiques.



**Figure A.6-** Evolution des déformations à partir de 20 jours de séchages en ambiance variable pour le mortier MA

**ANNEXE- B : Caractéristiques du support IPN et de la grille**



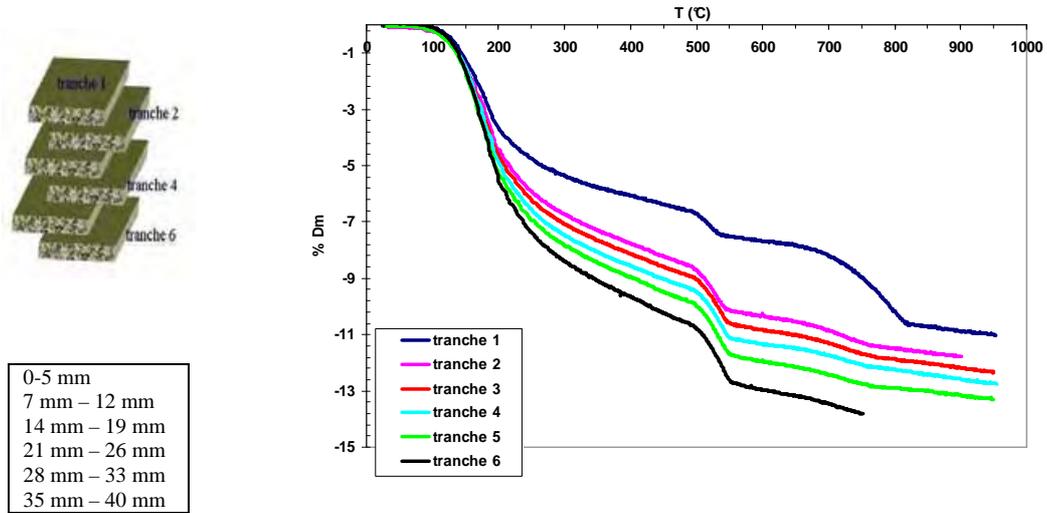
Epaisseur : 1.5 mm

Diamètre trou : 6 mm

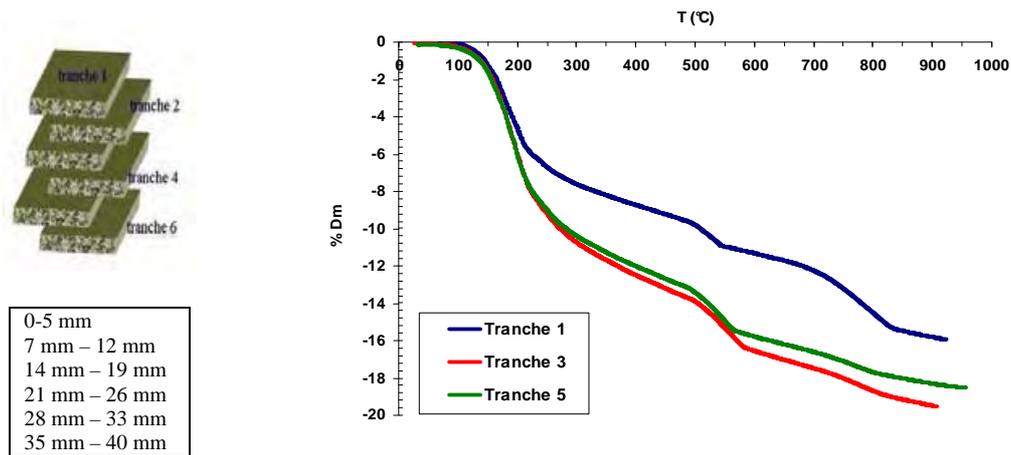
Poids : 6.1 kg/m<sup>2</sup>

**Caractéristiques de la grille métallique**

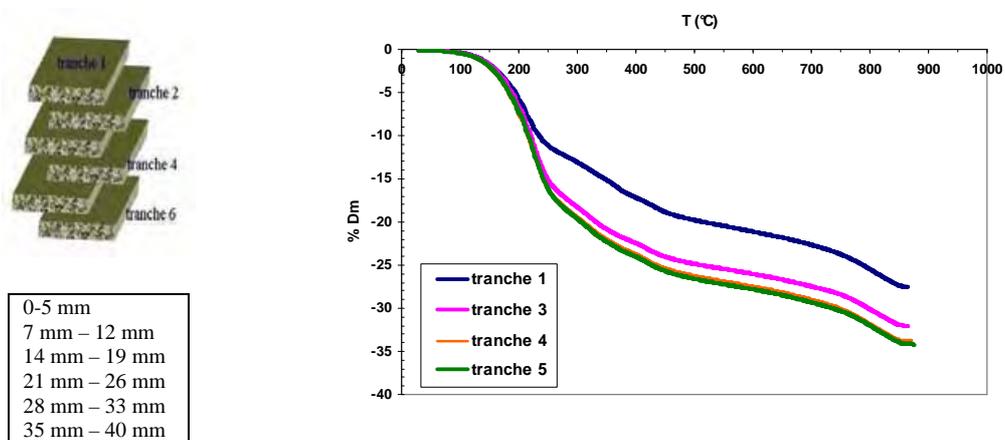
**ANNEXE- C : Analyse ATG sur l'épaisseur de la couche de mortier**



**Figure C.1 - Analyse ATG sur tranches de mortier MA à 28 jours**



**Figure C.2 - Analyse ATG sur tranches de mortier MB à 28 jours**



**Figure C.3 - Analyse ATG sur tranches de mortier WA à 28 jours**

## ANNEXE- D : Variations dimensionnelles sur mortier Weber

Tableau V.1 - Composition (%) des mortiers Weber

	<b>Liant ternaire</b>	<b>Filler + Sable siliceux (0.08-3mm)</b>	<b>Adjuvants</b>	<b>Polymère</b>
	(Ciment Portland + Ciment Alumineux + gypse)			
<b>WC</b>	36,3	49	12,7	2
<b>WD</b>	34,7	47	12,3	6

**Eau de gâchage : 20% de la masse des constituants secs**

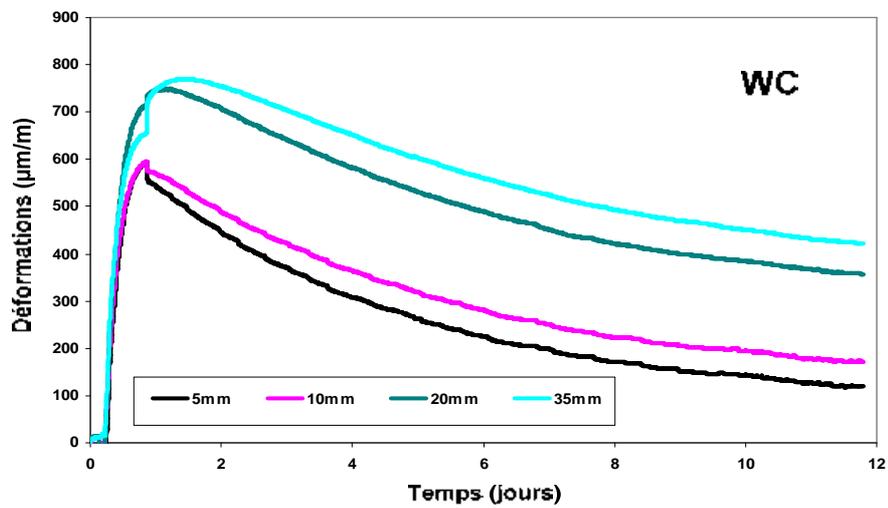


Figure D.1 - Evolution des déformations dans la couche de mortier WC (2% de polymère) en présence d'un support non adhérent

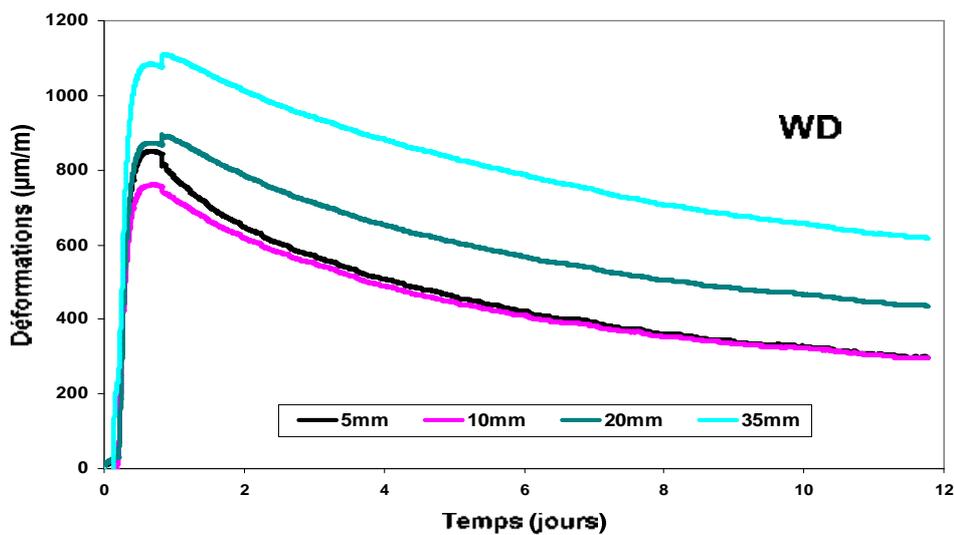


Figure D.2 - Evolution des déformations dans la couche de mortier WD (6% de polymère) en présence d'un support non adhérent

## ANNEXE- E : Evolution des gradients de température

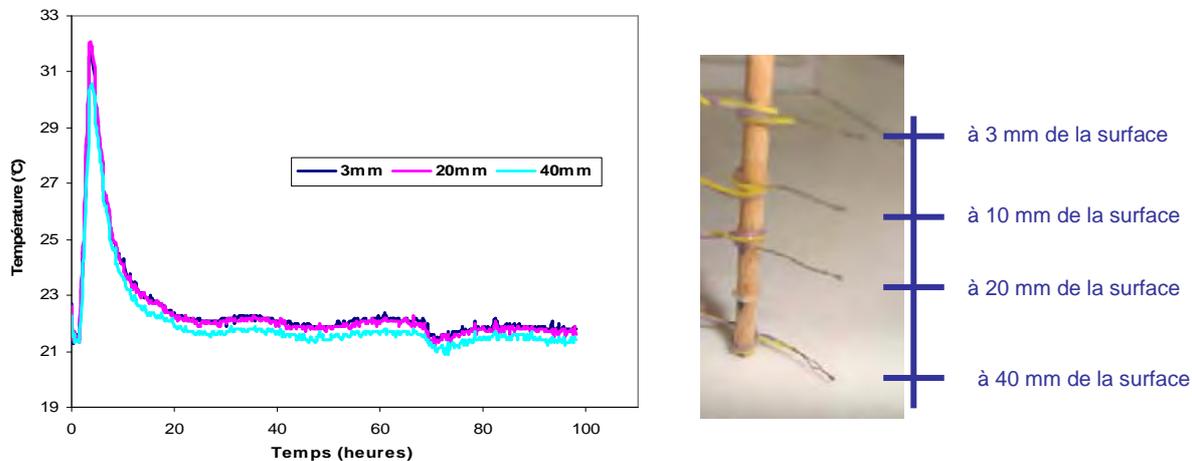


Figure E.1- Echauffement sur la couche de mortier WA

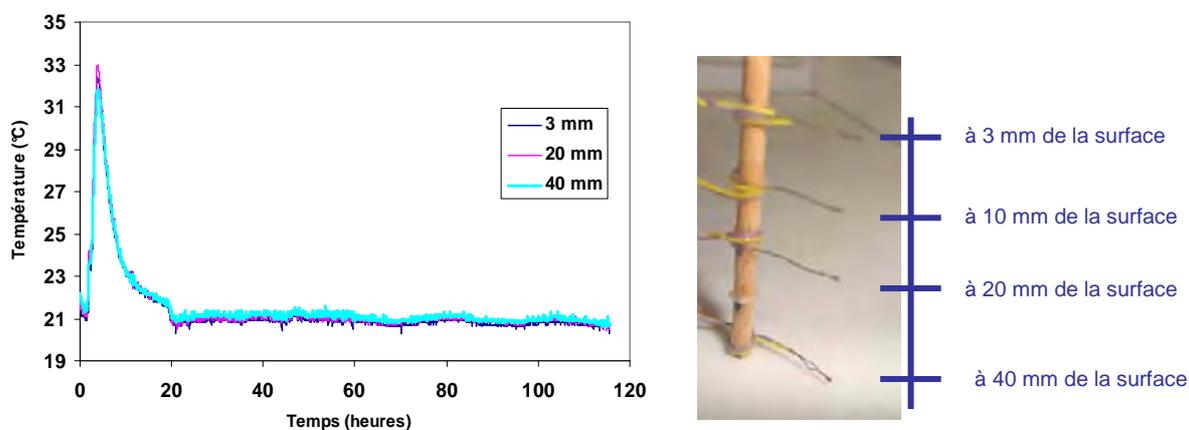


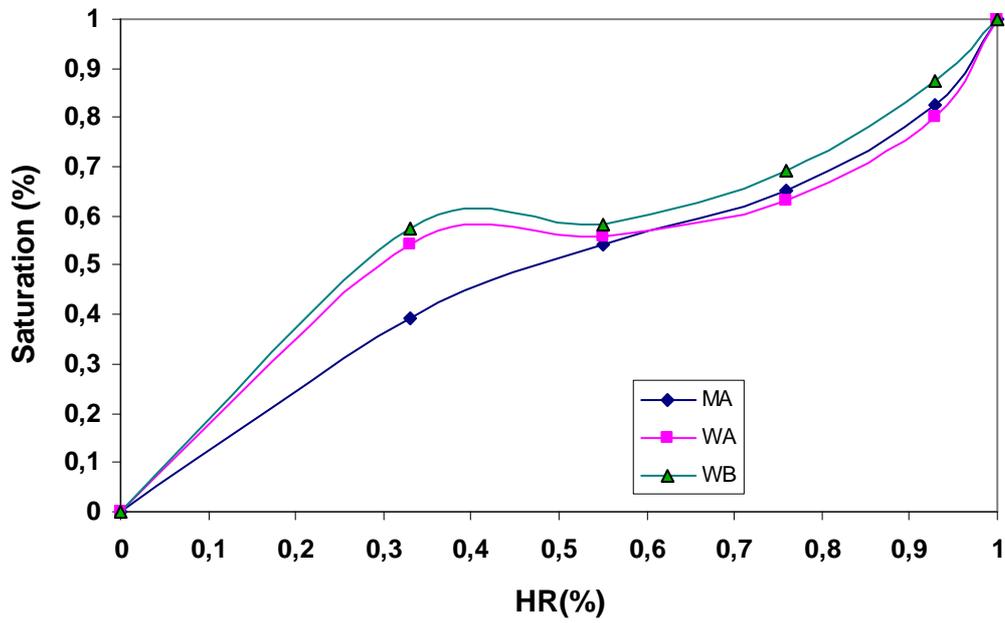
Figure E.2 - Echauffement sur la couche de mortier WB

On n'observe pas de gradients thermiques significatifs entre la surface de séchage et le cœur du matériau pour les mortiers WA et WB.

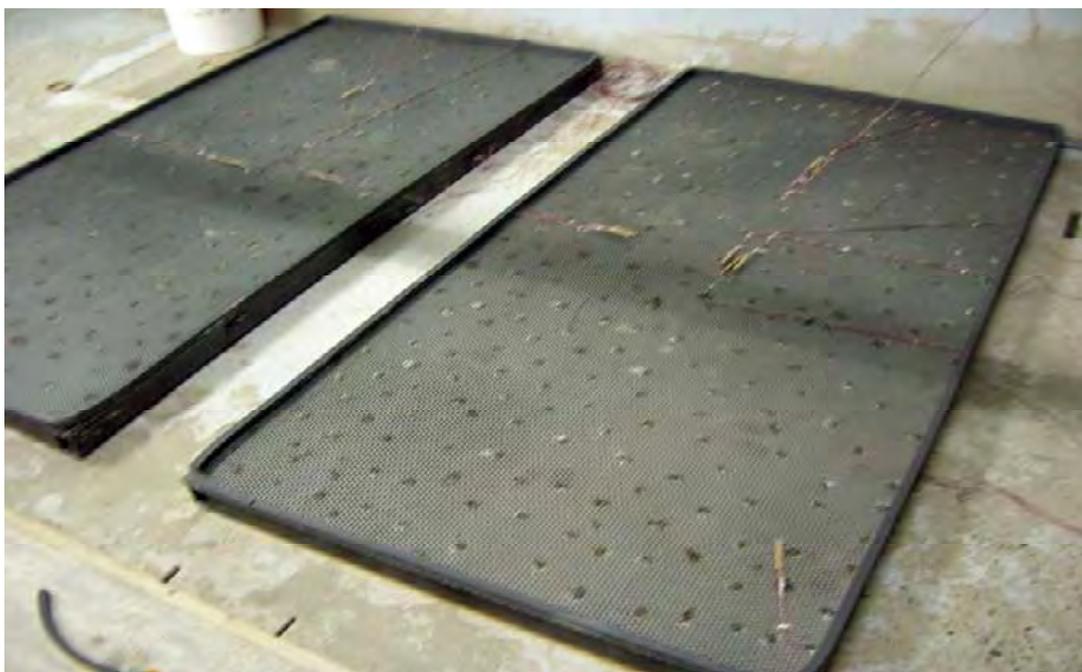
**ANNEXE- F : Courbes d'isothermes de désorption**



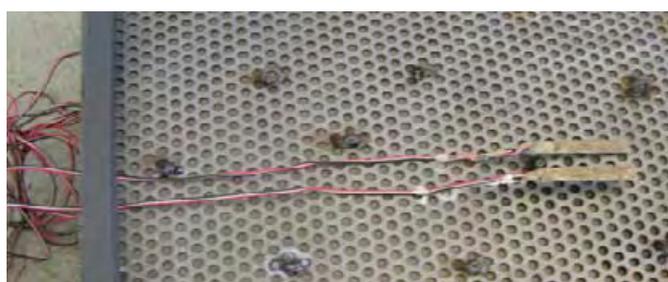
Cellules à Humidité relative contrôlée



**ANNEXE- G : Instrumentation de la plaque**



**Instrumentation par des jauges**



# **TABLE DES ILLUSTRATIONS**



Figure 1 – Structures de couches minces de mortier généralement rencontrées .....	10
Figure 2 – Fissuration observée sur des structures d’enduits .....	11
Figure 3 - Modèle d’interface dans un système substrat-matériau de réparation .....	12
Figure 4 - Modélisation des variations dimensionnelles libres .....	12
Figure I.1- Courbe calorimétrique de l’hydratation d’une pâte de ciment Portland.....	18
Figure I.2- Développement des hydrates dans la pâte de ciment .....	21
Figure I.3 - Courbe d’échauffement d’un béton de ciment alumineux dans le temps.....	25
Figure I.4 - Développement des résistances dans un échantillon de pâte de ciment alumineux préparée avec un rapport E/C = 0,4.....	26
Figure I.5 - Evolution de la chaleur d’hydratation des pâtes à base binaire (OPC/CAC) contenant différentes proportions de ciments alumineux (HAC) .....	28
Figure I.6 - Dilatation d’un échantillon de pâte (à base ternaire).....	28
Figure I.8 - Formule semi-développée d’un motif de MHPC .....	32
Figure I.9 - Formule semi-développée d’un motif de MHEC .....	32
Figure I.10 - Images in situ en ESEM d’un éther de cellulose gonflant en présence d’eau .....	33
Figure I.11 - Influence de la concentration en polymère sur la viscosité apparente du mélange aqueux .....	34
Figure I.12 - Modèle du réseau poreux dans un mortier contenant un éther de cellulose .....	35
Figure I.13 - Distribution porosimétrique de la pâte de ciment en fonction de la teneur en HEC .....	36
Figure I.14 - Principe de stabilisation d’un latex. Cas de l’éthylène acétate de vinyle d’après Bonin..	37
Figure I.15 - Modèle d’interactions entre la matrice cimentaire et un latex lors de l’hydratation du ciment d’un mortier modifié à base de latex .....	38
Figure I.16 - Résistance en flexion et en compression de mortiers modifiés latex .....	40
Figure I.17 - Distribution porosimétrique d’un mortier en présence ou non de latex SBR.....	41
Figure I.18 - Influence des pourcentages en polymère SBR et de sable sur la résistance à la fissuration des mortiers .....	42
Figure I.19 - Représentation schématique des mécanismes de transport de l’eau au sein de la pâte de ciment.....	43
Figure I.20 - Distribution de la teneur en eau dans l’éprouvette à différents âges .....	44
Figure I.21 - Dispositif de mesure de l’humidité relative à différentes profondeurs dans le volume du matériau et évolution des profils d’humidité à différents âges .....	44
Figure I.22 - Microfissures induites par la dessiccation observée au microscope (MEB) .....	45
Figure I.23 - Influence du séchage sur la résistance en compression d’un mortier.....	46
Figure I.24 - Influence du séchage sur le module d’Young d’un mortier .....	47
Figure I.25 - Dessiccation du mortier au contact de divers supports .....	48
Figure I.26 - Présentation des volumes apparent et absolu .....	50
Figure I.27 - Schématisation des mécanismes du retrait plastique d’une pâte de ciment] .....	52

Figure I.28 - Schéma simplifié du ménisque et de couche d'eau adsorbée dans un pore capillaire.....	55
Figure I.29 - Schématisation du phénomène de fluage .....	55
Figure I.30 - Schématisation du phénomène de relaxation des contraintes.....	56
Figure I.31 - Mécanisme de fluage (a) à court terme et (b) à long terme.....	57
Figure I.32 - Banc de mesure des variations volumiques par pesée hydrostatique .....	58
Figure I.33 - Déformations mesurées en conditions endogènes d'une pâte de ciment contenant un entraîneur d'air .....	58
Figure I.35 - Dispositif expérimental pour la mesure des variations dimensionnelles endogènes.....	60
Figure I.36 - Dispositif expérimental .....	61
Figure I.37 - Dispositif de mesure du retrait empêché sur plaques .....	62
Figure I.38 - Dispositif de mesure du retrait .....	63
Figure I.39 - Dispositif de mesure du retrait empêché .....	63
Figure I.40 - Dispositif de retrait empêché.....	64
Figure I.41 - Dispositif longitudinal basé sur le modèle de Lejeune.....	64
Figure I.42 - Dispositif longitudinal développé par Banthia pour le suivi de la fissuration due au retrait empêché.....	65
Figure I.43 - (a) Représentation schématique de l'essai empêché à l'anneau (b) représentation de la fissuration radiale .....	65
Figure II.1- Résistances en flexion des différents mortiers.....	72
Figure II.2- Résistances en compression des différents mortiers .....	73
Figure II.3- a) Configuration de l'essai de traction directe_b) mode de rupture d'une éprouvette .....	74
Figure II.4- Courbes expérimentales $\sigma - \epsilon$ pour le mortier WA .....	74
Figure II.5 - Courbes $\sigma - \epsilon$ pour le mortier MA : déduction du module d'Young en traction.....	75
Figure II.6 - Courbes $\sigma - \epsilon$ pour le mortier WA : déduction du module d'Young en traction.....	76
Figure II.7 - Principe de l'essai de flexion 3 points sur éprouvette de mortier .....	77
Figure II.8 - Courbes expérimentales Force – $\delta$ pour les mortiers MA et MB.....	78
Figure II.9 - Courbes expérimentales Force – $\delta$ pour les mortiers WA et WB .....	78
Figure II.10 - Evolution du retrait endogène des différents mortiers .....	79
Figure II.11 - (a) Principe de mesure du retrait au retractomètre .....	80
(b) mode de conservation en conditions endogènes et de séchage des éprouvettes de mortier.....	80
Figure II.12 - Evolution de la perte de masse des différents mélanges .....	80
Figure II.13 - Evolution du retrait total des différents mélanges.....	81
Figure II.14 - Evolution du retrait de séchage des différents mélanges .....	82
Figure II.15 - Principe de mesure des variations dimensionnelles avec des jauges noyées .....	83
Figure II.16 - Evolution de la perte en eau due au séchage pour les 4 mélanges .....	83

Figure II.17 - Conditions d'échanges hydriques entre le matériau et le milieu extérieur .....	84
Figure II.18 - Evolution des variations dimensionnelles pour les mortiers MA et MB .....	85
Figure II.19 - Evolution des variations dimensionnelles pour les mortiers WA et WB .....	86
Figure II.20 - Conductivité des suspensions de liants des différents mélanges.....	87
Figure II.21- Courbes d'échauffement thermique mesuré sur les quatre mélanges .....	88
Figure II.22 - Principe d'échantillonnage des tranches de mortier.....	89
Figure II.23 - Détails du test et principe de la mesure des déformations dans la couche de mortier ...	92
Figure II.24 - Analyse thermogravimétrique effectuée sur du polymère .....	93
Figure II.25 - Distribution poreuse des mortiers âgés de 28 jours .....	96
Figure II.26 - Evolution des variations dimensionnelles sur l'épaisseur de la couche de mortier MA.	98
Figure II.27 - Evolution des variations dimensionnelles sur l'épaisseur de la couche de mortier MB .	98
Figure II.28 - Evolution des variations dimensionnelles sur l'épaisseur de la couche de mortier WA.	99
Figure II.29 - Evolution des variations dimensionnelles sur l'épaisseur de la couche de mortier WB .	99
Figure II.30 - Evolution des profils de teneur en eau évaporable sur la couche de mortier .....	100
Figure II.31 - Evolution des profils d'hydratation en eau liée sur la couche de mortier .....	101
Figure II.32 - Profils de porosité à 28 jours sur la couche de mortier .....	102
Figure II.33 - Profils des déformations à 3 et 7 jours sur la couche de mortier .....	102
Figure II.34 - Aperçu du système support – grille utilisé.....	104
Figure II.35 - Evolution des déformations au voisinage de l'interface et sur le support pour le mortier WB .....	105
Figure II.36 - Courbes expérimentales de l'essai de traction directe au niveau de l'interface.....	105
Figure II.36 - Détails et géométrie de la maquette instrumentée.....	106
Figure II.37 - Aperçu des maquettes (1D) utilisées.....	107
Figure II.38 - Evolution des déformations sur maquette de mortier MA (éprouvette n° 2 .....	109
Figure II.39 - Evolution des déformations sur maquette de mortier MA (éprouvette n° 3).....	109
Figure II.40 - (a) Fissures observées (b) Représentation de la distribution et des échéances de fissuration pour le mortier MA.....	110
Figure II.41 - Evolution des déformations du mortier MB (éprouvette n°1).....	111
Figure II.42 - Evolution des déformations du mortier MB (éprouvette n°2).....	111
Figure II.43 - Représentation de la distribution des fissures et des échéances de fissuration pour le mortier MB.....	112
Figure II.44 - Evolution des déformations du mortier WA en présence d'un support adhérent .....	113
Figure II.45 - Evolution des déformations du mortier WB en présence d'un support adhérent.....	113
Figure II.46 - Evolution des profils de déformations au jeune âge dans la couche de mortier .....	114
Figure II.47 - Définition du gradient dans la couche de mortier .....	115
Figure II.48 - Evolution des gradients de déformations pour les formules MA et MB .....	115
Figure II.49 - Evolution des gradients de déformations pour les formules WA et WB .....	115

Figure II.50 - Aperçu des maquettes et des prismes pour le suivi des déformations, de la fissuration et de la perte de masse.....	118
Figure II.51 - Aperçu et instrumentation de la maquette 2D.....	119
Figure II.52 - Suivi des déformations et de la fissuration sur maquette (1D) pour le mortier MA .....	120
Figure II.53 - Suivi des déformations et de la fissuration sur plaque pour le mortier MA.....	121
Figure II.54 - Suivi des déformations et de la fissuration sur maquette (1D) pour le mortier MB .....	122
Figure II.55 - Suivi des déformations et de la fissuration sur plaque pour le mortier MB.....	123
Figure II.56 - Suivi des déformations et de la fissuration sur maquette (1D) pour le mortier WA.....	124
Figure II.57 - Suivi des déformations et de la fissuration sur plaque pour le mortier WA .....	125
Figure II.58 - Suivi des déformations et de la fissuration sur maquettes 1D pour le mortier WB .....	126
Figure II.59 - Suivi des déformations et de la fissuration sur plaque pour le mortier WA .....	126
Figure II.60 - Relevés de températures et d'hygrométrie en environnement contrôlé .....	127
Figure II.61 - Evolution des déformations dans la couche de mortier MA : .....	128
Cas 1 : environnement contrôlé      Cas 2 : environnement ventilé .....	128
Figure II.62 - Evolution des déformations dans la couche de mortier MB : .....	129
Cas 1 : environnement contrôlé      Cas 2 : environnement ventilé .....	129
Figure II.63 - Evolution des déformations dans la couche de mortier WA : .....	130
Cas 1 : environnement contrôlé      Cas 2 : environnement ventilé .....	130
Figure II.64 - Influence des variations d'hygrométrie sur l'évolution des déformations en présence d'un support adhérent et sur la fissuration pour le mortier MA .....	132
Figure II.65 - Influence des variations d'hygrométrie sur l'évolution des déformations en présence d'un support adhérent et sur la fissuration pour le mortier MB .....	133
Figure II.66 - Influence des variations d'hygrométrie sur l'évolution des déformations en présence d'un support adhérent et sur la fissuration pour le mortier WA.....	134
Figure III.1 - Conditions d'échanges hydriques entre le matériau et le milieu extérieur .....	142
Figure III.2 - Simulation de la perte de masse relative sur éprouvette 40×40×160 mm pour le mortier MA .....	143
Figure III.3 - Simulation de la perte de masse relative sur éprouvette 40×40×160 mm pour les 4 formulations.....	144
Figure III.4 - Evolution du coefficient de diffusion hydrique en fonction de l'humidité relative du matériau .....	144
Figure III.5 - Influence du paramètre A sur la cinétique de séchage : cas du mortier MA .....	145
Figure III.6 - Représentation du maillage plan d'une demi éprouvette et du champ des teneurs en eau libre : cas du mortier MA .....	146
Figure III.7 - Profils de teneur en eau libre sur l'épaisseur de la couche de mortier MA .....	147
Figure III.8 - Profils de teneur en eau libre sur l'épaisseur de la couche de mortier MB.....	147
Figure III.9 - Profils de teneur en eau libre sur l'épaisseur de la couche de mortier WA.....	147

---

Figure III.10 - Profils de teneur en eau libre sur l'épaisseur de la couche de mortier WB .....	148
Figure III.11- Détermination du coefficient de contraction hydrique p pour le mortier MA .....	149
Figure III.12 - Détermination du coefficient de contraction hydrique p pour le mortier MB .....	150
Figure III.13 - Détermination du coefficient de contraction hydrique p pour le mortier WA.....	150
Figure III.14 - Détermination du coefficient de contraction hydrique p pour le mortier WB .....	150
Figure III.15 - Principe de mesure des variations dimensionnelles avec des jauges noyées.....	151
Figure III.16 - Simulation du retrait de séchage sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas des mortiers MA et MB.....	152
Figure III.17 - Simulation du retrait de séchage sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas des mortiers WA et WB .....	152
Figure III.18 - Détermination des coefficients K et q dus au retrait pour le mortier MA .....	154
Figure III.19 - Simulation des retraits de séchage et total sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas de mortiers MA.....	155
Figure III.20 - Simulation des retraits de séchage et total sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas de mortiers MB .....	156
Figure III.21 - Simulation du retrait total sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas de mortiers WA.....	157
Figure III.22 - Simulation du retrait total sur des prismes de 40×40×160 mm avec échanges hydriques sur la face supérieure : cas de mortiers WB .....	157
Figure III.23 - Maillage de la demi - éprouvette .....	158
Figure III.24 - Evolution du champ de contraintes $\sigma_{xx}$ dans la couche de mortier MA .....	159
Figure III.25 - Evolution des profils des déformations simulées dans la couche de mortier MA : comparaison avec les résultats expérimentaux.....	159
Figure III.26 - Evolution des profils des déformations simulées dans la couche de mortier MB : comparaison avec les résultats expérimentaux.....	160
Figure III.27 - Evolution des profils des déformations simulées dans la couche de mortier WA: comparaison avec les résultats expérimentaux.....	160
Figure III.28 - Evolution des profils des déformations simulées dans la couche de mortier WB: comparaison avec les résultats expérimentaux.....	160
Figure III.29 - Modèle physique de fluage en traction proposé par Yuan et al. [Yuan 2003].....	161
Figure III.30 - Simulation du fluage de traction total sur mortier ; les mesures tirées des travaux de Yuan et al. [Yuan 2003] .....	163
Figure III.31- Principe de mesure de la force en fonction de l'ouverture de fissure.....	167
Figure III.32 - Courbes Force -CMOD sur éprouvette 40×40×160 mm entaillée : mortier MA et MB .....	167
Figure III.33 - Courbes Force -CMOD sur éprouvette 40×40×160 mm entaillée : mortier WA .....	168
Figure III.34 - Schématisation de la section équivalente.....	168

---

Figure III.35 - Simulation du test de flexion sur support: .....	169
Cas 1 : IPN                      Cas 2 : IPN + Grille .....	169
Figure III.36 - Schéma du maillage de la maquette mortier-support.....	170
Figure III.37 - Evolution de la déformée de la structure à 1 et 12 jours de séchage .....	171
Figure III.38 - Evolution du champ de contraintes $\sigma_{xx}$ (MPa) dans la structure mixte : mortier MA	172
Figure III.39 - Evolution du champ de contraintes $\sigma_{zz}$ (MPa) dans la structure : mortier MA .....	173
Figure III.40 - Evolution du champ d'endommagement dans la couche de mortier MA et fissuration .....	175
Figure III.41 - Evolution du champ de contraintes $\sigma_{xx}$ (MPa) dans la structure : mortier WA .....	176
Figure III.42 - Evolution du champ de contraintes $\sigma_{zz}$ (MPa) dans la structure : mortier WA.....	177
Figure III.43 - Evolution du champ de contraintes $\sigma_{xx}$ (MPa) dans la structure : mortier MB.....	179
Figure III.44 - Evolution du champ de contraintes $\sigma_{zz}$ (MPa) dans la structure : mortier MB .....	181
Figure III.45 - Evolution du champ d'endommagement dans la couche de mortier MB.....	182
Figure III.46 - Influence de l'épaisseur de la couche de mortier sur l'évolution des déformations $\epsilon_{xx}$ : mortier MA.....	183
Figure III.47 - Champ d'endommagement dans la couche de mortier MA à 50 jours de séchage : influence de l'épaisseur du mortier .....	184
Figure III.48 - Influence de l'amplitude de séchage sur la fissuration : simulation de l'évolution des déformations $\epsilon_{xx}$ .....	185
Figure III.49 - Variation d'hygrométrie considérée pour la simulation : mortier MA .....	185
Figure III.50 - Influence de l'hygrométrie sur la fissuration du mortier .....	186
Figure IV.1 - Principe de mise en oeuvre d'une longueur décollée de 2 cm.....	188
Figure IV.2 - Test de fissurabilité, schéma du montage expérimental et instrumentation .....	189
Figure IV.3 - Courbes déplacements - temps et force - flèche à 7 jours pour le mortier WB : mesures effectuées sur 2 éprouvettes issues d'une même gâchées.....	190
Figure IV.5 - Modélisation du test de fissurabilité.....	191
Figure IV.6 - Courbes force – flèche modélisées pour le mortier WB.....	192
Figure IV.7 - Champs des déformations et d'endommagement au niveau de la couche de mortier ...	193
Figure IV.8 - Modélisation du test de fissurabilité : mortier WB.....	194
Figure IV.9 - Influence du taux de polymère sur la susceptibilité à fissurer du mortier Weber .....	195
Figure IV.10 - Influence de l'épaisseur de la couche de mortier sur la susceptibilité à fissuration ....	196

---

Tableau I.1 - Notations cimentières des principaux constituants du ciment Portland	15
Tableau I.2 - Chaleurs d'hydratation des phases minérales du clinker	20
Tableau I.3 - Classification des pores dans une pâte de ciment hydratée	23
Tableau I.4 - Type d'hydrates formés entres 1 jour et 5 mois	25
Tableau I.5- Résistance en compression des pâtes à base binaire	27
Tableau II.1 - Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé	69
Tableau II.2 - Composition des mortiers MA et MB	69
Tableau II.3 - Composition (% massique) des mortiers WA et WB	70
Tableau II.4 - Caractéristiques physiques des mortiers	71
Tableau II.5 - Résistances mécaniques moyennes des matériaux	72
Tableau II.6 - Résistances et module d'Young en traction des matériaux	76
Tableau II.7 - Caractérisation des gradients de propriétés au moyen de la méthode des tranches	90
Tableau II.8 - Pertes de masse mesurées sur des tranches de mortier MA à 7 jours	93
Tableau II.9 - Pertes de masse mesurées sur des tranches de mortier WA à 7 jours	93
Tableau II.10 - Pertes de masse mesurées sur des tranches de mortier MB à 7 jours	94
Tableau II.11 - Pertes de masse mesurées sur des tranches de mortier WB à 7 jours	94
Tableau II.12 - Résultats des tests de porosimétrie pour le mortier MA	95
Tableau II.13 - Résultats des tests de porosimétrie pour le mortier MB	95
Tableau II.14 - Résultats des tests de porosimétrie pour le mortier WA	95
Tableau II.15 - Résultats des tests de porosimétrie pour le mortier WB	95
Tableau II.16 - Résistances en traction moyennes de l'interface à 7jours	106
Tableau II.17 - Récapitulatif sur l'étude de la fissuration pour les mortiers MA, MB et WA	131
Tableau III.1 - Paramètres d'entrée pour le modèle de séchage pour les différents mélanges	143
Tableau III.2 - Paramètre de la loi de séchage pour les 4 mortiers	143
Tableau III.3 - Paramètres d'entée pour le modèle de séchage	146
Tableau III.4 - Paramètres d'entée pour la simulation du retrait de séchage	152
Tableau III.5 - Paramètre d'autodessiccation pour les mortiers MA et MB	155
Tableau III.6 - Paramètres d'entrée pour la simulation des déformations	158
Tableau III.7 - Paramètres de fluage identifiés à partir des résultats expérimentaux	167
Tableau III.8 - Identification des paramètres pour l'endommagement	170
Tableau III.9 - Paramètres mécaniques et rhéologiques pour la simulation des variations dimensionnelles en présence d'un support adhérent	170
Tableau III.10 - Paramètres de séchage pour la simulation des variations dimensionnelles : cas du mortier MB	178
Tableau IV.1 - Composition (%) des mortiers Weber	194
Tableau IV.2 - Influence du polymère sur la susceptibilité à fissurer des différents mortiers	195

**AUTHOR :** AMBA Jean Chills

**TITLE :** Characterization of the property gradients in the layer of mortar and influence on cracking : Experiments and modeling.

---

**ABSTRACT:** This work describes the phenomena that govern the behaviour of cement-based materials used as a thin bonded overlay. The work is mainly focused on cement-based industrial mortars, and on the property gradients linked to drying phenomenon (hydric, hydration, porosity and strain gradients). This work presents some experimental techniques developed to assess the sensitivity of cracking induced by these property gradients. In this context, several tests are used for the purpose of predicting the differential behaviour of material subjected to drying. For all the properties, the behaviour of the material differs significantly according to depth, particularly close to the drying face for both laboratory samples and large plates of mortar. The study shows the influence of parameters such as the mortar composition, the mortar thickness and the environmental factors on the cracking sensitivity of the material.

In the numerical investigation, a finite element method is used to simulate the overlay behavior in drying conditions. This simulation allows taking into account the coupling between thermal, hydrous and mechanical effects in a context of non linear mechanics. By this model, a parametric study allows analysing the effect of both environmental conditions and thickness of the mortar layer upon the cracking time.

Finally, an experimental device is proposed to assess the sensitivity of cracking of mortars layer applied on a substrate. This device was developed for industrial applications.

---

**KEY WORDS :** Mortar; drying; mechanical behavior; property gradients; stresses; restrained shrinkage; cracking; modeling; hydric transfers; damage.

**AUTEUR :** AMBA Jean Chills

**TITRE :** Caractérisation des gradients de propriétés d'une couche de mortier et influence sur la fissuration : Expérimentation et Modélisation

**DIRECTEURS DE THESE :** Charles-Henri DETRICHE et Jean-Paul BALAYSSAC

**LIEU ET DATE DE SOUTENANCE :** Toulouse le 21 Novembre 2008

---

**RESUME :** Ce travail décrit l'ensemble des phénomènes qui gouvernent le comportement sur site des couches d'enduit au regard de la fissuration. On se focalise notamment sur l'analyse de l'impact de ces gradients de propriétés sur la susceptibilité à la fissuration de la couche de mortier. L'étude permet de mettre en évidence l'influence de facteurs tels que la formulation du mortier, l'épaisseur d'application de la couche de mortier ainsi que les conditions de conservation sur la susceptibilité à la fissuration du matériau.

Une modélisation numérique par éléments finis est abordée par le biais d'un modèle multi-physique permettant de traiter les couplages Thermo Hydro Mécanique dans un contexte de mécanique non linéaire. Enfin, un outil d'aide pour l'évaluation du risque de fissuration des matériaux formulés est proposé en vue d'une exploitation industrielle.

---

**MOTS CLES :** Mortier ; séchage ; comportement mécanique ; gradients de propriétés ; contraintes ; retrait empêché ; fissuration ; modélisation ; transferts hydriques ; endommagement.

---

**DISCIPLINE ADMINISTRATIVE :** Génie civil

---

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions LMDC

135 avenue de Rangueil

31077 TOULOUSE CEDEX 4