HAL
open science

Influence du vent et de la cure sur le comportement des bétons au très jeune âge

Elanga-Poaty Mbemba-Kiele

To cite this version:

Elanga-Poaty Mbemba-Kiele. Influence du vent et de la cure sur le comportement des bétons au très jeune âge. Matériaux. Université de Nantes; Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2010. Français. NNT : . tel-00726153

HAL Id: tel-00726153

https://theses.hal.science/tel-00726153v1

Submitted on 29 Aug 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole Centrale de Nantes **Université de Nantes**

Ecole Doctorale

Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture

Année 2010 N°B.U. :

Thèse de Doctorat

Diplôme délivré conjointement
par l'Ecole Centrale de Nantes et l'université de Nantes

Spécialité : Génie Civil

Présentée et soutenue publiquement par :

Elanga-Poaty MBEMBA-KIELE

Le 13 décembre 2010 à l'École des Mines d'Alès

Titre

Influence du vent et de la cure sur le comportement des bétons au très jeune âge

Jury

Président :	M. Karim AÏT-MOKHTAR	Professeur, Université de La Rochelle
Rapporteurs :	M. Jean-Michel TORRENTI	Directeur de Recherche, LCPC
	M. Sofiane AMZIANE	Professeur, Université de Clermont- Ferrand
Examinateurs :	M. Ahmed LOUKILI	Professeur, Ecole Centrale de Nantes
	M. Philippe DEVILLERS	Maître assistant, Ecole des Mines d'Alès
	M. Eric GARCIA-DIAZ	Professeur, Ecole des Mines d'Alès
Invité	M. Lionel LINGER	Ingénieur, Vinci Construction Grands Projets

---

Directeur de thèse : Ahmed LOUKILI
Laboratoire : Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, Nantes
Co-encadrants : Philippe DEVILLERS et Pierre ADAMIEC
Laboratoire : Centre des Matériaux de Grande Diffusion de l'Ecole des Mines d'Alès N° ED : 498

REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené au sein du pôle « Matériaux et Structure du Génie Civil » du Centre des Matériaux de Grande Diffusion de l'Ecole des Mines d'Alès, sous la direction scientifique de Monsieur E. GARCIA-DIAZ. Je dois l'en remercier et je voudrais lui dire combien m'ont été agréables ses réflexions scientifiques au cours de ce travail. Je n'oublie pas non plus Monsieur José-Marie LOPEZ-CUESTA, directeur du Centre de Matériaux de Grande Diffusion, Monsieur Yannick VIMONT, directeur de la Recherche de l'Ecole des Mines d'Alès, et Monsieur Alain DORISON, directeur de l'Ecole des Mines d'Alès, pour m'avoir accueillie au Centre des Matériaux de Grande Diffusion. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Mes remerciements vont également à Monsieur Ahmed LOUKILI, professeur de Génie Civil à l'Ecole Centrale de Nantes, pour la confiance qu'il m'a accordée en m'accueillent dans cet établissement et sans qui cette thèse n'aurait pas vu le jour. Je lui adresse toute ma reconnaissance pour ses nombreux conseils qui, à des moments de doute, ont contribué à donner une orientation définitive à ce travail.

Je sais gré à messieurs Sofiane AMZIANE, professeur de Génie Civil à l'Université de Clermont Ferrand et Jean-Michel TORRENTI, directeur de recherche, du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'en être les rapporteurs.

J'ai une pensée particulière pour Monsieur Jean-Michel TORRENTI pour la volonté permanente de coopération dont il a fait preuve durant toute la durée de ce travail.

Je remercie vivement Monsieur Karim AÏT-MOKHTAR, professeur de Génie Civil à l'Université de la Rochelle, de m'avoir fait l'honneur d'être le président de mon jury.

Je remercie également Monsieur Lionel LINGER, expert béton de VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS, d'avoir accepté de juger ce travail et de faire partie du jury. Je lui adresse particulièrement un grand merci, pour les précieux conseils et encouragements, qui ont permis d'amener à bien cette thèse. A eux, j'associe les autres membres de mon comité de pilotage, Messieurs, François CUSSIGH, ingénieur VINCI CONSTRUCTION, Fabien BARBERON, ingénieur BOUYGUES-CONSTRUCTION et Wilfrid PILLARD, directeur technique de l'Union Nationale de la Maçonnerie et du Gros Oeuvre, pour leur aide efficace tout au long de la rédaction de cette thèse.

Toute ma gratitude va à messieurs Adamah MESSAN, docteur en Génie Civil, diplômé de l'Université de Montpellier II, Pierre ADAMIEC, maître assistant à la retraite, de l'Ecole des Mines d'Alès, et Philippe DEVILLERS maître assistant de l'Ecole des Mines d'Alès, Emmanuel ROZIERE, maître de conférence à l'Ecole Centrale de Nantes, qui ont été les principaux artisans de cette thèse. Leurs aides et conseils précieux ont accru mon envie d'approfondir l'étude du comportement des matériaux cimentaires. Je n'oublie pas Monsieur Christian BUISSON Technicien au Centre des Matériaux de Grande Diffusion de l'Ecole des

Mines d'Alès, à qui je témoigne toute ma reconnaissance pour avoir contribué à la réussite de cette thèse, grâce notamment à la qualité de nombreuses discussions scientifiques, de culture générale et sa bonne humeur.

Par ailleurs, Je voudrais témoigner toute ma reconnaissance aux personnels du Centre qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réussite de cette thèse, soit dans la conception de mes moules (équipe conception mécanique du Centre des Matériaux de Grande Diffusion) soit dans les essais mécaniques et caractérisation physique et/ou traitement d'image (Alain DIAZ, Jean-Marie. TAULEMESSE, Patrick CROS, Sébastien. MOULIN), soit dans la documentation (Hélène ALEGRE DE LA SOUJEOLE, Françoise. ARMAND, Ghislaine TOURNIER). J'ai une pensée particulière aux secrétaires du Centre qui m'ont soutenu sur le plan administratif depuis le début jusqu'à l'achèvement de ma thèse (Sylvie CRUVELLIER, Michèle. BRUN, Danièle LARROZE).

Quand on rédige une thèse, on ne fait pas seulement « de la science », on a tout un nouveau monde à découvrir derrière soi et particulièrement les collègues de travail, d'une part et d'autre part, les amis et la famille, qui vous aident, d'une façon ou d'une autre, à faire de cette période une époque pleine de bons souvenirs. Alors :

Je n'oublie pas de remercier l'Association International des Mines d'Alès, "mes très chers collègues et amis thésards" du Centre (Ousseynou, Jean-Mario, Lucie, Siska, julien, Madhi, Madhia, Aurélia, …etc). Je ne peux les nommer tous, je souhaite qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance, particulièrement l'étudiant Mirko LANDMANN, qui a contribué à la confection de ce travail, ainsi que toutes les personnes qui m'ont fait le plaisir d'assister à la soutenance.

Un spécial merci à tous mes amis, Sandrine ELEMBO, Aurélie DEROOSE, Mélanie JULIEN, Olivier TITI-BIBALOUD, Fiyé DIARRA, Rostand NGAMENI, Mamy MOYEN, Marita DABOUT et beaucoup encore, qui ont toujours cru en moi et m'ont encouragée dans mon entreprise.

J'ai enfin une pensée profonde pour ma famille, spécialement, mon frère, mes sœurs, cousins et cousines, cousines et cousins germains, mes tantes, ma belle-sœur et ma très chère grand-mère, qui m'ont apporté soutien et assistance multiformes.

Je n'oublie pas Karell, pour sa présence, sa confiance sans cesse renouvelée et son soutien.

Enfin, je veux dédier ce mémoire aux deux êtres qui me sont les plus chers, à qui je dois tout ce que je suis, et dont le soutien multiforme et sans faille m'a toujours aidé à réussir dans la vie…

A mes parents

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION 1

1. ANALYSE DU COMPORTEMENT DES BETONS AU TRES JEUNE AGE 2
2. LES DIFFERENTS MECANISMES REGISSANT LE COMPORTEMENT DU BETON FRAIS .. 3
3. LA PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE 4
3.1. Domaine de l'étude 4
3.2. L'aspect du problème 4
4. LA DEMARCHE SUIVIE POUR L'ETUDE 5

CHAPITRE I : ORIGINE ET PRÉVENTION DES DÉFORMATIONS PLASTIQUES - BIBLIOGRAPHIE 7

I.1. LES SOURCES DES DEFORMATIONS PLASTIQUES DU BETON 8
I.1.1. Le séchage 8
I.1.1.1. Etats de l'eau dans un milieu poreux tel que le béton 9
I.1.1.2 Le transport de l'eau lors du séchage 12
I.1.1.3 La cinétique du séchage (cas du séchage convectif) 13
I.1.2. Les mécanismes à l'origine des déformations plastiques 17
I.1.2.1. La consolidation du matériau 17
I.1.2.2. Le ressuage 18
I.1.2.3. La dessiccation du matériau liée au phénomène d'évaporation 20
I.1.2.4. Le développement de la pression capillaire au très jeune âge 23
I.1.3. Les déformations plastiques de matériaux cimentaires 29
I.1.3.1. Evolution des déformations plastiques lors du séchage 29
I.1.3.2. Le retrait au très jeune âge (avant et/ou pendant la prise) : définition 30
I.1.3.3 La mesure des déformations plastiques 31
I.1.4. La relation entre le retrait plastique et la fissuration 36
I.1.5. Analogie du comportement des bétons avec celui des sols cohérents 38
I.2. LA CURE DU BETON : UNE PREVENTION CONTRE LA FISSURATION PRECOCE 42
I.2.1. Définition 42
I.2.2. Le rôle de la cure vis-à-vis du phénomène de dessiccation 43
I.2.2.1. Les besoins de la cure 43
I.2.2.2. Les différentes étapes du déroulement de la cure 45
I.2.2.3. Les différents procédés de cure du béton 46
I.2.3. Importance et nécessité de la cure 48
I.2.3.1. La fragilité du béton frais 48
I.2.3.2. Les défauts de cure 49
I.3. CONCLUSION DE L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE 50

CHAPITRE II : OUTILS EXPERIMENTAUX POUR L'ÉTUDE DES DÉFORMATIONS PLASTIQUES DES BÉTONS 52

II.1. LA CAMPAGNE D'ESSAI POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT DU BETON FRAIS 53
II.1.1. La composition des bétons 53
II.1.1.1. Les constituants du béton 53
II.1.1.2. Les formulations de bétons 55
II.1.1.3. Les caractéristiques des trois bétons à l'état frais 55
II.1.2. Démarche de l'étude 56
II.2. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX 58
II.2.1. Etude des déformations plastiques et des phénomènes corollaires 58
II.2.1.1. Dispositif de mesure des déformations plastiques 58
II.2.1.2. Les phénomènes corollaires étudiés 63
II.2.2. Estimation du temps de début de prise du matériau 66
II.2.3. Conditions et procédure d'essais 68
II.2.3.1. Essais en présence de vent 68
II.2.3.2. Essais en absence de vent 71
II.3. CONCLUSION ET BILAN DE RECHERCHE 72

CHAPITRE III : ÉTUDE DES DÉFORMATIONS PLASTIQUES DU BÉTON VIS Á VIS DU SÉCHAGE 73

III.1. INFLUENCE DES CONDITIONS DE SECHAGE SUR LES MECANISMES A L'ORIGINE DES DEFORMATIONS DU BETON 74

III.1.1. La problématique industrielle. 74

III.1.2. La fissuration des bétons à l'état plastique. 75

III.1.3. L'origine des déformations plastiques : Le phénomène d'évaporation 77

III.1.4. Le développement de la dépression capillaire 81

III.2. ETUDE DES DEFORMATIONS DES BETONS A L'ETAT FRAIS 85

III.2.1. Le retrait plastique des bétons 85

III.2.1.1. Le retrait plastique et le suivi thermique en condition endogène 85

III.2.1.2. Les déformations plastiques longitudinales 87

III.3. ANALYSE DU COMPORTEMENT DES BETONS AU TRES JEUNE AGE 90

III.3.1. Evolution du matériau en cours d'hydratation 90

III.3.1.1. Analyse des déformations au très jeune âge 91

III.3.1.2. La fissuration des bétons 95

III.3.2. Analogie avec un milieu capillaro-poreux soumis à un séchage de type convectif 98

III.3.2.1. La cinétique de séchage des bétons à l'état plastique 98

III.3.2.2. Le couplage séchage-retrait-contraintes mécaniques dans un milieu déformable : cas du béton à l'état plastique. 100

III.4. CONCLUSION 103

CHAPITRE IV : INFLUENCE DE LA CURE SUR LE COMPORTEMENT DU BETON FRAIS 104

IV.1. EFFETS DE LA METHODE DE CURE SUR LE COMPORTEMENT DU BETON FRAIS 105

IV.1.1. La cure du béton par des matériaux d'étanchéité : le film plastique étanche 105

IV.1.2. La cure du béton par des liquides en phases solvantés 106

IV.1.2.1. Etude de l'efficacité du produit de cure : le Maskure 114 106

IV.1.2.2. Le fonctionnement du produit de cure 107

IV.2. LE COMPORTEMENT DU BETON FRAIS SUIVANT LA CURE 111

IV.2.1. Étude du phénomène d'évaporation des bétons vis-à-vis de la cure 111

IV.2.2. Évolution du retrait plastique en fonction du mode de cure utilisé 114

IV.3. LE DEVELOPPEMENT DE LA DEPRESSION CAPILLAIRE SUIVANT LA CURE 117

IV.3.1. Évolution de la dépression capillaire suivant le mode de cure utilisé 117

IV.3.1.1. Le développement de la dépression capillaire avec le film plastique 117

IV.3.1.2. Le développement de la dépression capillaire avec le produit de cure 118

IV.3.2. Étude comparative du suivi de la dépression capillaire 119

IV.4. CONCLUSION 121

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES 122

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 127

ANNEXES 137

ANNEXE A : CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS 138

ANNEXE B : FORMULATIONS DES BETONS 145

ANNEXE C : PROTOCOLES EXPERIMENTAUX 149

INTRODUCTION

Une des caractéristiques des matériaux à matrice cimentaire, est leurs variations de volume significatives, et cela, dès les premières heures qui suivent la mise en place.
Sous certaines conditions climatiques (temps chaud, sec et/ou venteux) ou structurelles (pièces encastrées), les déformations engendrées, lors des ces changements dimensionnels, peuvent conduire à la fissuration précoce de l'ouvrage, dont l'ouverture peut dépasser 0.3mm (Acker 2004). Bien que la fissuration soit, dans certains cas associée à de mauvaises pratiques sur chantier, ce phénomène de fissuration est identique à celui qui se produit dans les sols fins ou argileux (Peron 2006).
Au cours des dernières années, de nombreuses études ont démontré que les problèmes de fissuration peuvent être directement liés aux phénomènes de retrait de la pâte. (Turcry 2004) Car pendant l'hydratation de la pâte de ciment, cette dernière subit un retrait qui lui est propre.

1. Analyse du comportement des bétons au très jeune âge

Jusqu'à présent, les variations volumiques et mécaniques étaient rarement mesurées durant les 24 premières heures d'hydratation, principalement en raison des difficultés expérimentales inhérentes. Les problèmes de fissuration plus fréquents au très jeune âge (avant et/ou pendant la prise), ont contribué ces dernières années au développement de procédures expérimentales permettant d'étudier le comportement du matériau dans les premières heures qui suivent le contact entre les grains de ciment et l'eau.
Des travaux récents ont montré que la fissuration au très jeune âge est un problème complexe qui n'est pas uniquement lié au retrait du matériau. Selon certaines études, la capacité du béton à se déformer joue également un rôle important dans les mécanismes de fissuration précoce (Yuan et al., 2003).
Le risque de fissuration existe lorsque l'air pénètre dans le réseau poreux de la structure. A cet instant, la pression capillaire dans le béton dépasse la pression d'entrée d'air (Slowick 2008). Le développement de la pression capillaire, lié au départ d'eau en surface dû à l'évaporation, semble jouer un rôle prépondérant dans le phénomène de fissuration précoce des bétons.

Le problème de fissuration précoce est fréquemment résolu par la cure du matériau à l'état plastique. La cure protège le béton à un moment où ce dernier est sujet à des déformations plastiques importantes (Association béton Québec, 2005). Au très jeune âge, il est impératif de contrôler le retrait plastique pour garantir l'esthétique et la durabilité des matériaux cimentaires.
La maîtrise de la fissuration prématurée ne peut être garantie sans une connaissance approfondie du comportement des matériaux cimentaires au très jeune âge. Il est donc important de mieux comprendre les mécanismes, qui sont à l'origine des déformations plastiques des matériaux à matrice cimentaire.

2. Les différents mécanismes régissant le comportement du béton frais

C'est dans ce souci que notre travail de recherche trouve son importance. Il vise à mettre en lumière des mécanismes physico-chimiques qui régissent le comportement du béton, et qui impliquent très souvent des déformations au sein même de sa structure. Il s'agit également d'étudier et de faire ressortir, non seulement, des paramètres de formulation (rapport E_{eff} /C, dosage en superplastifiant,…etc.), mais aussi les conditions de séchage et les effets de la cure, qui ont une influence sur le comportement du matériau en cours d'hydratation. Les différents éléments, liés au comportement du matériau, qui seront identifiés, permettront par la suite l'analyse du matériau (Baroghel-Bouny 1994).

La compréhension des mécanismes physico-chimiques et mécaniques dans le but de permettra par la suite, l'amélioration et le développement des modèles existants permettant de décrire le comportement du béton frais. Le caractère particulier de l'étude réside dans le fait qu'elle se concentre sur les phénomènes qui sont impliqués dans le développement des propriétés du béton après le contact eau/ciment, c'est-à-dire avant et pendant la prise. En effet, l'expérimentation citée dans la documentation scientifique a été, pour la majorité, réalisée pour prédire le comportement des pâtes de ciment, des mortiers ou des bétons durcis (Amziane and al. 2004 ; Haouas 2007 ; Messan 2006 ; Michaud 2008).

Différents mécanismes ont été proposés depuis quelques années, pour expliquer la capacité des bétons à subir des déformations (Toorman 1996), avec l'utilisation de paramètres rhéologiques, qui permet de décrire la microstructure du matériau comme le transfert graduel des pressions internes (crées par un fluide), vers le squelette granulaire. Mais la caractérisation et l'identification expérimentales de ces paramètres restent encore difficiles.

Wittmann (1976) était le premier à montrer que le retrait plastique pouvait être lié à l'apparition de la pression capillaire dans l'eau du mélange. La densification des produits formés lors du contact eau-ciment, conduit à la création des vides dans le réseau poreux avec ou sans échange avec le milieu ambiant. L'apparition de vides engendrera une dépression capillaire, responsable des déformations plastiques. Cependant l'évolution des déformations plastiques ne suffit pas à prédire correctement le comportement du matériau.

Le mécanisme de retrait plastique proposé par Radocea (1994), est basé sur l'idée que la pression capillaire dans une solution saturée, exposée à la dessiccation, dépend de la géométrie des espaces entre les particules solides près de la surface d'évaporation.

L'idée de prendre en compte la pression capillaire induite dans le réseau poreux, est utile, car elle permet de mettre en évidence l'intérêt d'une approche hydromécanique des milieux poreux dans le cadre, par exemple, d'une éventuelle modélisation des déformations du matériau au très jeune âge.

La compréhension des mécanismes multi échelles régissant l'évolution de l'arrangement textural du matériau et le transport de l'eau et de l'air dans le béton, permettra, à terme, une meilleure modélisation du comportement du béton au très jeune âge.

3. La problématique de recherche

3.1. Domaine de l'étude

Les travaux effectués concernent uniquement le comportement de matériaux à base de ciment Portland, sans ajouts de minéraux. Le travail se limitera non seulement, à l'étude de bétons avant et/ou pendant la prise, mais aussi dans les conditions environnementales bien précises. Les paramètres choisis pour cette étude du comportement des bétons au très jeune âge sont les suivantes :

- 3 rapports E_{eff} /C : 0,60 – 0,45 – 0,35,
- T (°C) / HR (%) : 20°C / 50%,
- 2 modes de cure appliqués aux bétons : l'usage d'un film plastique et l'usage d'un produit de cure commercial. Le comportement des bétons protégés par la cure sera comparé à celui des bétons dépourvus de cure.
- 2 conditions de séchage : avec et sans vent.

La prédiction des mécanismes de déformations et des phénomènes corollaires développés par la suite, est valable avant et/ou pendant la prise des bétons. Le passage entre les phases plastiques et solides au moment de la prise est très important dans la compréhension des phénomènes de fissuration précoce.

3.2. L'aspect du problème

Comme cela a été affirmé précédemment, le béton au très jeune âge est un matériau poreux dont les caractéristiques évoluent avec l'hydratation de la pâte de ciment. Il est nécessaire de travailler à différentes échelles pour pouvoir prédire correctement les mécanismes responsables des déformations de ce dernier.

Pour ce faire l'étude sera orientée vers deux échelles distinctes : celle des pores capillaires, et celle du matériau, qui correspondent à une échelle macroscopique des déformations.

- L'échelle du réseau poreux permet de décrire les mécanismes à l'origine des dépressions capillaires.
- Les déformations correspondent à la conséquence macroscopique des contraintes générées.

Ce travail de recherche tente de répondre à la question suivante : comment prévoir les déformations plastiques du béton, à travers les différents mécanismes qui régissent le comportement du béton, afin de diminuer le risque de fissuration à l'état plastique ?

4. La démarche suivie pour l'étude

Ce mémoire s'articule autour de quatre parties :

- **La prise en compte des origines et la prévention des déformations plastiques du béton pendant l'hydratation.** Cette partie fait l'objet d'une synthèse bibliographique, qui se compose de deux principales parties. La première présente l'état de l'art des sources de fissuration précoce des bétons, parmi lesquelles :
  - le séchage,
  - les mécanismes à l'origine des déformations plastiques (l'évaporation, la consolidation, la dépression capillaire),
  - les déformations plastiques (les retraits).

  Et enfin la seconde est consacrée à la cure des bétons, prévention contre la fissuration précoce. Ce chapitre permet de mettre en évidence, non seulement, l'effet des mécanismes physico-chimiques du matériau, mais aussi l'influence du séchage et de la cure, sur l'évolution microstructurale du béton à l'état plastique.

- **Outils expérimentaux pour l'étude des déformations à l'état plastique du béton.** La synthèse bibliographique réalisée dans cette partie, montre que l'origine des déformations fait l'objet de débats dans la communauté scientifique, mais deux mécanismes semblent se dégager. Les différents mécanismes de retrait plastique liés au séchage, engendrant alors des dépressions capillaires, qui appliquées au squelette, conduisent à des déformations du matériau.

  Cette partie est consacrée à la présentation des dispositifs expérimentaux permettant d'atteindre les objectifs de l'étude. Ces outils expérimentaux sont pour certains d'entre eux, développés et calibrés durant cette thèse. Ce sont des outils de mesure des déformations du béton frais (retraits libre et empêché). Outre les outils de mesure du retrait plastique, les outils de mesure de la pression capillaire ont été également présentés.

- **Etude du comportement du matériau suivant les conditions de séchage.** Lorsque le matériau est soumis à des conditions de séchage en même temps que l'hydratation évolue, les déformations plastiques qui en résultent sont une combinaison complexe de mécanismes apparaissant à différentes échelles. Les résultats (déformations plastiques et phénomènes corollaires) sont présentés suivant deux conditions de séchage (avec et sans vent) uniquement pour des bétons non protégés par une quelconque cure.

- **Etude du comportement du matériau suivant le mode de cure mis en œuvre.**

  La nécessité de protection du béton frais est d'autant plus impérieuse que le risque de dessiccation est grand, surtout avant la prise où une évaporation trop rapide peut entraîner d'importantes fissures de retrait plastique et donc une perte de résistance près de la surface. Cette partie présente l'influence de la cure sur l'évolution des déformations plastiques, suivant deux modes de cure (utilisation d'un film plastique étanche et l'utilisation d'un produit de cure commerciale).

Ce travail se terminera par une conclusion générale, dans laquelle les principaux résultats obtenus seront rappelés. Ces résultats constitueront une base de données pour l'établissement de modèles de retrait plastique. Afin de pouvoir prendre en compte des mécanismes complexes dans la modélisation du comportement des bétons au très jeune âge, il est indispensable d'évoluer méthodiquement. Cette démarche permet de faire des choix et de retenir certaines hypothèses dans le cadre d'une modélisation de type milieu capillaro-poreux déformable.

CHAPITRE I : ORIGINE ET PRÉVENTION DES DÉFORMATIONS PLASTIQUES - BIBLIOGRAPHIE

I.1. Les sources des déformations plastiques du béton

La fissuration précoce peut être pénalisante pour la durabilité et l'esthétique des ouvrages en béton. En effet, elle donne souvent des fissures ouvertes, qui apparaissent dans la structure. Quand il s'agit d'un béton très jeune, il faudra tenir compte de l'état du matériau, c'est-à-dire celui d'un état de suspension vers un état de solide poreux.
Au très jeune âge, la principale cause du retrait pour les ciments portland, est liée à la perte rapide d'eau (par évaporation) à la surface du béton, vu le manque d'eau ressuée pour remplacer l'eau évaporée.
L'évaporation superficielle du matériau conduit à l'apparition d'une pression hydraulique (négative) dans la phase liquide du matériau, liée au séchage (Amziane and al. 2004). Il en résultera dans certains cas une fissuration de peau du matériau.
Toute variation de la température ou de l'humidité relative du matériau ou la combinaison des deux paramètres ajoutée à celle du vent, accélèrent le retrait du béton jeune.
Cependant, certaines études expérimentales montrent que ces fissures peuvent survenir quelque temps après la mise en place du matériau seulement, c'est-à-dire avant tout retrait.

I.1.1. Le séchage

Le séchage est l'opération qui a pour but l'évacuation de l'eau contenu dans le béton. Il est alors défini comme étant un double transfert de chaleur et de masse. Pour les matériaux de construction (bois, brique, tuile, béton, céramiques sanitaires,...etc.), le séchage doit conserver la forme et l'état de surface, éviter les déformations et les fissures. Les propriétés mécaniques ne doivent pas être altérées.
Les mécanismes internes de processus de séchage sont trop complexes, les milieux à considérer tellement différents, les procédés tellement diversifiés pour que l'on puisse dégager une théorie globale pouvant régir les processus de séchage. Un bref aperçu de l'histoire scientifique du séchage, datant des études scientifiques du XXème siècle, est décrit ci-après (Moyne 1987).
Sherwood, en 1929, a initié l'histoire moderne du séchage. Le mécanisme de transport interne est alors assimilé à une diffusion régie par la loi de Fick. En 1937, Ceaglske et Hougen démontrent les limites de la diffusion et le rôle important joué par la capillarité. Ils remarquent que l'eau libre, c'est-à-dire celle qui se trouve dans les pores du matériau, migre grâce à la capillarité, tant que la phase liquide est continue.
Mais la plus grande figure est sans conteste le Professeur Krischer (1962). En partant d'une analyse générale des phénomènes de transfert de chaleur et de masse, les différents aspects du transport en milieu poreux sont minutieusement examinés.

Qu'il s'agisse des propriétés d'équilibre de nombreux corps, de l'analyse du transport par capillarité, de la diffusion en phase gazeuse, de la notion de conductivité thermique équivalente des corps poreux humides, de la description du séchage convectif en trois phases (la première phase : à vitesse constante ; la seconde : à vitesse décroissante dès que les forces capillaires n'alimentent plus suffisamment la surface ; la troisième : quand le matériau est dans le domaine hygroscopique)…etc. Tous ces aspects sont étudiés avec une pertinence rare.
Vient après, une phase de développement d'une description systématique des transferts couplés de chaleur et de masse.
Luikov a mis en place en 1966 une formulation mathématique des différents modes de transport. Les développements actuels s'intéressent à mieux prendre en compte la morphologie du milieu considéré et les mécanismes internes.
Whitaker (1977) a d'ailleurs proposé, en analysant les processus de séchage à l'échelle du volume élémentaire, une théorie du séchage complète et à usage systématique pour les milieux capillaro-poreux. Ces paramètres permettent de considérer le milieu poreux comme un milieu continu équivalent. Tout ceci peut être considéré comme le point de départ de plusieurs discussions dans les équations modernes du séchage.

Dans la suite du document, seul le séchage convectif sera étudié. Les transferts de chaleur et de masse, lors du séchage convectif, ont fait l'objet de nombreux travaux aussi bien théoriques qu'expérimentaux. L'intérêt porté à la prévision des déformations provoquées par cette opération est récent. Les problèmes de déformations et fissurations se posent de manière plus aigüe pour les ouvrages en bétons, présentant une surface d'évaporation très importante. (Messan 2006, Turcry 2003).

I.1.1.1. Etats de l'eau dans un milieu poreux tel que le béton

Pour caractériser un matériau poreux en termes de transferts, il est important de définir un certain nombre de paramètres physiques caractérisant la structure géométrique de la matrice de ce milieu, les interactions entre celle-ci et les phases fluides qu'elle contient.
Dans notre cas, ces phases sont principalement au nombre de deux : l'eau liquide dont les interactions avec la matrice solide sont d'origine hydrodynamiques ou capillaires (eau libre) et d'origine chimique (eau liée), et une phase gazeuse (air humide) constituée d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau (Chemkhi 2008 ; Granger 1996 ; Guenot-Delahaie 1996) :

- **L'eau libre** : Elle remplit la majeure partie des pores de la structure du milieu et est retenue sous forme liquide par des forces d'origine capillaires.
- **L'eau liée** : Elle est adsorbée physiquement en couche multimoléculaire par des forces du type Van Der Waals ou de nature électrostatique sur, et parfois dans, les parois de la structure. Elle peut aussi être retenue par des forces capillaires fortes (pores de dimensions inférieures ou égales au micromètre environ, pour lesquels les forces internes engendrées par le séchage ne surpassent pas les forces capillaires en présence).

- **La vapeur d'eau** : Elle est mélangée avec l'air sec et occupe les espaces libérés par l'eau libre, l'eau liée et la matrice solide.

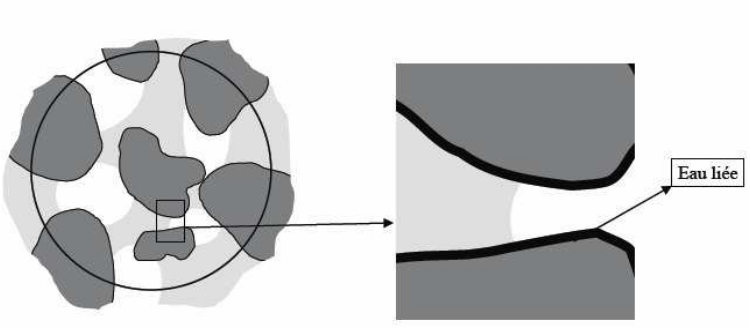


Figure I-1 : Eau liée dans les pores (Cáceres salazar 2006)

On a pu voir que l'on peut distinguer deux types d'eau d'un point de vue thermodynamique : l'eau libre et l'eau liée. Ces concepts ne sont pas respectés au sens strict dans la littérature.
On constate l'apparition de sous-catégories particulières selon les auteurs et les méthodes utilisées pour caractériser les formes d'eau (Léonard 2002).
Vesilind et Martel (1989) proposent la classification suivante suite à des tests dilatométriques: l'eau libre est celle qui peut être éliminée par simple décantation gravitaire ; l'eau interstitielle est celle qui est enfermée dans les flocs ou dans des structures cellulaires, son enlèvement nécessite la rupture des flocs ou des cellules ; l'eau vicinale est celle qui est retenue en surface des particules solides par des liaisons hydrogènes, son élimination passe par un traitement thermique ; enfin l'eau d'hydratation est celle qui est chimiquement liée et qui nécessite une importante dépense énergétique pour son enlèvement.
Smollen (1990) utilise un séchage basse température pour distinguer les catégories d'eau dans un matériau poreux (cas des boues). L'eau qualifiée de libre est celle qui a pu être éliminée par déshydratation mécanique. Lors du séchage, l'auteur constate qu'une certaine quantité d'eau appelée 'eau immobilisée' est éliminée à une vitesse constante. L'eau qui subsiste est de l'eau liée, physiquement et chimiquement.
Tsang et Vesilind (1990) utilisent également une méthode thermogravimétrique pour distinguer les types d'eau dans un milieu poreux (exemple les boues). L'eau libre est la somme de l'eau éliminée par déshydratation et par séchage à vitesse constante. Les ruptures de pente de la courbe de séchage leur permettent de distinguer l'eau interstitielle, l'eau de surface (eau vicinale) et l'eau liée chimiquement qui n'est pas éliminée.
Le tableau I-1, inspiré de la synthèse effectuée par Bongiovanni (1998), permet d'effectuer des recoupements entre auteurs et d'attribuer aux différentes sous-catégories énoncées le qualificatif 'd'eau libre' ou 'd'eau liée' au sens thermodynamique. L'eau libre est celle qui est éliminée pendant la déshydratation et pendant la période de séchage à vitesse constante dans l'analyse thermogravimétrique. L'eau immobilisée de la classification de Smollen (1990) est donc de l'eau libre. L'eau liée peut globalement être répartie en trois familles (Rolf et Halde, 1979).

L'eau liée chimiquement est fixée par de fortes liaisons chimiques et ne peut être éliminée qu'au delà de 105°C (y compris l'eau d'hydratation). L'eau liée physiquement, par adsorption ou absorption, est également éliminée par séchage thermique (y compris l'eau de surface). Enfin, l'eau liée mécaniquement se rencontre dans des structures capillaro-poreuses (y compris eau interstitielle).

	Rolf et Halde (1979)	Vesilind et Martel (1989)	Smollen (1990)	Tsang et Vesilind (1990)
Eau libre au sens thermodynamique	Eau libre	Eau libre (éliminée par décantation gravitaire)	Eau libre (éliminée par déshydratation mécanique) Eau immobilisée (éliminée par séchage à vitesse constante)	Eau libre (éliminée par déshydratation mécanique et par séchage à vitesse constante)
Eau liée au sens thermodynamique	Eau liée chimiquement	Eau d'hydratation	Eau liée chimiquement	Eau liée chimiquement
	Eau liée physiquement	Eau vicinale	Eau liée physiquement	Eau de surface
	Eau liée mécaniquement	Eau interstitielle		Eau interstitielle

Tableau I-1: Synthèse des classifications d'eau libre et d'eau liée (Léonard 2002)

Du point de vue "aptitude de séchage", il peut être intéressant de classer les milieux poreux en terme de niveau d'hygroscopicité (fixation de l'eau liée sur la structure solide du milieu). Nadeau et Puiggali (1995) ont classé les matériaux suivants les catégories ci-dessus :

- **Les milieux poreux non hygroscopiques** : les pores sont a priori de dimensions supérieures au micromètre et la matrice solide de ces milieux n'est pas hydrophile. La quantité d'eau liée est négligeable devant la quantité d'eau libre. Ce sont, par exemple, des lits de sable ou de billes de verre.
- **Les milieux poreux hygroscopiques** dont les rayons des pores varient entre un nanomètre et quelques dizaines de micromètres et/ou dont la matrice solide est hydrophile. La quantité d'eau liée est non négligeable devant la quantité d'eau libre, les pores dont le rayon est inférieur au rayon d'action des forces de sorption étant même saturés d'eau liée. Ce sont, par exemple, l'argile ou le béton.

I.1.1.2 Le transport de l'eau lors du séchage

Le but du séchage est d'extraire le liquide du produit à sécher. Pour ce faire, le liquide se déplace tout d'abord de l'intérieur vers la surface du matériau. Ensuite, il est arraché de la surface par le fluide séchant (l'air ambiant). Le déplacement de l'humidité dans le corps poreux se décompose en une migration de liquide et une migration sous forme de vapeur (Chemkhi 2008).

- La migration du liquide

Dans l'absolu, le déplacement de l'eau libre dans le solide est dû au gradient de pression dans cette phase ainsi qu'à la gravité. Cet écoulement est régi par la loi de Darcy. Dans le cas de matériaux à faible perméabilité, les effets gravitaires peuvent être négligés.

- La migration de la vapeur

A partir d'un certain stade de séchage, l'humidité se déplace sous forme vapeur.
Le mode de déplacement de la vapeur d'eau varie avec la nature et la concentration en humidité du corps à sécher.

- **Ecoulement du gaz** (vapeur + air sec) : tout comme l'eau liquide, la phase gazeuse s'écoule sous l'effet d'un gradient de pression de cette phase (loi de Darcy),
- **Diffusion de la vapeur** : la diffusion de la vapeur dans l'air humide est provoquée par un gradient de concentration en vapeur d'eau ; elle obéit à la loi de Fick. Ce type de diffusion s'observe pour les solides à pores très larges. Dans le cas contraire, cette diffusion devient du type Knudsen. Elle intervient dans un milieu poreux possédant des pores très fins, de diamètre faible devant le libre parcours moyen des molécules de vapeur d'eau.

- Evaporation à la surface

L'eau, ayant rejoint la surface par les divers moyens exposés ci-dessus, doit être entraînée par l'écoulement de l'air. Les échanges massiques et thermiques entre la surface du milieu poreux et le gaz d'entraînement, régissent tout le déroulement du séchage ; ils sont à l'origine de la migration de l'eau vers la surface. Leur influence est particulièrement importante dans la phase où les forces capillaires acheminent suffisamment de liquide pour que le front d'évaporation coïncide avec l'interface entre le corps poreux et l'air de séchage.
Tous les modes de migration de l'eau dans le corps et à la surface, exposés ci-dessus, interviennent dans le processus de séchage soit simultanément, soit successivement.

Au cours du processus de séchage, les différents modes de transport peuvent intervenir successivement ou simultanément. Une analyse physique du processus de séchage permet de proposer un découpage en quatre étapes selon les différents modes de migration de l'eau (figure I-2) :

Au cours de **la première étape** du séchage, le matériau est encore saturé. L'eau liquide se déplace sous l'effet d'un gradient de pression liquide. Cette première étape est parfaitement décrite par la loi de Darcy.

Pendant **la deuxième étape**, l'air et la vapeur d'eau remplacent le liquide évaporé. Cette phase est décrite par la diffusion de vapeur ainsi que la loi de Darcy généralisée. Au cours des deux premières étapes, l'évaporation de l'eau extraite s'effectue à la surface du matériau.

Pendant **la troisième étape**, il n'y a d'eau libre que dans les petits capillaires, la migration de l'eau entre deux capillaires va s'effectuer grâce aux forces capillaires ou à des cycles d'évaporation condensation entre les zones liquides.

En fin de séchage, il ne reste plus que de l'eau liée. Sa migration s'effectue après évaporation par diffusion moléculaire ou diffusion-sorption.

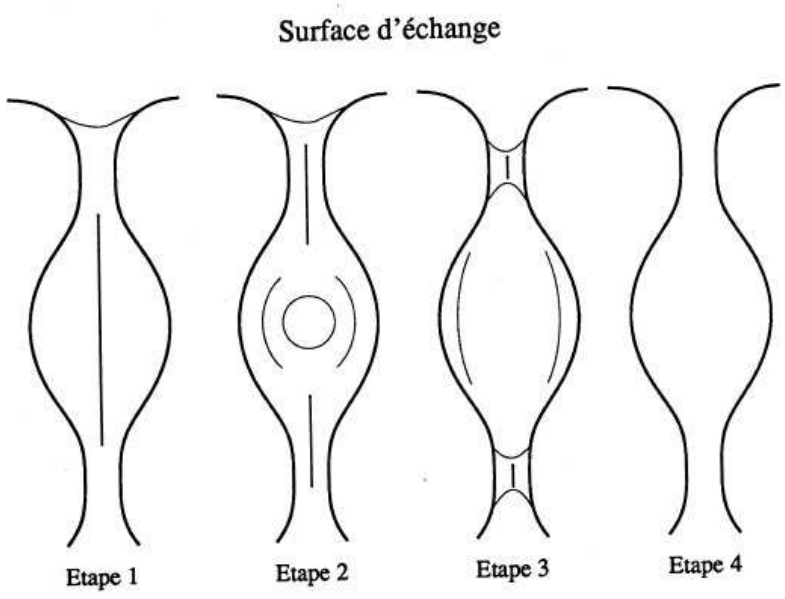


Figure I-2: Etapes du transport de l'eau lors du séchage (Jomaa 1991)

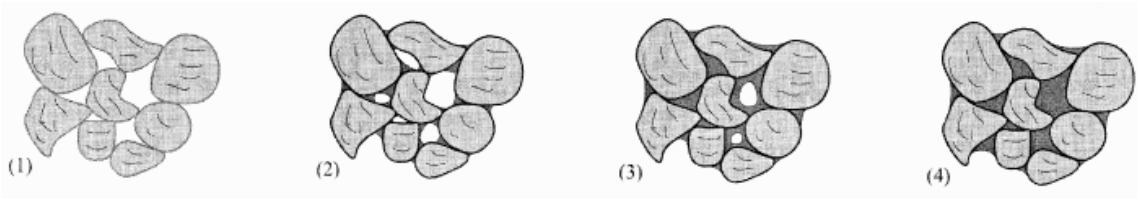
I.1.1.3 La cinétique du séchage (cas du séchage convectif)

Le principe général du séchage consiste à fournir de l'énergie à un mélange solide liquide afin d'en extraire l'eau (le solvant) qu'il contient.

La source d'énergie est ici un apport en surface (convection). Cette énergie sert à provoquer des changements de phase du solvant (généralement de l'eau) pour faciliter son extraction sous forme gazeuse. L'opération de séchage ne concerne que l'élimination de l'eau libre et de l'eau liée. Malgré la diversité des matériaux séchés, les cinétiques présentent généralement une allure qui peut être décomposée en trois périodes (Kowalski 2001 ; Léonard 2002 ; Scherer 1990) :

- **Période de préchauffage** : durant cette période initiale, les flux thermiques et massiques sont initiés. Le flux thermique est lié à l'apport d'énergie de l'air séchant au matériau. Cette énergie sert à évaporer de l'eau en surface.
  La fin de cette période est atteinte lorsque le flux thermique apporté par convection est égal à la chaleur absorbée par évaporation. Cet équilibre se traduit par la température humide à la surface du matériau qui, ne dépend que des propriétés de l'air humide.
- **Période à vitesse constante** : une fois l'équilibre thermique atteint, le transport de l'eau libre dans le matériau est suffisamment rapide pour alimenter la surface, lieu d'évaporation. Durant cette période, le matériau reste saturé en eau dans le cas de milieux fortement déformables. Cela implique une contraction de la structure solide pour combler les vides laissés par l'eau évaporée : c'est le retrait volumique du matériau.
- **Première période de ralentissement** : cette période débute lorsque la surface du matériau, en contact avec l'air ambiant atteint soit seuil hygroscopique (**1**), soit une teneur en eau locale nulle pour les matériaux non hygroscopiques. Il se crée alors progressivement un front de séchage correspondant au lieu d'évaporation de l'eau qui sépare le milieu en deux zones. Côté saturé, l'eau libre alimente le front d'évaporation. Côté insaturé, l'eau liée est désorbée et la vapeur est transférée vers l'extérieur du milieu poreux. En ce qui concerne les flux thermiques, la diminution de la vitesse d'évaporation rompt l'équilibre thermique établi pendant la période à vitesse constante. L'apport d'énergie permet à la fois d'évaporer l'eau et d'augmenter la température du matériau.
- **Deuxième période de ralentissement** : lorsque toute l'eau libre a été évaporée, la vitesse de séchage chute brusquement. L'élimination de l'eau liée nécessite un apport d'énergie supplémentaire (énergie de liaison de l'eau adsorbée). Par conséquent, lorsqu'il ne reste plus que l'eau adsorbée, le flux de matière dépend de la chaleur de désorption qui augmente au fur et à mesure que la teneur en eau approche de sa valeur d'équilibre. Le flux matériel se fait alors uniquement en phase gazeuse et la température du matériau tend vers la température de l'air séchant.

Les différentes phases et leur existence sont conditionnées par l'équilibre hygroscopique c'est-à-dire par les propriétés de l'eau liée. Cependant, une autre interprétation des cinétiques de séchage est basée sur l'existence de films d'eau liquide s'écoulant sur la surface du solide. D'abord décrits qualitativement (Scherer, 1990), l'existence de ces films et leur influence sur la cinétique de séchage ont été montrées expérimentalement (Laurindo et Prat 1998 ; Goyeneche 2001). Ces films participent de façon non négligeable au transport d'eau lors des phases de ralentissement. Ainsi, lors de la période du premier ralentissement, ces films sont continus à la surface du milieu poreux (état funiculaire (**3**)).
La transition entre les deux périodes de ralentissement se fait lorsque la continuité du film est rompue à cause d'une alimentation en eau liquide insuffisante (état pendulaire (**2**)).



(**1**) : domaine hygroscopique (**2**) : domaine pendulaire
(**3**) : domaine funiculaire (**4**) : domaine saturé

Figure I- 3: Représentation schématique des états hydriques d'un milieu poreux (Salager 2006).

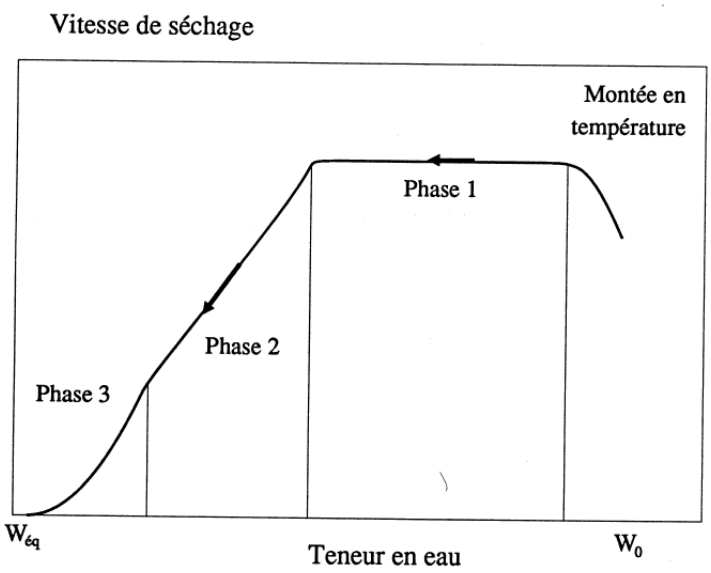


Figure I-4 : Cinétique de séchage d'un matériau capillaro-poreux (Jomaa 1991).

Habituellement, la teneur en eau du matériau et non la masse est utilisée pour tracer cette courbe de séchage (figure I-5). Selon l'usage, ces données sont transformées afin de tracer la courbe de vitesse de séchage selon que le flux de séchage est représenté en fonction du temps (figure I-6). Dans le cas où le matériau ne subit aucune modification de sa surface, le flux peut être obtenu directement par dérivation de la courbe de perte de masse. Le flux est alors égal à la vitesse de séchage à une constante près (Équation I.1).
Par contre dans le cas où le matériau humide subit un retrait, la connaissance de la surface externe (A(W)) de l'échantillon est nécessaire pour tracer la courbe de séchage en terme de flux (Équation I.2).

$$F = \frac{M_s}{A_0}\left(-\frac{dW}{dt}\right) = \frac{1}{A_0}\left(-\frac{dM}{dt}\right) = \frac{1}{A_0}N \qquad \textbf{(I.1)}$$

$$F = \frac{1}{A(W)} N \qquad \textbf{(I.2)}$$

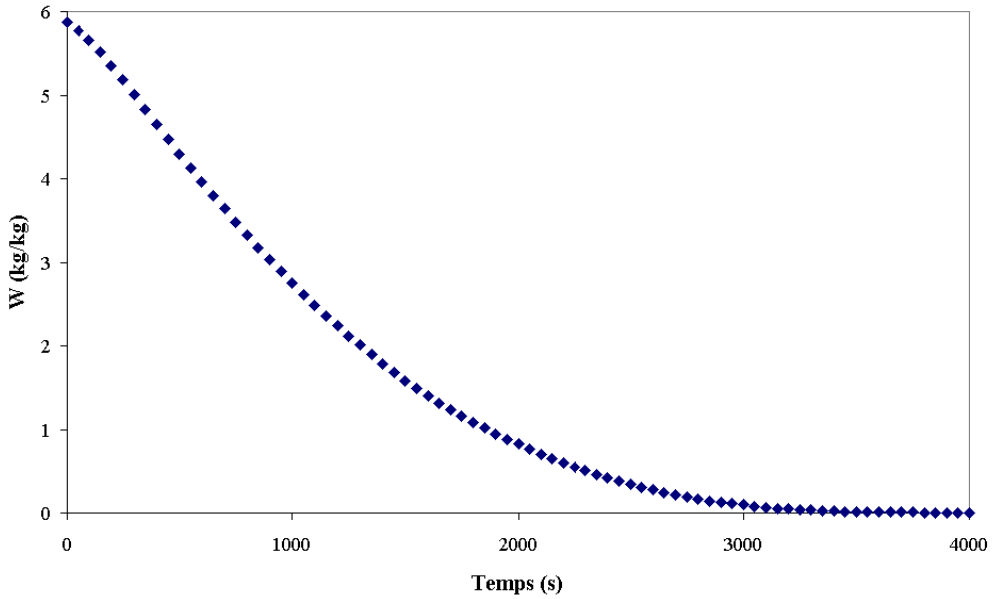


Figure I-5: Courbe de séchage montrant l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps (Léonard 2002)

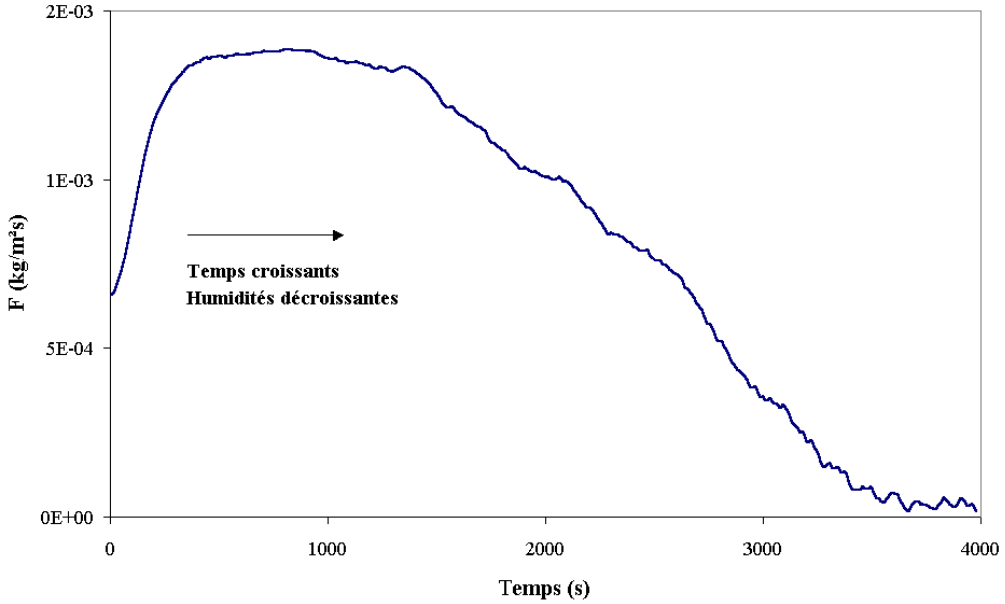


Figure I-6: Flux matériel en fonction du temps (Léonard 2002)

I.1.2. Les mécanismes à l'origine des déformations plastiques

I.1.2.1. La consolidation du matériau

Lorsqu'on mélange du ciment, du sable et du gravier avec de l'eau, la pâte fraîche du béton ainsi formée, se présente comme un système dispersé constitué de particules dans une phase aqueuse. Pendant cette période de suspension, le matériau ne peut résister aux variations de volume imposées par les réactions de précipitation et de dissolution des différents composants anhydres du ciment.

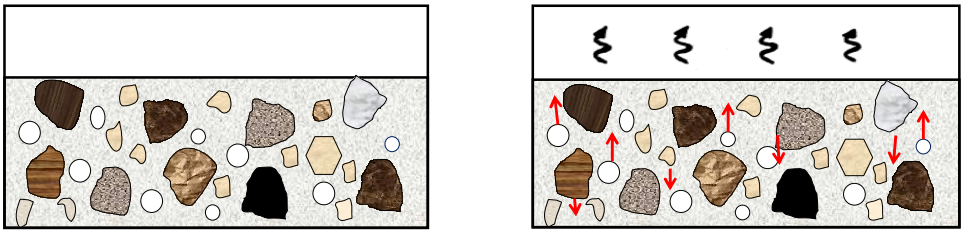
Lors des opérations de malaxage, l'eau introduite et l'air circulant au sein du matériau, fournissent aux grains empilés une mobilité, qui se traduit généralement par la notion d'ouvrabilité ou de consistance.

Lorsque le béton reste immobile un instant, sous l'effet de la gravité, les particules solides s'agglomèrent les unes des autres (par exemple, des cailloux par rapport au sable et aux fines) et la remontée de l'air occlus vers la surface, se produit simultanément : c'est la consolidation du matériau (Figure I-7).

Au cours de la consolidation, une autre composante s'ajoute à ce phénomène : le départ de l'eau due à l'évaporation.

Les grains de ciment les plus petits s'agglomèrent sous forme d'amas (suite aux phénomènes de physisorption à la surface des grains) : c'est le phénomène de floculation qui se produit. Ainsi, la pâte acquière progressivement une certaine cohésion et le squelette granulaire entame sa descente : c'est le tassement.

A cet instant, le squelette granulaire supporte son propre poids, aucune variation de pression dans les pores ne se produit. La pression est ici égale à la pression hydrostatique.



(a) ***(b)***

Figure I-7: ***(a)*** Etat initial et ***(b)*** consolidation du béton.

Les mesures du tassement du squelette granulaire, à partir de divers essais, ont en commun la position d'un « flotteur » sur la surface du matériau, ce flotteur étant équipé pour la mesure du tassement.

Par exemple la méthode dite « float method » fut proposée par Powers (1968).

Le flotteur est dans ce cas un disque plat de 13 mm de diamètre et 3 mm d'épaisseur en bakélite (figure I-8). Ce flotteur est surmonté d'un mât. L'altitude du sommet de ce mât est estimée avec une lunette optique.

Powers (1968) utilise ce même appareillage tant pour les coulis que pour les mortiers ou bétons. Cette méthode de mesure ne semble pas présenter de défauts majeurs. Elle est cependant assez sensible aux vibrations extérieures. L'étude préalable de la conception du flotteur est indispensable. En effet, ce flotteur ne doit pas modifier la forme de la surface solide et doit la suivre parfaitement dans sa descente.

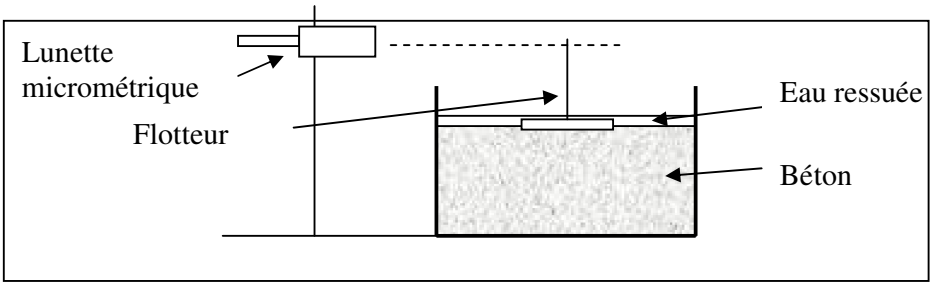


Figure I-8: Dispositif de *Powers* (Powers 1968).

I.1.2.2. Le ressuage

Au cours de cette consolidation les grains ont un mouvement d'ensemble vers le bas. Ce mouvement force l'eau intergranulaire à percoler vers la surface. Ainsi, une fois le béton mis en place dans son coffrage, une pellicule d'eau claire apparaît progressivement à sa surface : c'est le ressuage (figure I-9).

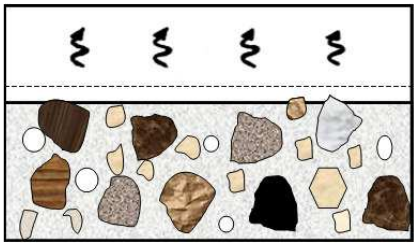


Figure I-9: Exemple de ressuage du béton.

En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau, sédimentent. La sédimentation des grains est très lente, par conséquent le débit d'eau exsudée est modeste. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée (Josserand 2002, Powers 1968). Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate.

Le ressuage est un type de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. Ce mouvement se traduit par le manque de cohésion de la pâte. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée.

En ce qui concerne le débit d'eau ressuée, la plupart des auteurs montrent qu'il est constant dans une première partie, puis décroît lentement jusqu'à s'annuler (Powers 1968). Un exemple de courbe « classique » est reproduit dans la figure I-10.
La caractérisation du ressuage peut éventuellement se faire par mesure de la hauteur d'eau, c'est-à-dire, elle consiste à prélever l'eau ressuée et à quantifier son volume.
Le principe consiste en la séparation eau ressuée/béton en intercalant un liquide dense non miscible avec l'eau (Kaplan 2001).
On utilise le type d'appareillage présenté sur la figure I-11. La réduction de section du moule permet d'augmenter la précision sur la lecture de la hauteur d'eau.
Dans sa thèse sur la pompabilité des bétons, Kaplan (2001) propose d'utiliser cette même méthode avec un aéromètre à béton (appareillage relativement courant). Cela dit, la précision de la mesure est insuffisante pour relier le ressuage aux données de formulation.

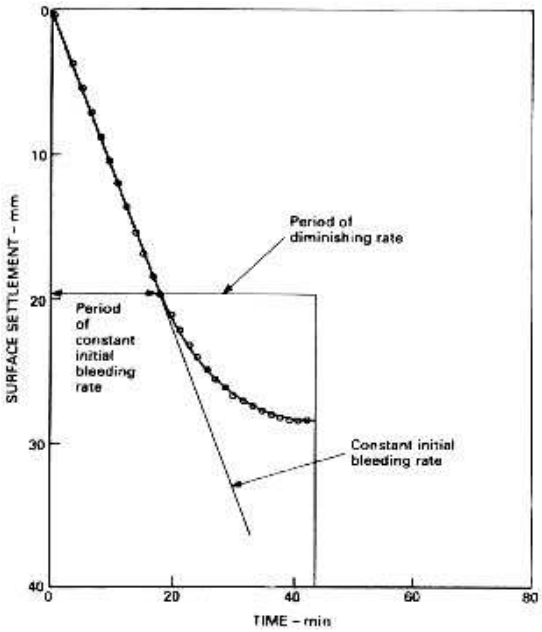


Figure I-10: Exemple de courbe de ressuage d'une pâte de ciment (Tan and al. 1987).

Enfin, cet essai est globalement lourd. Le temps de mise en place est long, ce qui fait reculer d'autant l'échéance de la première mesure.
Certains laboratoires privés ont développés leur propre méthode. Par exemple, on peut prélever directement à la seringue, l'eau ressuée d'une éprouvette 16x32 cm. Sans prendre en compte l'évaporation, ce protocole ne peut donner qu'un ordre de grandeur du ressuage obtenu.

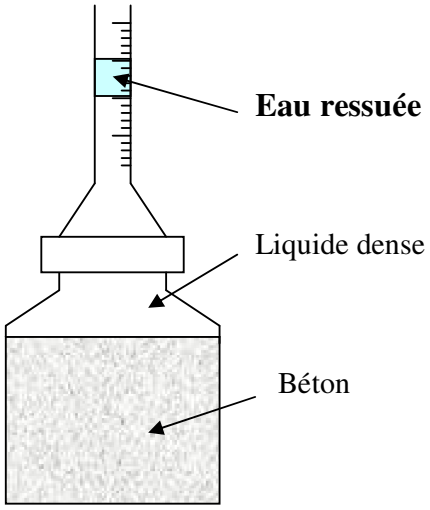
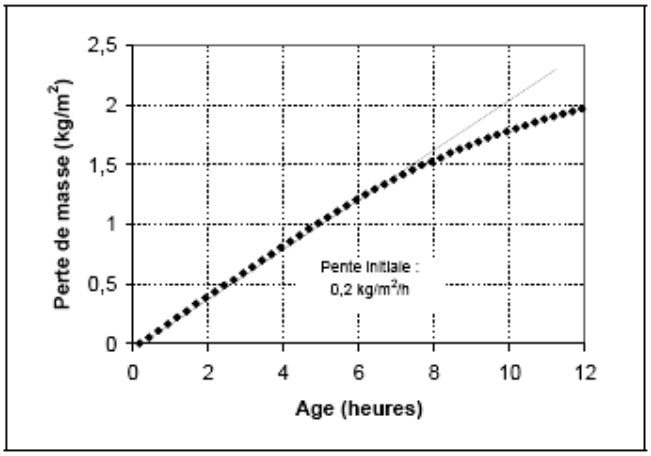


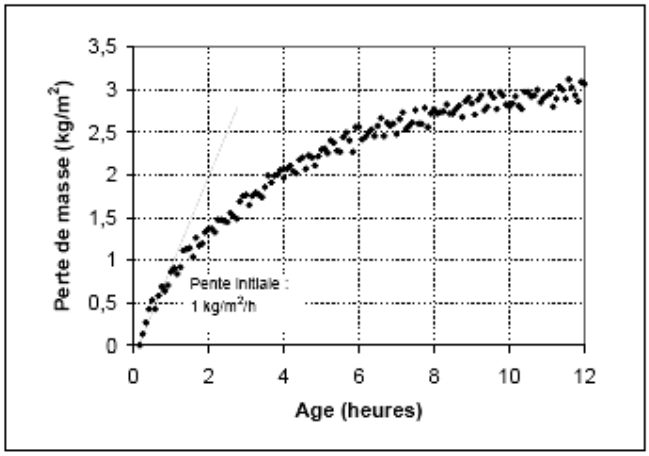
Figure I-11: Dispositif de mesure du ressuage
(Sawaide and al. 1992, repris par Kaplan 2001).

I.1.2.3. La dessiccation du matériau liée au phénomène d'évaporation

La consolidation du matériau peut ou ne peut être suivie d'un ressuage. Dans tous les cas, la surface du matériau soumis au séchage perd l'eau libre par évaporation.
Le risque de fissuration du béton frais est principalement influencé par l'évaporation, qui dépend des conditions environnementales, telles que la température de l'air ambiant, l'humidité relative et la vitesse du vent (Uno 1998) et également de la distribution poreuse du mélange granulaire humide. Cette évaporation est maximale, lorsque la surface du béton en contact avec l'air, n'est pas protégée de la dessiccation par une cure adéquate. Car l'hétérogénéité de la teneur en eau dans le matériau (liée à l'évaporation) génère des contraintes qui conduisent à l'apparition d'une pression capillaire négative (dépression capillaire) dans la phase liquide du matériau.
La cinétique d'évaporation dépend aussi des conditions environnementales et de séchage, comme le montre la figure I-12.
La cinétique linéaire de la perte de masse dans des conditions de séchage modéré est sans doute liée à la grande porosité du matériau et à son rapport E_{eff} /C élevé. Avec un flux d'évaporation beaucoup plus faible (flux de 0.2 kg/m²/h contre 1 kg/m²/h dans des conditions de séchage sévère), les déformations ainsi engendrées seront moins importantes que celles obtenues dans des conditions de séchage sévère (avec vent).
Le flux d'évaporation évolue en fonction de la quantité d'eau présente dans le béton, plus il y a d'eau plus l'évaporation est importante.



(a): Sans vent



(b): Avec vent

Figure I-12 : Evolution de la perte de masse avec et sans vent (Turcry 2004).

La distribution poreuse initiale des bétons peut expliquer la diminution du flux initial d'évaporation avec le rapport E_{eff}/C. En effet, Hammer (2002) a entrepris des mesures de perte de masse sur deux bétons ordinaires différents dont les rapports E/C sont les suivants : M1=0.30 ; M2= 0.40. Ils constatent que le flux d'évaporation diffère d'un béton à un autre (figure I-13).

Le risque de retrait plastique est classiquement estimé à partir du taux d'évaporation. Le taux d'évaporation est calculé à partir des conditions environnementales (température du béton, température de l'air, humidité relative, vitesse moyenne du vent) sans tenir compte des caractéristiques du béton (Uno 1998). Un taux d'évaporation dépassant 1,5 kg/m²/h s'est révélé préjudiciable pour la fissuration précoce de la structure cimentaire (Chanvillard 1999).

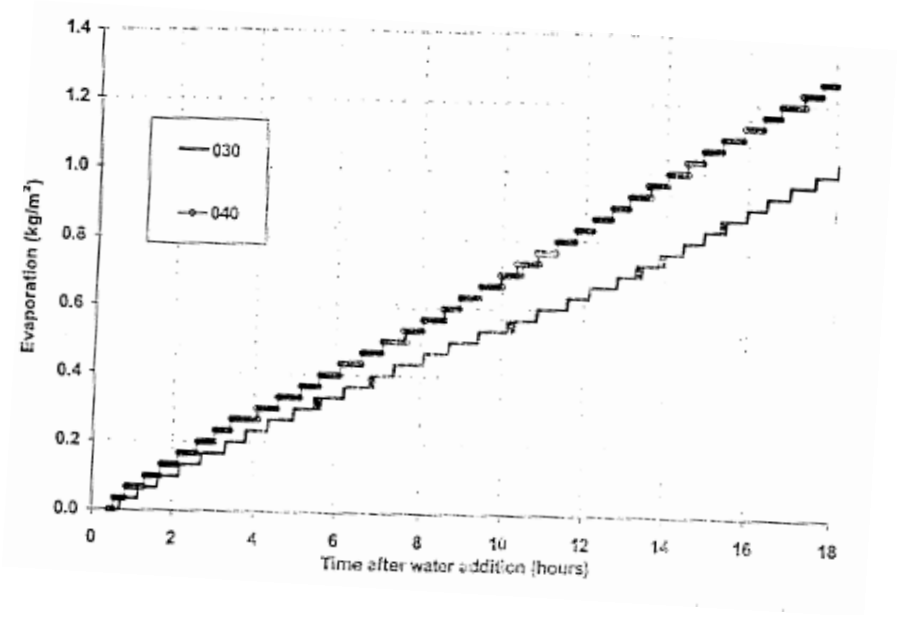


Figure I-13: Evolution de l'évaporation des deux différents bétons (Hammer 2002).

Le taux d'évaporation a été modélisé en tenant compte de la température du béton et des conditions environnementales. Uno (1998) a proposé pour le taux d'évaporation (Evap) la formule suivante :

$$Evap = 5([Tc + 18]^{2,5} - r.[Ta + 18]^{2,5}).(V + 4).10^{-6} \qquad (\mathbf{I.3})$$

Où

Evap (kg/m²/h) représente le taux d'évaporation,

T_c (°C) la température de la surface du béton,

T_a (°C) la température de l'air,

r =l'humidité relative de l'air,

V est la vitesse du vent exprimé en km/h.

I.1.2.4. Le développement de la pression capillaire au très jeune âge

Une des causes principales du retrait plastique du matériau est l'évaporation de l'eau interstitielle du béton liée à la dessiccation. Lorsque deux fluides non miscibles (l'eau et l'air dans notre cas) sont en présence l'un de l'autre, leur interface est caractérisée par l'existence d'une tension interfaciale **σ**. Cette tension interfaciale induit une différence de pression p_c entre les deux phases. Si on suppose que l'interface est un ménisque sphérique et que les pores sont cylindriques, alors la loi de Laplace donne la valeur de la pression capillaire p_c en fonction du rayon de courbure moyen de l'interface R=r/cos(σ) (Wittmann 1976) :

$$p_c = p_g - p_l = \frac{2\sigma.\cos(\theta)}{r} \qquad \textbf{(I.4)}$$

Où

p_l est la pression de l'eau [Pa],
p_g est la pression de la phase gazeuse [Pa],
θ est angle de mouillage (angle de contact entre les surfaces du solide/liquide) [rad],
r est le rayon du pore où le ménisque existe [m],
σ est la tension de surface de l'eau [N.m-1].

Cette équation traduit l'équilibre mécanique de l'interface sphérique séparant les 2 phases (liquide et solide) caractérisée par la tension de surface dans un pore cylindrique. C'est-à-dire l'équilibre hydrostatique de l'eau « capillaire » retenue dans un pore.

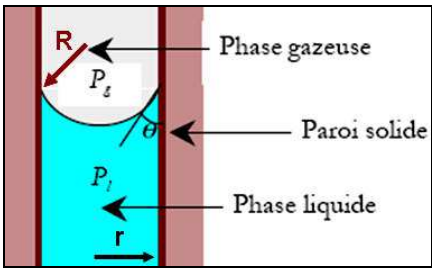


Figure I-14: Schéma d'un pore cylindrique (Mounanga 2003).

Dans un pore capillaire cylindrique ouvert, le ménisque d'eau est exposé à la pression atmosphérique. L'eau va grimper dans le pore capillaire cylindrique jusqu'à ce que l'équilibre entre la pression capillaire, la pression atmosphérique et les forces de gravité soit atteint. Ces ménisques capillaires engendrent une attraction entre les grains, correspondant à un phénomène de succion. La variation de la pression de l'eau, consécutive à la formation d'un ménisque, est négative, c'est-à-dire que la variation de pression est relative à une dépression capillaire (Wittmann 1976).

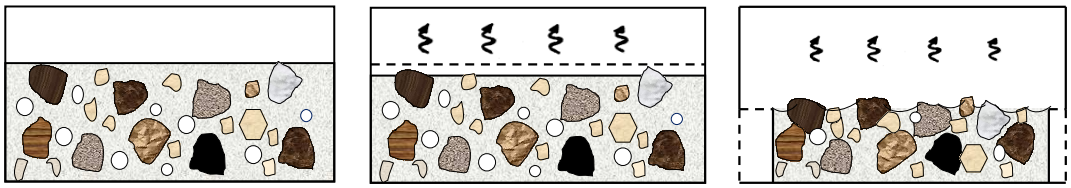


Figure I-15: Formation des ménisques en surface.

Wittmann a démontré expérimentalement que ce phénomène repose sur la pression capillaire du mélange, du béton frais après que la surface devienne sèche. Lorsque la surface s'assèche, un système de ménisques se forme tout près de la surface du béton. La pression capillaire à l'intérieur de la phase liquide se développe et monte à vitesse croissante jusqu'à ce qu'elle atteigne un maximum, c'est la pression maximale (figure I-16).

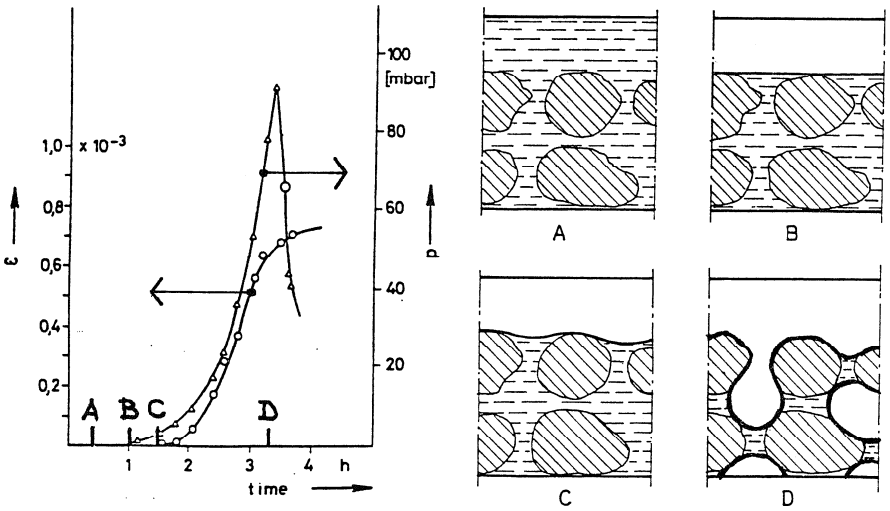


Figure I-16: Pression capillaire et retrait plastique du béton dans le temps (Wittmann 1976).

La figure I-17, présente l'évolution de la pression capillaire dans les matériaux cimentaires au fil du temps :

- à l'instant initial (t =0), immédiatement après la mise en place, les particules de ciment sont en suspension dans l'eau du mélange, et la pression est égale à la pression hydraulique, P_1, à une profondeur donnée.
- Au temps t_1, quand la consolidation se termine, le squelette granulaire supporte son propre poids ; la pression est ici égale à la pression hydrostatique, P_2.
- Durant la période [t_1-t_2], lorsque la surface de la pâte de ciment est recouverte d'une pellicule d'eau de ressuage, aucune variation de pression dans les pores ne se produit.
- Au temps t_2, l'évaporation de l'eau ressuée entraine une diminution de pression de l'eau, d'où la formation des ménisques en surface.

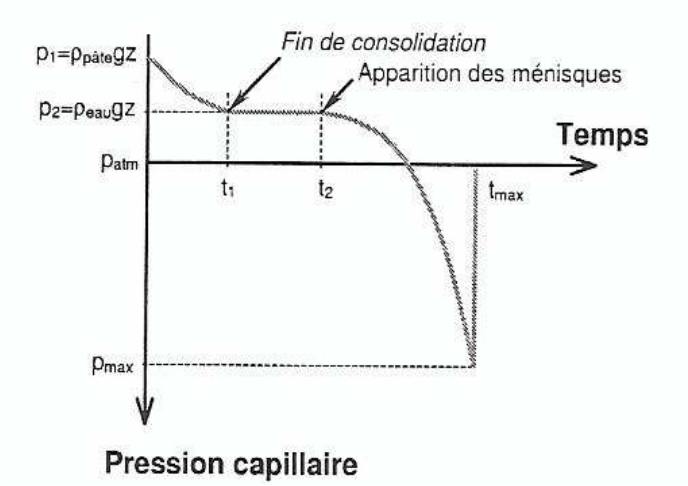


Figure I-17: Evolution de la pression capillaire dans la pâte de ciment (Hammer 2002).

Le développement de la pression capillaire à l'intérieur des matériaux cimentaires est très important pour la compréhension du phénomène de retrait plastique (Radocea 1990). La pression capillaire ne dépend pas uniquement de la teneur en eau du béton, mais aussi de la distribution de la taille des pores du milieu granulaire humide et des conditions de séchage. Donc plus l'espace, entre les particules, est petit, plus la dépression pour une évaporation donnée est importante.

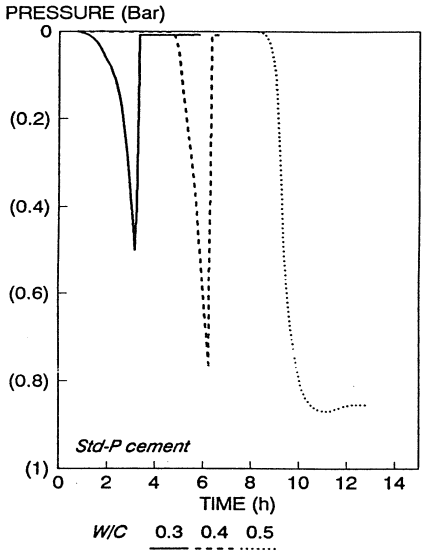


Figure I-18: L'évolution de la pression capillaire suivant le rapport E/C (Radocea 1990)

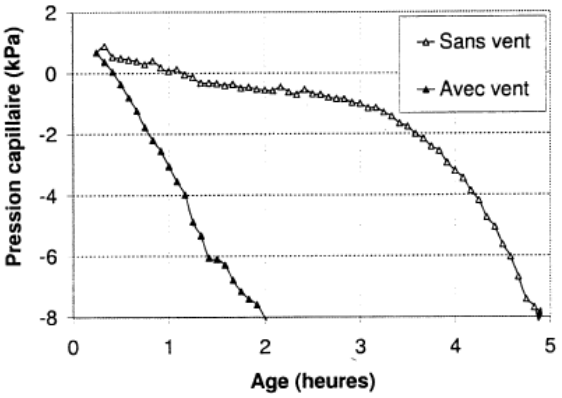


Figure I-19: Pression capillaire avec et sans vent (Turcry 2003)

Le développement de la dépression capillaire à l'intérieur du béton provoque un état de contrainte hydrostatique qui entraine un rapprochement des grains les uns par rapport aux autres (figure I-15). L'eau des pores qui s'évapore, est remplacé par de l'air. L'air pénètre dans le système poreux, en commençant par les plus gros pores. L'entrée d'air dans le milieu poreux rend le système instable et amorce la fissuration du béton frais (Slowik and al. 2008).
A cet instant, la pression capillaire a dépassé la pression d'entrée d'air.

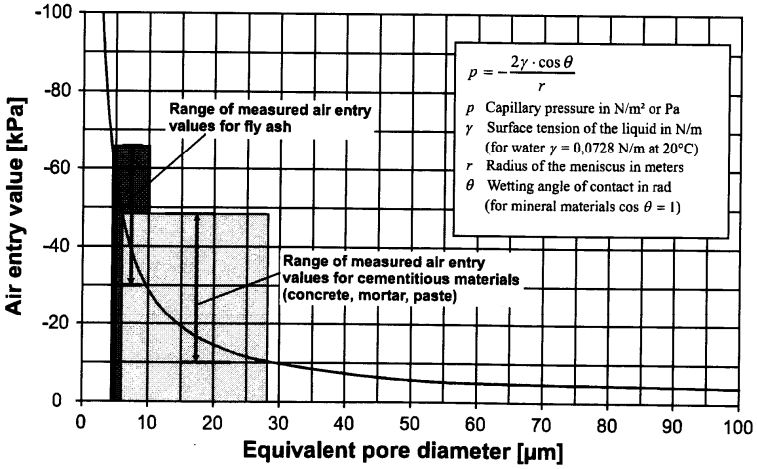


Figure I-20: Les valeurs d'entrée d'air par rapport au diamètre des pores (Slowik 2008).

Diverses méthodes d'essais permettent d'évaluer la pression capillaire à l'intérieur du matériau :
La méthode d'essai utilisée par Radocea (1994) pour l'obtention des valeurs de pression d'eau, à partir des éprouvettes de béton, est basée sur le fait que l'eau, les grains de ciment et agrégats sont incompressibles et que n'importe quelle force agissant sur l'eau de mélange ou les particules pleines, doit provoquer une augmentation ou une diminution de pression de l'eau.

La pression est relevée à partir d'un tube remplie d'eau reliée à un capteur de pression. La pression capillaire maximale mesurée, dépend de la stabilité de l'eau des ménisques, qui est en contact avec le tube et la surface de l'échantillon.

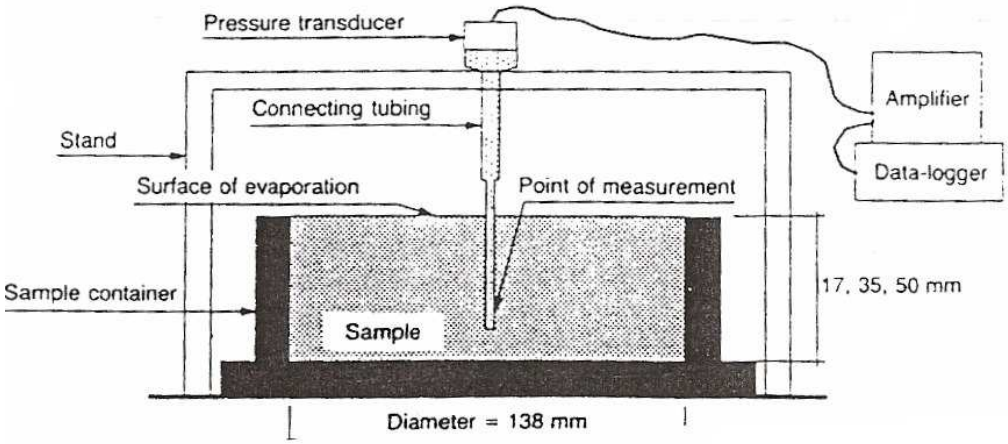


Figure I-21: Appareil de mesure de la pression capillaire (Radocea 1990)

Une méthode beaucoup plus récente, est celle utilisée par Turcry (2004) et Bernier (2006). Elle fait usage de céramiques poreuses, noyées dans le béton, qui sont reliées à des capteurs de pression. Le capteur et le tube reliant capteur et céramiques sont remplis d'eau désaérée avant l'essai.

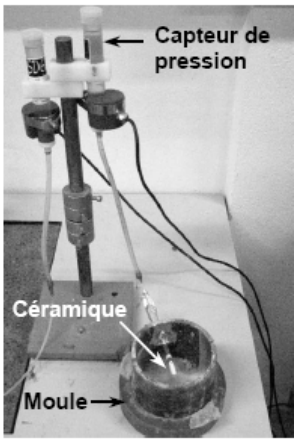


Figure I-22 : Dispositif de la mesure de la pression capillaire (Turcry 2004).

Slowik (2008) a mesuré simultanément la conductivité électrique et la pression capillaire au sein du matériau afin de détecter l'entrée d'air. La conductivité électrique est mesurée à l'aide d'un capteur constitué de plusieurs électrodes en acier inoxydable sous forme d'anneaux. La pression capillaire est mesurée parallèlement à la surface de l'échantillon à différentes profondeurs (figure I-23). La pression capillaire est mesurée par de petits capteurs de pression

reliés au système de pores par un tube de 3 mm de diamètre et de 20 cm de long, rempli d'eau déionisée.

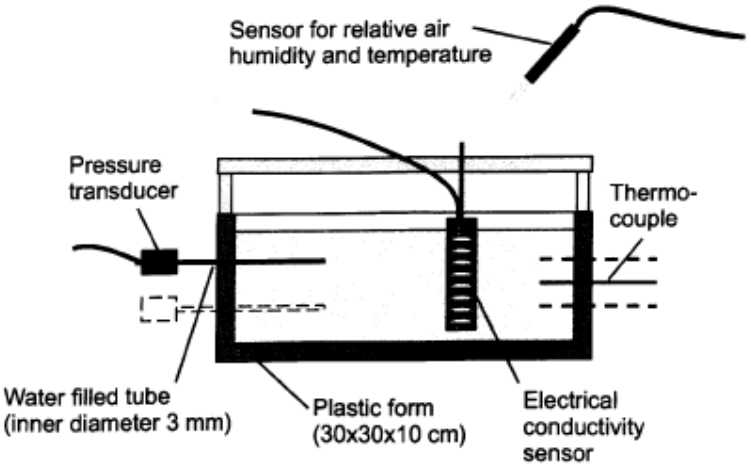


Figure I-23: Dispositif de mesure de la pression capillaire et de l'entré d'air (Slowik 2008)

Au début des mesures, on observe uniquement de petites variations de la conductivité électrique (figure I-24). Le taux d'avancement des réactions chimiques est faible. L'entrée d'air s'accompagne d'une forte augmentation de conductivité électrique (figure I-24).

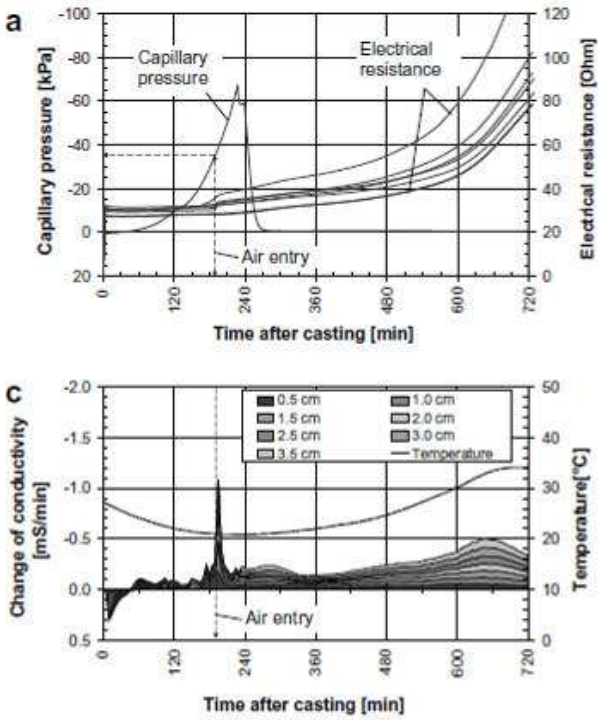


Figure I-24: Détection de l'entré d'air dans des pâtes de ciment (Slowik 2008)

I.1.3. Les déformations plastiques de matériaux cimentaires

Au très jeune âge, les déformations du béton frais sont principalement influencées par l'évaporation, qui dépend des conditions environnementales telles que la température de l'air ambiant, l'humidité relative et la vitesse du vent (Uno 1998) et également de la distribution poreuse du mélange granulaire humide (Cohen Menashi 1990). Le retrait plastique, provoqué par l'évaporation de l'eau à la surface du béton frais, est une déformation qui se produit avant durcissement (Almusallam 2001; Holt and al. 2004; Radocea 1994; Wittmann 1976). C'est un mécanisme identique à celui qui se produit dans les sols fins ou argileux des zones de marnage lorsque l'eau se retire (Mbemba 2007 ; Perron and al. 2006). Ce retrait, d'origine exogène, se manifeste tant que le béton est plastique (avant et/ou au tout début de la prise), et dès que le béton est en déséquilibre hydrodynamique avec le milieu ambiant.
Des travaux récents ont montré que le risque de fissuration au très jeune âge est un problème complexe qui n'est pas uniquement lié aux déformations plastiques du béton frais. Le risque de fissuration existe lorsque la dépression capillaire dans le béton dépasse la pression d'entrée d'air. A cet instant, de l'air pénètre dans le béton frais et le système devient instable (Slowick and al. 2008; Slowick and al. 2009).

I.1.3.1. Evolution des déformations plastiques lors du séchage

Comme nous l'avons évoqué précédemment, certains matériaux subissent un fort retrait volumique au cours du séchage. Ce retrait ou cette déformation est la conséquence d'une évolution de la structure solide qui comble les espaces laissés par le liquide évaporé.
Cette contraction de la structure solide dépend aussi de ses propriétés mécaniques.
L'exposition d'une structure en béton à une humidité relative environnante, inférieure à celle régnant au sein du matériau est à l'origine d'un déséquilibre hygrométrique, qui se traduit par un mouvement de l'eau de l'intérieur du matériau vers l'extérieur. D'où le séchage de celui-ci. La prise en compte du transport de l'eau au sein du béton est d'une grande importance pour les matériaux à matrice cimentaire. En effet, la teneur en eau affecte l'évolution des déformations de retrait (De Sa 2007).
Le séchage provoque un retrait volumique qui évolue linéairement avec la quantité d'eau évaporée jusqu'à ce que la structure solide se consolide. Cette consolidation se traduit par un arrêt ou un ralentissement du retrait et par l'apparition à la fois de la texture et de la structure poreuse (Chemkhi 2008).
Lorsque la variation du volume est égale au volume d'eau évacuée, le retrait est qualifié d'idéal. C'est un phénomène local à l'échelle du matériau. La variation de teneur en eau dans le matériau au cours du séchage induit des déformations, qui se traduisent par l'apparition de contraintes au sein de la structure. Les contraintes générées deviennent plus intenses : le matériau oppose alors plus de résistance à sa contraction, suite à la mise en tension de la phase liquide, liée au développement de la pression capillaire.

La mise en tension de la phase liquide a pour conséquence le transport d'eau de l'intérieur vers l'extérieur conformément au gradient de pression (Scherer 1990 ; Léonard 2002 ; Cáceres Salazar 2006). Le cas extrême de résistance à la contraction correspond à l'apparition de fissure.

L'évolution des déformations au cours du séchage se décompose en trois périodes qu'il ne faut pas assimiler aux phases de séchage (Chemkhi 2008) :

- **En début de séchage**, la teneur en eau à la surface est inférieure à celle au cœur du matériau. La surface se contracte alors que le cœur garde sensiblement ses dimensions. Cet état de déformation provoque une mise en traction de la surface compensée par une compression au cœur.
- **La deuxième période** débute lorsque le retrait en surface n'évolue plus. La couche de surface n'évolue plus alors que le cœur continue de se contracter. Le cœur applique donc un effort de compression sur la surface et cette dernière un effort de traction sur le cœur.
- **La troisième période** correspond à la fin du séchage où la teneur en eau est faible et l'intensité des contraintes diminue. Dans certains cas, les contraintes générées sont suffisamment intenses pour provoquer une déformation plastique.

I.1.3.2. Le retrait au très jeune âge (avant et/ou pendant la prise) : définition

Le retrait au très jeune âge (retrait plastique) est défini comme une contraction du béton à l'état frais. Il a lieu lorsque la pâte de béton se trouve dans la phase plastique. Le processus physique entraînant le retrait plastique des matériaux cimentaires, se développe à partir de la pression hydraulique dans la phase liquide du matériau.

Au très jeune âge, la principale cause du retrait pour les ciments portland, est liée à la perte rapide d'eau (par évaporation) à la surface du béton, vu le manque d'eau ressuée pour remplacer l'eau évaporée, laissant ainsi apparaître des fissures à la surface du matériau (Bentz 2008 ; Lerch 1957, Turcry and al. 2006).

Toute variation de la température ou de l'humidité relative du matériau ou la combinaison des deux paramètres ajoutée à la vitesse du vent, accélèrent le retrait du béton jeune.

Cependant, certaines études expérimentales montrent que ces fissures peuvent survenir quelque temps après la mise en place du matériau seulement, c'est-à-dire avant tout retrait important (Ho and al. 1987).

On distingue trois types de retrait au très jeune âge, lorsque le béton est à l'état plastique :

- **le retrait endogène** : les recherches déjà menées sur le retrait endogène montrent que c'est un phénomène majeur pour tous les bétons présentant une compacité élevée et une distribution poreuse fine. Le retrait endogène, d'origine physique, est lié à l'autodessiccation qui est une conséquence de l'hydratation.
- **Le retrait thermique** : Les réactions d'hydratation étant exothermiques, on observe un dégagement de chaleur qui augmente la température du béton. Cette élévation de

température provoque dès le début de prise une dilatation pendant que le béton est encore déformable. L'augmentation de la température entraîne une accélération de l'hydratation par thermoactivation ce qui stimule la vitesse de production de chaleur (Acker and al. 2004).

- **Le retrait de dessiccation** qui est lié à la perte d'eau à la surface du matériau (retrait dont il question dans toute notre étude).

I.1.3.3 La mesure des déformations plastiques

Les techniques de mesures sont en général de deux types : la mesure volumique et la mesure linéique.

➢ Essais existants : le retrait libre

- *Essai de type « volumétrique »*

La mesure volumique est surtout utilisée dans le cas endogène (Loukili and al. 2000 ; Mitani 2003 ; Mounanga 2003). Elle ne rentre pas dans le cadre de notre étude.

- *Essai de type « linéique »*

La mesure linéique a fait l'objet de plusieurs études (BjØntegaard 2004 ; Cabrera and al. 1992, Slowik and al. 2008 ; Turcry 2003).
Le principe de cette technique consiste à enregistrer les variations dimensionnelles d'une éprouvette prismatique de pâte de ciment, ou de mortier, ou de béton, dans une direction horizontale (généralement la plus longue). Le retrait est exprimé sous la forme :

$$\varepsilon(t) = \frac{(L_t - L_0)}{L_0} \qquad \textbf{(I.5)}$$

Avec :
L_t : la longueur de l'éprouvette à l'instant t de la mesure
L_0 : la longueur initiale.

Les dispositifs expérimentaux (figure I.24) utilisés dans ce cas, ont l'avantage de permettre l'étude du retrait endogène et exogène (séchage).

Lorsque la surface de l'éprouvette de pâte de ciment, de mortier, ou de béton, est laissée à l'air libre ou en ambiance contrôlée, le déplacement ($L_t - L_0$) correspond au retrait "total". Ce retrait total est la somme du retrait de séchage et du retrait endogène.
Le dispositif expérimental représenté figure I.25 est un dispositif de mesure sans contact (contact entre le béton frais et le capteur) du retrait plastique. Le dispositif est composé d'un moule prismatique dont les parois intérieures sont couvertes d'une feuille de téflon pour minimiser le frottement ente le moule et l'éprouvette (Turcry 2003).
Avant de couler le béton dans le moule dont les deux extrémités sont percées en leur centre d'une ouverture circulaire, deux plaques minces en PVC sont collées sur les faces intérieures des deux extrémités du moule. Les ouvertures circulaires aux deux extrémités du moule permettent aux deux sondes laser d'enregistrer les déplacements des deux plaques minces de PVC lorsque l'échantillon de mortier se rétracte. Ainsi, les variations de longueurs de l'échantillon sont obtenues assez facilement. L'utilisation de laser permet d'éviter tout contact entre le béton frais et le capteur. La précision de mesure est de l'ordre de 2 µm. Bien que cette technique de mesure sans contact du retrait plastique soit élégante, elle ne donne qu'une déformation à la mi-hauteur de l'échantillon et ne rend pas compte du retrait plus important à la surface.

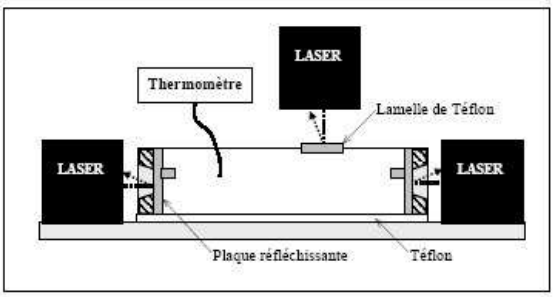


Figure I-25 : Dispositif expérimental pour la mesure du retrait linéique (Turcry 2004).

Slowik (2008) a mené ses expériences dans un moule en plastique de dimensions 30x30x10 cm. Deux capteurs de déplacement (dépourvus de ressort) servent à mesurer le déplacement horizontal entre les formes et les marqueurs qui sont situés sur les côtés et noyés dans l'échantillon. Un capteur supplémentaire a été disposé verticalement pour mesurer le tassement de l'échantillon (Figure I-26)
Le retrait plastique est une déformation qui se manifeste tant que le béton est plastique, c'est à dire avant et/ou pendant la prise sous l'effet d'une dessiccation (Messan 2006). Ce type de retrait se manifeste essentiellement sur des pièces minces (enduit, dalles, revêtement routiers). L'évaporation d'eau vers l'extérieur du béton résulte de la variation uniforme ou non de son humidité interne et a une influence sur son comportement mécanique. La variation est dite uniforme lorsque les gradients d'humidité sont nuls dans tout le volume du matériau et, est dite non uniforme dès lors qu'il se crée un gradient hydrique.

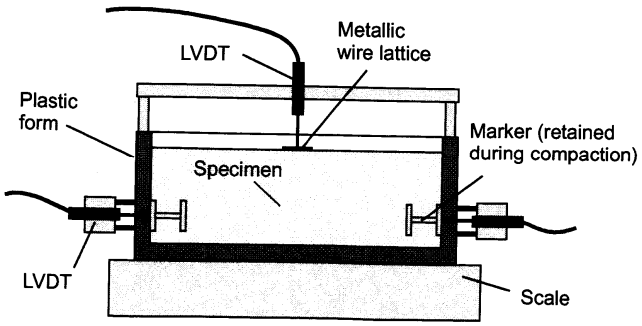


Figure I-26: Dispositif expérimental pour la mesure du retrait plastique (Slowik 2008)

Les déformations induites par cette évaporation qu'elle soit uniforme ou non s'accompagnent généralement d'une augmentation de la pression capillaire (Andriamanantsilavo and al. 2003 ; Turcry 2003). Le retrait plastique est donc fonction de la pression capillaire. Il en résulte une fissuration superficielle de l'ouvrage.

La figure I-27 présente un exemple de résultats obtenu par Messan 2006, sur trois essais issus d'une même formulation. Une légère dispersion est observée sur les trois courbes. Ce phénomène s'explique par la forte sensibilité du retrait plastique à toutes variations aussi faibles soient-elles de la température et/ou de l'humidité relative. Ces variations pourront affecter sensiblement la cinétique du séchage et par conséquent la cinétique et l'amplitude du retrait plastique. L'écart entre ces résultats ne dépasse guère 10% de la valeur moyenne.

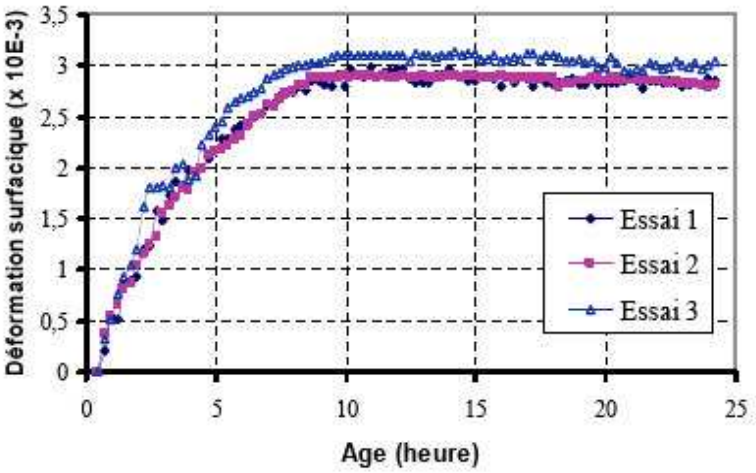


Figure I-27: Reproductibilité de la mesure du retrait plastique des mortiers (Messan 2006)

Lorsqu'une circulation d'air (5 m/s) est appliquée sur l'échantillon, La cinétique du retrait n'est quant-à-elle pas changée (Turcry 2003). Seule l'amplitude des déformations diffère selon les conditions de séchage. Cependant en absence de vent, le retrait plastique est diminué.

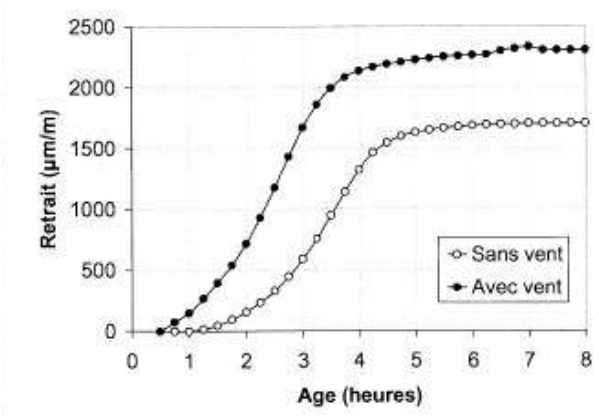


Figure I-28: Retrait plastique des mortiers avec et sans vent (Turcry 2003).

➢ Essais existant : le retrait empêché ou gêné

Les mesures du retrait libre décrites précédemment nécessitent la connaissance préalable du temps de prise afin de pouvoir isoler les déformations d'autodessiccation. Le but étant de déterminer, de manière plus fiable, l'instant d'apparition d'une contrainte interne à partir d'un « temps zéro », préalablement défini.
Cette contrainte interne traduit un changement de la microstructure du matériau. La mesure de cette contrainte nécessite cependant le recours à des dispositifs de mesures plus complexes, qui sont capable de bloquer ou empêcher les déformations de retrait au fur et à mesure de leurs apparitions.
Ce retrait empêché se traduit alors par la génération d'une contrainte induite qui correspond à l'effort exercé pour annuler les déformations (Haouas 2007). Plusieurs essais de retrait empêché ont été ainsi mis au point selon la géométrie l'éprouvette étudiée.

- *Essais de type « linéique »*

Durant l'essai, l'éprouvette est coulée dans un moule dont une seule extrémité est fixe, l'autre restant amovible. A cette extrémité amovible est alors attaché un système de chargement mécanique couplé à un dispositif de mesure des déformations.
Alors, au fur et à mesure que l'éprouvette se déforme, le système mécanique exerce une force opposée à ce mouvement, pour faire revenir l'extrémité amovible à sa position initiale, annulant ainsi toute déformation. (Figure I-29). Cependant la difficulté majeure de ce type de procédé reste la complexité du système de chargement avec le développement continu du retrait au fur et à mesure du durcissement du matériau.

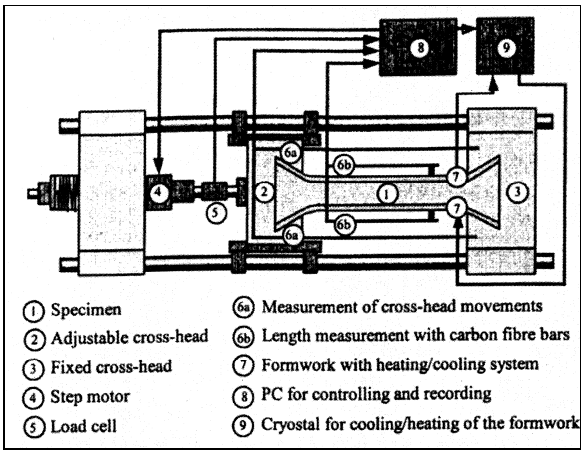


Figure I-29: Banc d'essai d'un système de mesures de retrait empêché linéaire (Springenschmid and al. 1994).

- *Essais à l'anneau*

Ce dispositif d'essai a été mis au point pour observer la fissuration des bétons. Au départ, un anneau de béton était coulé autour d'un noyau rigide en matériau métallique. Le dispositif étant conçu, non pas, pour déterminer l'âge de fissuration d'un matériau, mais pour contrôler le degré de restriction appliqué au matériau. Au fur et à mesure que le béton durcit, l'éprouvette se contracte, mais l'anneau intérieur métallique s'oppose à cette contraction (Mounanga 2003). Ce système à été progressivement amélioré par la suite, en utilisant un anneau rigide afin de mieux contrôler le processus de fissuration, cette fois-ci.

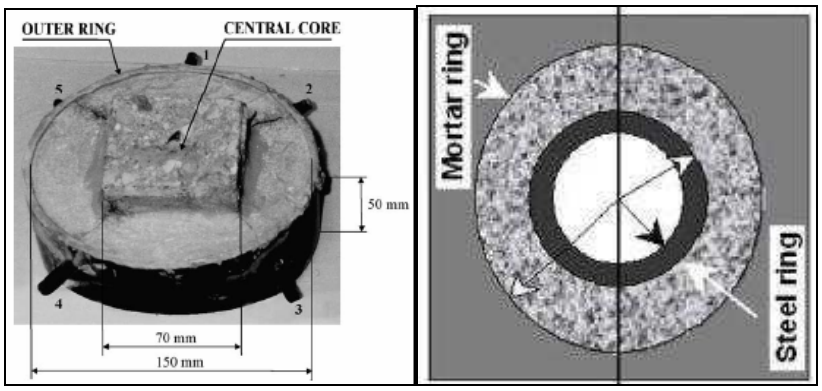


Figure I-30: Anneau de fissuration (Toledo and al. 2005).

I.1.4. La relation entre le retrait plastique et la fissuration

L'importance du retrait dans les structures en béton est essentiellement rattachée à la fissuration. La contraction d'une pièce provoque des tensions internes qui tendent à s'opposer au sein du matériau. Ces tensions internes sont dues à des obstacles internes tels que les granulats, et le retrait non uniforme dans l'élément de béton (plus important près de la surface que vers l'intérieur où il peut être négatif, c'est à dire gonflement). Les contraintes de traction qui résultent de ces obstacles et de ces gradients de déformations peuvent atteindre la résistance du béton à la traction et donc causent la fissuration du béton.
Ainsi, la durabilité des ouvrages, fortement dépendante de la qualité du béton, est remis en cause, et en particulier de la zone d'enrobage. C'est en effet au travers de la porosité que peuvent migrer des agents agressifs (sulfates, chlorures, dioxyde de carbone,… etc.) susceptibles d'interagir avec les constituants du ciment et de provoquer l'apparition de désordres. Néanmoins, la compacité des bétons ne peut, à elle seule, être garante de la bonne tenue dans le temps. En effet, la manifestation de phénomènes de fissuration ouverte dans la zone d'enrobage peut augmenter les propriétés de transfert des bétons, aussi compacts soient-ils, et ainsi nuire à leur durabilité. Dans cette optique, la maîtrise de la fissuration précoce des bétons, liée aux phénomènes de retrait, apparaît essentielle (Buffo-Lacarrière 2007).

A l'échelle des hétérogénéités du matériau, les granulats empêchent localement le retrait. Les déformations ainsi localement empêchées, créent un système de contraintes pouvant provoquer une microfissuration (Figure I-31).

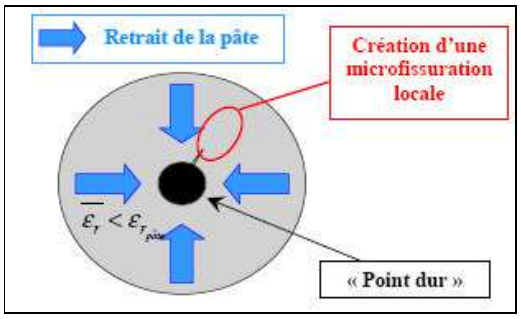


Figure I-31: Effet d'un granulat sur le retrait du matériau et sur la microfissuration induite (Buffo-Lacarrière 2007).

A échelle de la structure, les déformations plastiques peuvent être liées à des facteurs extérieurs (fondations). Les désordres engendrés sont alors la combinaison de ces déformations et de l'évolution des propriétés mécaniques du béton.
Les effets de structures peuvent être également à l'origine d'une fissuration précoce dans le cas de singularités de géométrie.

Dans la littérature, la fissuration précoce est liée à la capacité de déformation du matériau. Car les fissures apparaissent lorsque le retrait plastique dépasse la capacité de déformation du matériau. Cette dernière est définie comme la déformation maximale supportée par le matériau à l'état plastique (phase durant laquelle la capacité de déformation diminue).
La diminution de la capacité de déformation est associée à l'évaporation de l'eau ou la formation progressive des hydrates durant l'hydratation.

Cependant les études menées sur la capacité de déformation du béton frais sont très peu fréquentes, pour la simple raison que non seulement, la modélisation des déformations à l'état plastique du matériau, reste complexe à cause d'un changement important du matériau au très jeune âge, mais aussi à cause de la difficulté d'exercer une traction sur un béton frais.
Il faut souligner que l'utilisation de la capacité de déformation comme un critère de fissuration peut paraître très ambigüe, selon qu'il s'agisse d'une fissuration de retrait plastique lié au séchage ou d'une caractérisation d'un endommagement interne au sein du matériau lors d'une sollicitation extérieure (Buffo-Lacarrière 2007, Messan 2006). Bien que certains chercheurs admettent que la fissuration est susceptible d'apparaître en absence de toutes sollicitations extérieures (Baghabra Al-Amoudi and al. 2004).
Quelques dispositifs expérimentaux ont été développés pour mesurer la capacité de déformation du béton frais sur la base d'un essai de traction (Hammer 2002).

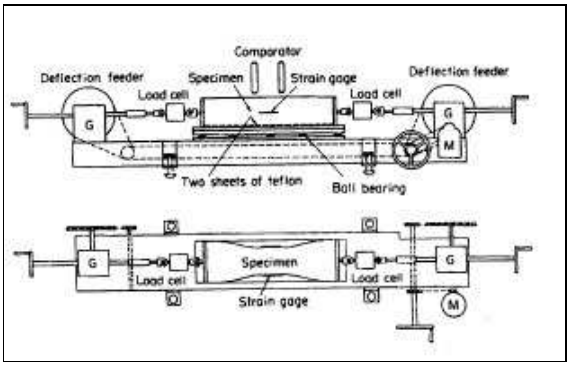


Figure I-32: Dispositif de mesure de la capacité de déformation du béton frais (Hammer 2002).

Indépendamment de la mesure de capacité de déformation, d'autres chercheurs se sont dirigés sur des études purement qualitatives de la fissuration prématurée des matériaux cimentaires.
Ces études sont consacrées à la détermination d'une part de l'âge de fissuration du matériau, et d'autre part sur l'aire totale des fissures. Généralement la mesure du flux d'évaporation du matériau, en cours de séchage, est associée à ces mesures. A l'état frais, sous certaines conditions venteuses et/ou de fortes températures, le flux d'évaporation trop important, engendre des fissures précoces et instantanées à la surface du matériau.
Parmi les nombreux dispositifs existant dans la littérature, un des dispositifs expérimentaux le plus rencontrés, pour la fissuration est celui à l'anneau. (Figure I-33)

La rigidité de l'anneau empêche le retrait de la matrice cimentaire. Les entailles placées à la périphérie de l'anneau permettent d'initier la fissuration, beaucoup plus rapidement par excès de traction (Turcry 2004).

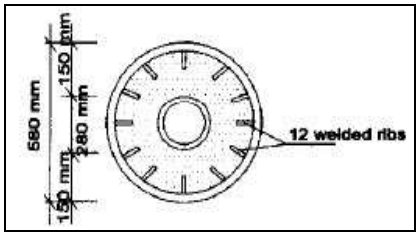


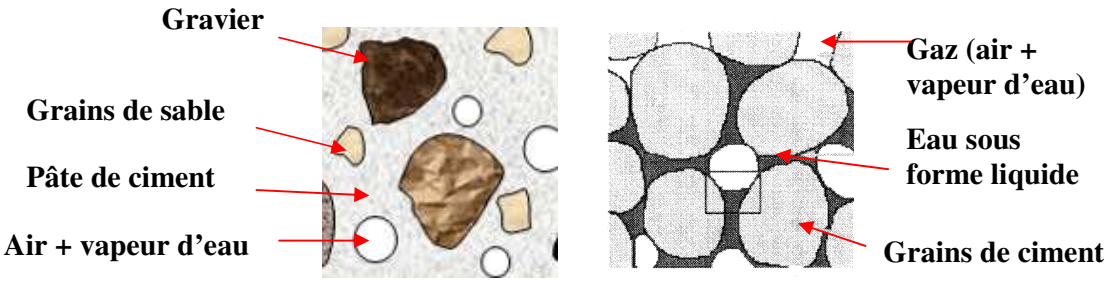
Figure I-33 : Anneau de fissuration (Hammer 1998).

I.1.5. Analogie du comportement des bétons avec celui des sols cohérents

La vie d'un béton commence lors de l'introduction de l'eau dans le malaxeur. Au moment du gâchage, le béton frais est un mélange granulaire humide constitué de grains de différentes tailles. Il s'agit donc d'un système composé de particules entre lesquelles s'intercalent des espaces vides remplis d'eau ou d'air ou d'une combinaison de ces deux éléments. On peut donc assimiler le béton frais à un sol cohérent.

La description physique des sols, qui est semblable celle des bétons, présente généralement trois phases (figures I-33 et I-34) :

- la phase solide ou squelette granulaire est un mélange de grains de formes et tailles diverses.
- La phase liquide est faite d'eau interstitielle qui peut circuler librement ou être liée aux grains.
- La phase gazeuse contient un mélange d'air et de vapeur d'eau. Elle est inexistante dans le cas d'un sol saturé en eau.



(**a**) : l'échelle du béton (**b**) : à l'échelle de la pâte de ciment

Figure 34: Représentation schématique des différentes phases dans le béton (Haouas 2007).

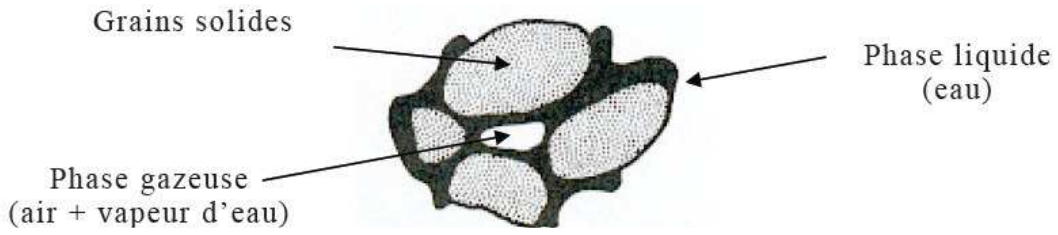


Figure 35: Représentation schématique des différentes phases dans le béton (Renon 2002).

Le comportement du béton est similaire à celui observé pour les sols fins soumis à la dessiccation (Devillers and al. 2009).

La dessiccation des sols fins est liée à l'évaporation du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment dans le séchage, l'évaporation en elle-même se déroule au niveau d'interfaces gaz-liquide. Il s'agit d'un changement de phase qui entraîne un transfert net de matière de la phase liquide vers la phase gazeuse. Il s'accompagne d'une consommation d'énergie correspondant à la chaleur latente de vaporisation du liquide évaporé. L'évaporation est donc accompagnée de transport de matière et d'énergie dans le milieu poreux, liés à différentes forces motrices (comme illustré sur la figure I-36).

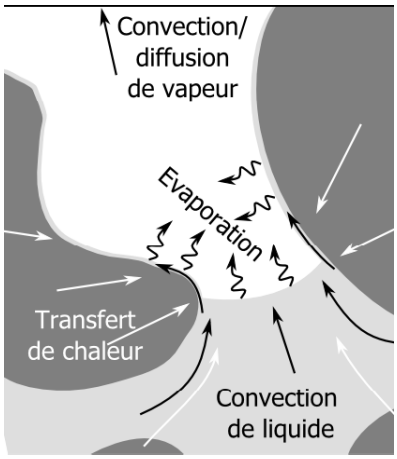


Figure I-36: Schématisation des flux intervenant lors de l'évaporation (Debaste 2008).

Le phénomène de dessiccation se traduit par l'apparition des fissures à la surface du matériau dans certains cas. Comme pour le béton, l'apparition de fissure en surface est liée à l'entrée d'air dans le système poreux du matériau. La transition entre le comportement saturé et le comportement non saturé, est déterminée à partir de la courbe caractéristique sol/eau, (Devillers and al. 2009).

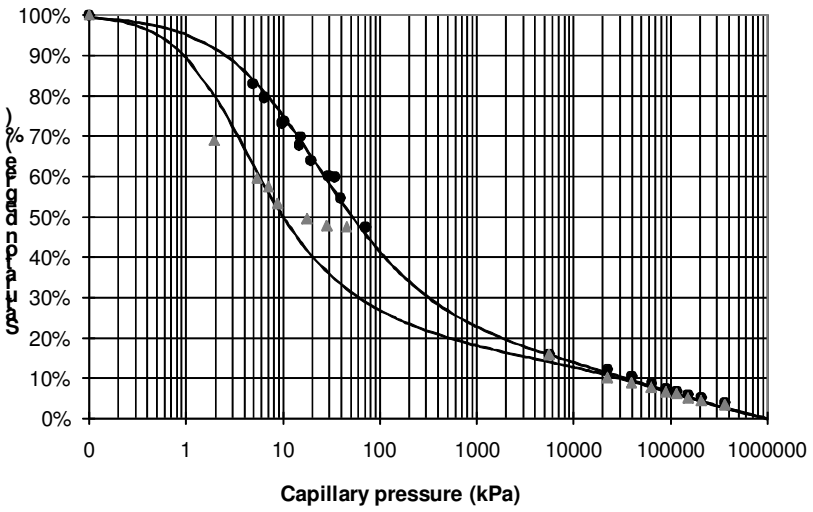


Figure I-37: Courbe caractéristique sol/eau d'un sable limoneux argileux (Devillers et al. 2009).

Un exemple de ce type de courbe est donné à la figure I-37 pour un sable limoneux argileux avec un système d'axes semi-logarithmique dans lequel il est possible de la linéariser par morceaux. Les points expérimentaux situés en dessous de 100 kPa de pression capillaire ont été obtenus à l'aide d'un appareil de type « boite de Richards ». Pour les pressions capillaires supérieures à 100 kPa, les points expérimentaux ont été obtenus à partir de la courbe d'équilibre hygroscopique en désorption ou isotherme de désorption. Pour les sols incompressibles, la courbe de séchage montre de faibles variations de teneur en eau aux faibles pressions capillaires et des diminutions de teneur en eau très rapide aux fortes pressions capillaires. Le point à partir duquel la teneur en eau commence à diminuer significativement indique la pression d'entrée d'air du sol. La linéarisation par morceaux de la courbe de séchage permet de définir la pression d'entrée d'air voisine de 2 kPa pour le sable limoneux argileux (figure I-37). Celle de la courbe d'imbibition permet de définir la pression d'expulsion d'air voisine de 1 kPa pour le sable limoneux argileux (figure I-37). Les pressions d'entrée ou d'expulsion d'air sont liées à la taille du plus gros pore, elles peuvent atteindre 1000 kPa ou plus pour certains sols argileux. Une augmentation de la teneur en eau initiale du sol se traduit par une diminution de la pression d'entrée d'air. Ceci peut être attribué à des pores de plus grande taille dans le sol contenant plus d'eau. La densité initiale sèche a un effet similaire : lorsque la densité apparente sèche augmente, la taille des pores diminue et la pression d'entrée d'air du sol augmente.

Pour les sols compressibles, la courbe caractéristique sol/eau ne permet pas de déterminer la pression d'entrée d'air. En effet, lors du séchage, toute diminution de la teneur en eau s'accompagne d'une augmentation importante de la pression capillaire. Il n'est donc pas possible d'identifier la pression d'entrée d'air à partir de la seule courbe caractéristique sol/eau. Dans ce cas, la courbe de retrait du sol doit être utilisée simultanément avec la courbe caractéristique sol/eau pour déterminer la pression d'entrée d'air. Péron et al. (2009) ont réalisé des essais à la « boîte de Richards » sur un silt sableux de la région de Bioley en Suisse

(w_L=31,8 %, w_p=16,9 %) dont tous les grains de diamètres supérieurs à 90 µm ont été retirés. La figure I-38 donne les résultats de ces essais. On constate que les changements de volume total et de volume d'eau provoqués par l'augmentation de la pression capillaire sont égaux jusqu'à ce que la teneur en eau atteigne 22%. La courbe de retrait pour des teneurs en eau supérieures à 22 % est confondue avec la droite de saturation. En dessous de 22%, de l'air pénètre dans le système et la courbe de retrait s'éloigne de la droite de saturation. En reportant cette teneur en eau de 22% sur la courbe caractéristique sol/eau, on obtient une valeur de la pression d'entrée d'air voisine de 100 kPa. Péron and al. (2009) ont montré que la fissuration de ce limon intervenait au voisinage de la pression d'entrée d'air. Ils ont également montré que la plus grande partie des déformations a lieu lorsque le matériau est saturé, ou au voisinage de la saturation (figure I-38).

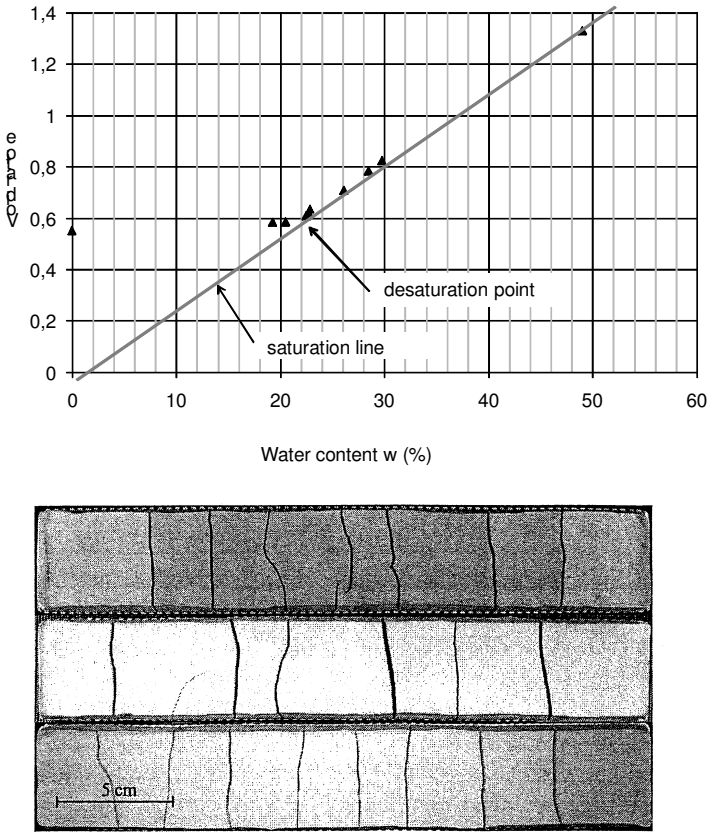


Figure I-38: Courbe de retrait d'un silt sableux (d'après Péron et al. 2009).

I.2. La cure du béton : une prévention contre la fissuration précoce

Le béton frais qui sort du malaxeur est un matériau essentiellement plastique, capable d'absorber des déformations relativement importantes pendant quelques heures, ce qui permet d'assurer son transport, sa mise en place…etc.
Hormis, les accidents mécaniques bien connus (déformations de coffrages), les principaux risques encourus par le béton jeune sont de plusieurs natures mais essentiellement liés aux conditions environnementales :

- retraits précoces résultant du départ d'eau de gâchage,
- les dilatations thermiques ou au contraire des contractions au refroidissement (liées aux conditions climatiques),
- une dessiccation sévère qui risque d'altérer les qualités du béton en surface.

Les risques de déformations du matériau étant importants, il est pour cela important que les concepteurs soient bien avertis sur les précautions à prendre, il n'en est généralement pas toujours de même au niveau de l'exécution sur les chantiers. Il est à ce sujet surprenant de constater que nombre de textes réglementaires sont insuffisants sur ces exigences fondamentales pour la durabilité des bétons.

I.2.1. Définition

On entend par cure du béton tout procédé susceptible de maintenir une humidité et une température favorables à l'hydratation du ciment, durant une période bien définie (3 à 7 jours). Elle permet au béton de développer les propriétés requises, telles que, la durabilité, la résistance au gel/dégel, la résistance en compression, …etc (ACI 1997, Bombled 1984).

Dans la littérature, la cure est définie en termes de durabilité (fascicule 65 du Cahier des Charges des Clauses Techniques Générales, relatif à l'exécution des ouvrages en béton armé ou précontraint, et annexe A de la norme EN 13670):

- La cure doit être appliquée dès que possible ; elle est continue et homogène.
- La durée d'application dépend de plusieurs paramètres :

Ambiance : Classe I - à l'abri du vent et du soleil - hygrométrie≥ 80%.
Classe II – cas différents des classes I et III.
Classe III – hygrométrie<50%, soit vent fort ou ensoleillement important.

Température (Moyenne sur 2 jours, à midi sous abri) :
T< 5°C, si pas de protection isotherme, cure tant que T< 5°C.
5°C ≤T≤ 10°C, durée variant de 1 à 10 jours.
T>10°C, durée variant de 0 à 5 jours.

Des précautions particulières sont à prendre lorsque les éléments sont conservés en ambiance chaude (T ≥ 25°C) ou froide (< 5°C).

L'objectif de la cure est de prévenir la perte d'eau du béton et, si nécessaire, l'approvisionnement en eau supplémentaire et de maintenir une température favorable au matériau pour une période de temps suffisante, pour bien s'hydrater (ABQ 2005 ; ACI 308 2001). Si la quantité d'eau initialement contenue dans le béton (eau de gâchage) parvient à maintenir une hydratation suffisante pour le développement des propriétés mécaniques du béton alors une cure est nécessaire pour s'assurer que cette eau de gâchage reste dans le béton jusqu'à ce que les propriétés recherchées soient atteintes. La cure est nécessaire dès que le béton est soumis au séchage car le séchage peut entraîner des dommages au béton ou empêcher le développement des propriétés requises.

I.2.2. Le rôle de la cure vis-à-vis du phénomène de dessiccation

I.2.2.1. Les besoins de la cure

La cure est entreprise dès que le matériau commence à sécher en surface, c'est-à-dire dès que l'eau disponible en surface s'évapore trop vite (AL-Fadhala and Al. 2001 ; Kosmataka 1994 ; Lerch 1975). La cure doit être maintenue jusqu'à ce que le séchage n'engendre pas de dommages à la surface du béton, et jusqu'à ce que l'hydratation ait progressé, afin que le matériau continue à se structurer même en absence de cure.
Dans ces conditions on comprend que le béton frais doit être protégé pendant un temps suffisant, après sa mise en place, pour limiter une évaporation trop importante, pouvant engendrer une hydratation incomplète et par conséquent amorcer l'apparition de fissures.

La nécessité de protection du béton frais est d'autant plus impérieuse que le risque de dessiccation est grand, surtout avant la prise où une évaporation trop rapide peut entraîner d'importantes fissures de retrait plastique et donc une perte de résistance près de la surface (Acker and al. 2001)
Le graphe ci-dessous (figure I-39) montre l'évolution des pertes de masse moyennes d'un béton sans et avec cure (usage d'un produit de cure).
On observe une importante évaporation les cinq premières heures qui suivent la période de gâchage, pour le béton non protégé. Une très faible évaporation est observée pour le béton protégé par le produit de cure. Cette évaporation trop rapide, observée au niveau du béton non protégé, est caractéristique d'une dessiccation sévère.
Ainsi, les départs d'eau au jeune âge, liés à la température, l'humidité du béton, la vitesse du vent, et la température de l'air, ne permettent pas de maintenir dans le béton l'humidité nécessaire au bon processus d'hydratation (Balayssac and al. 1997 ; El Dieb 2006).
L'évaporation trop prématurée de l'eau se traduit d'abord par une augmentation du retrait plastique (retrait avant prise) qui peut être considérable lorsque la vitesse de dessiccation est élevée (turbulence de l'air).

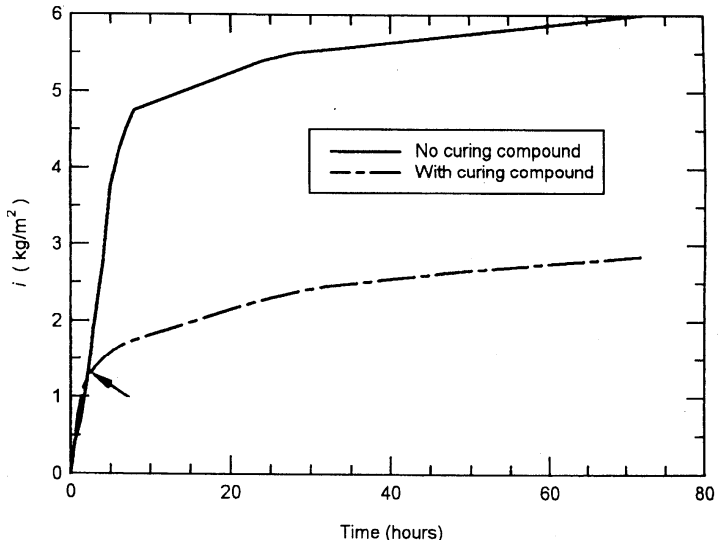


Figure I-39: Evolution de l'évaporation suivant le mode cure (McCarter and al. 2001)**.**

On remarquera sur la figure I-40 que le retrait plastique peut être décuplé par le passage d'un vent à une vitesse de 30 km/h. Le même béton protégé par une cure convenable voit son retrait plastique limité dans une plage beaucoup plus faible (nul en atmosphère calme, il ne dépasse pas dans le cas d'un vent de 30km/h, l'ordre de grandeur trouvé en air calme en l'absence de cure) (Bombled 1984).

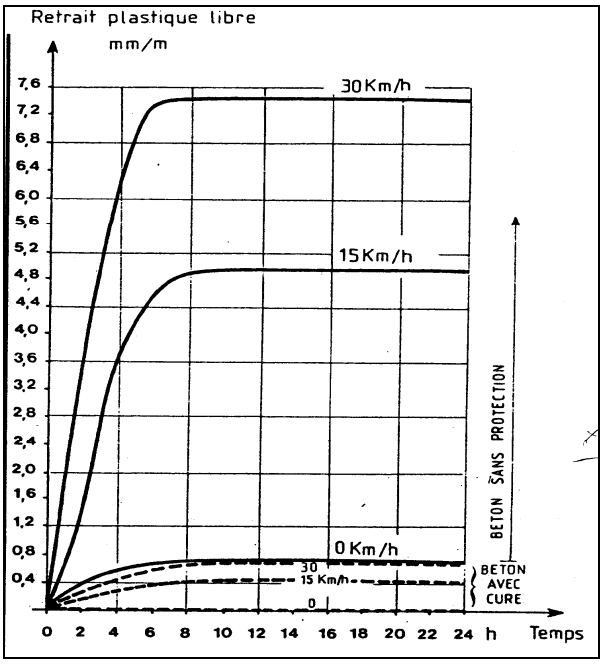


Figure I-40 : Influence du vent sur le retrait plastique (Bombled 1984).

Lorsque la surface est humide, l'eau est absorbée à l'intérieur du béton par capillarité, cette absorption dépend de plusieurs facteurs. L'intérêt de procéder à une cure du béton réside dans le fait de minimiser les gradients de teneur en eau et de température, qui provoquent des tractions du béton de peau.
Lorsque le béton est fluide, ce dernier ne peut alors reprendre ces tractions, qui risqueraient, par la suite de conduire à une fissuration précoce du matériau.
La cure a été traditionnellement considérée comme une seule étape, réalisée peu de temps après que le béton ait été mis en place. Le contrôle de l'humidité au sein du matériau, cependant, peut exiger différentes étapes qui sont entreprises lors de la cure (ACI 308-R).

I.2.2.2. Les différentes étapes du déroulement de la cure

Trois étapes distinctes dans la cure sont définies par les techniques utilisées (figure I-41) :

- la cure initiale, c'est-à-dire la cure avant la prise, visant à réduire la perte d'eau trop rapide en surface.
- la cure intermédiaire, est réalisée avant la fin de prise. Pendant cette période l'évaporation est réduite et la structuration du matériau se poursuit.
- la cure finale fait référence à la fin de prise.

Dans le cadre de notre étude, seule la cure initiale sera étudiée, c'est à dire avant prise, période durant laquelle le matériau sèche rapidement. Sous de telles conditions, il est nécessaire de réduire la perte d'eau soit par des techniques de cure, ou bien en modifiant l'environnement dans lequel est exposé le matériau.
L'application d'une cure initiale est très fréquente chez des bétons qui présentent un faible ressuage voir même négligeable, afin de minimiser l'apparition de fissures liées au retrait plastique.
On limitera ici la notion de cure à la protection (et aux techniques de protection) contre la dessiccation du béton frais. Les procédés d'isolation du béton contre le froid et le gel n'entrent donc pas dans le cadre de cette étude.

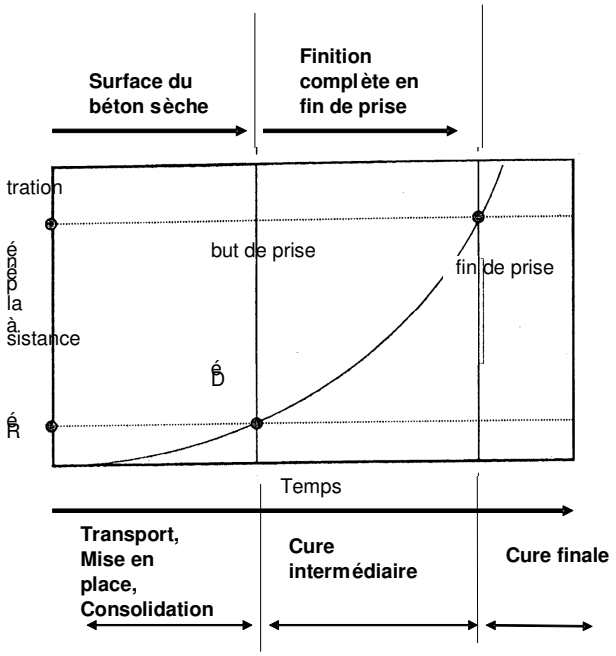


Figure I-41 : Différentes étapes de la cure des bétons pour des opérations de construction sous des conditions idéales (ACI 308R, 2001)

I.2.2.3. Les différents procédés de cure du béton

Plusieurs méthodes de cure sont utilisées sur le chantier, parmi lesquelles, on distingue:

- La cure à l'eau

L'utilisation de l'eau comme produit de cure du béton correspond à une solution très satisfaisante du point de vue technique. Slowick (2008), lors de son étude menée sur le développement de la pression capillaire dans les matériaux cimentaires, humidifiait la surface du béton frais avant que la pression d'entrée d'air ne soit atteinte. Ainsi, il évitait la fissuration précoce du matériau en surface tout en contrôlant la cure. Les procédés de cure directe par l'eau sont satisfaisants si la présence d'eau est continuelle. Plusieurs procédés existent :

- **l'arrosage continuel** qui constitue une cure excellente s'il n'y a pas de risque de gel. La pulvérisation d'un brouillard. La vapeur d'eau peut être utilisée à la pression atmosphérique pour maintenir un film d'humidité au contact du béton (Figure I-42).
- **L'immersion de la pièce** supprime tout risque de dessiccation ou de défaut d'hydratation. L'eau ne devant pas être beaucoup plus froide que le béton pour éviter de provoquer des contraintes trop importantes donc des risques de fissuration.

- **L'utilisation de toiles, paillassons, tous revêtements absorbant** est possible mais il faut encore veiller à leur propreté. La fréquence de réhumidification de la couverture diminue lorsque sa rétention d'eau augmente.
- L**'usage de matériaux fins humides** (sable) tout en vérifiant qu'ils ne contiennent pas de substances pouvant retarder la prise du ciment.

➢ La cure par des matériaux d'étanchéité

- **L'usage de produits de cure** consiste à former à la surface un film s'opposant à la dessiccation. Avec un temps de séchage rapide, ces produits offrent une protection efficace pendant 3 à 4 semaines (Figure I-43).
- **L'usage de feuilles étanches**, tel un film plastique, appliqué à la surface humide du béton frais, et doit recouvrir toutes les faces exposées du matériau, puis lesté de manière à rester au contact du béton pendant toute la durée de la cure (figure I-44).
- **Le maintien des coffrages** en place permet d'éviter une grande évaporation à la surface du béton, une fois le béton coulé. (Figure I-45)

Figure I-42: Arrosage continue

Figure I-43: Pulvérisation du produit de cure à la surface du béton.

Figure I-44: Usage d'un polyane recouvrant la surface du béton.

Figure I-45: Maintien des coffrages en place

I.2.3. Importance et nécessité de la cure

I.2.3.1. La fragilité du béton frais

A sa sortie du malaxeur, le béton est essentiellement plastique et donc capable de subir des déformations relativement importantes pendant quelques heures (la période dite « dormante »). L'évolution de la résistance au cisaillement de la pâte interstitielle des bétons, à partir de la fin du malaxage, est présentée sur la figure I-46. Les courbes représentatives en fonction du temps présentent deux phases de la vie de la pâte de ciment en cours d'hydratation, bien distinctes (Bombled 1984) :

- la première phase qui comprend la prise est caractérisée par l'ébauche des liaisons ; elle dépend de la teneur en eau, de la composition granulométrique et du serrage. Cette phase correspond à un matériau plastique car les liaisons sont faibles et permettent facilement des déformations permanentes.
- La seconde phase est la phase de consolidation des liaisons, le matériau est de moins en moins déformable et de plus en plus fragile.

Sur la représentation de la figure I-47, la capacité de déformation du matériau diminue très rapidement pour atteindre de faibles valeurs, puis augmente avec l'accroissement des résistances. Pendant cette période le coefficient de dilation passe de celui du béton frais (≈ 35µm/m) à celui d'un béton durci (≈ 12 µm/m) c'est-à-dire trois fois moins.

Les influences climatiques rendent fragile le béton frais et jouent un rôle très important sur le risque de dessiccation du béton frais (température de l'air ambiant, hygrométrie, vitesse de vent). A titre d'exemple, en absence de vent, si la vitesse d'évaporation est, pour une ambiance de 20°C et à 80% hygrométrie, de l'ordre de 10 g/m²/h, elle sera environ 200 fois plus élevée par exemple dans une atmosphère sèche, chaude et ventée correspondant à 35°C, 40% hygrométrie et pour une vitesse de vent de 25 km/h.

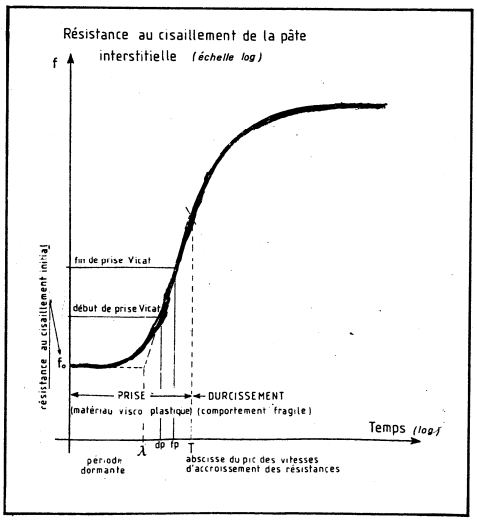


Figure I-46 : Evolution de la pâte interstitielle du béton frais (Blombed 1984)

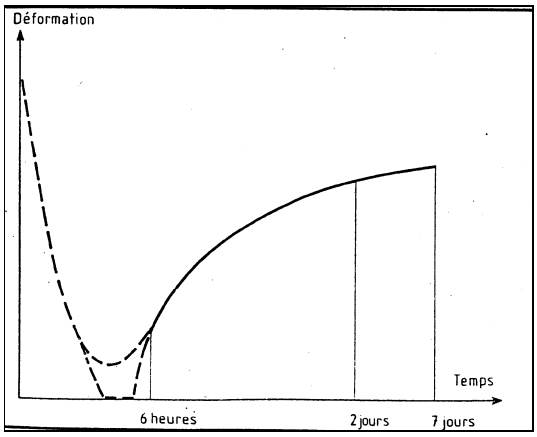


Figure I-47 : Evolution de la capacité de déformation en atmosphère humide (Blombed 1984)

I.2.3.2. Les défauts de cure

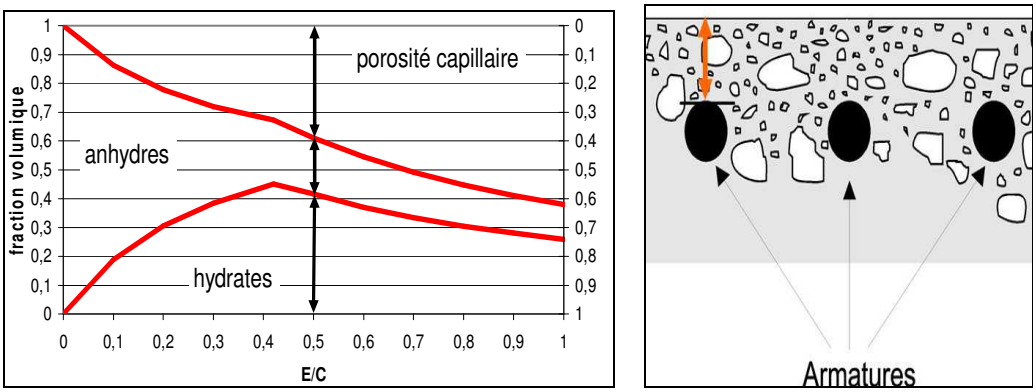
- La fissuration de béton de surface

Une dessiccation précoce peut entraîner certains défauts de cure. Afin de s'assurer que les propriétés requises du béton soit bien atteintes, et de limiter ses déformations plastiques, il est alors nécessaire de maîtriser ces départs d'eau trop rapide, en procédant à une cure, que l'on peut définir comme un procédé permettant de limiter une évaporation trop importante en surface.
Car le départ d'eau en surface entraîne un développement de la pression capillaire qui pourrait impliquer un risque de fissuration de l'ouvrage (Bushlaibi and Alshamsi 2002).

Figure I-48 : Fissure de retrait de plastique.

- L'hydratation insuffisante du béton

Une dessiccation prématurée est à l'origine de l'arrêt de l'hydratation. Lorsque que l'hydratation n'est pas suffisante, la porosité capillaire est beaucoup plus importante (Modèle de Powers (1968), figure I-49). Dans le cas par exemple d'un rapport E/C=0.5, la porosité capillaire est de 39% contre 20% d'anhydres. En proportion l'effet est plus marqué pour des rapports E/C plus faible. Cette porosité plus ouverte rend le matériau sensible aux agents agressifs, à l'usure du matériau (l'altération du béton d'enrobage à long terme).



(a) *(b)*

Figure I-49 : Modèle de *POWERS* (***a***) et l'altération du béton d'enrobage (***b***) (Presses des Ponts et chaussées 2008)

I.3. Conclusion de l'étude bibliographique

Les recherches actuelles menées sur les matériaux cimentaires (pâtes de ciment, mortiers, très peu les bétons), avant et pendant la prise, portent principalement sur le processus d'hydratation et la caractérisation des contraintes et des déformations. Ces études ont montré que plusieurs paramètres interviennent et agissent de manière importante sur l'évolution de la microstructure du matériau. Principalement, les conditions environnementales (la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse de l'air), les conditions de cure et la composition du mélange (la teneur en eau, la porosité).

L'hydratation entre le ciment et l'eau, caractérisée par une réaction complexe, peut être étudié à l'échelle macroscopique, à partir du degré d'hydratation. Elle est à l'origine de l'évolution de la microstructure hétérogène, identique à un milieu poreux évolutif composé d'une matrice solide et d'un réseau poreux.

Sur le plan mécanique, la diminution de la porosité pendant l'hydratation influe sur le comportement du matériau. L'évolution volumique de la matrice solide ne dépend que de l'eau et du ciment, car les granulats sont supposés être non réactifs au très jeune âge. La proportion des hydrates augmente avec l'hydratation, d'où une consommation d'eau libre, en plus de celle de l'évaporation superficielle, présente dans le réseau poreux.

C'est une des raisons pour lesquelles, il est primordial d'éviter une perte trop importante d'eau en surface, pour permettre une hydratation complète du matériau et donc faciliter la formation des hydrates nécessaires à la structuration du matériau. D'où l'importance de procéder à une cure du matériau. Car le départ d'eau en surface entraine un développement de la dépression capillaire qui pourrait impliquer un risque de fissuration de l'ouvrage (ACI 1998 ; Acker and al. 2001).

Sur le plan physique, les variations dimensionnelles de la structure à l'état plastique, sont liées aux différents mécanismes à l'origine de la dessiccation.

Les mécanismes à l'origine du retrait au jeune âge ainsi que les différentes techniques de mesures présentés dans ce paragraphe, mettent en évidence la fissuration du béton à l'état frais, liée à certaines conditions environnementales. Ces mécanismes de retrait sont encore aujourd'hui à l'étude. Ces études ont montré que le risque de fissuration précoce est plus élevé sur des ouvrages présentant une grande surface d'évaporation par rapport au volume. Dans la littérature certains auteurs ont relié la fissuration prématurée du béton, non pas seulement à la formation des hydrates, mais en grand partie au retrait plastique.

Cette fissuration prématurée des matériaux à matrice cimentaire constitue un problème d'actualité qui nécessite une grande attention dans la mesure où les fissures plastiques remettent en cause la durabilité et/ou la pérennité de l'ouvrage.

Les études menées sur la fissuration précoce ont montré que le retrait plastique n'est toutefois qu'un facteur de fissuration.

La capacité de déformation, qui est une caractéristique du matériau, conditionne l'apparition des fissures, bien que l'utilisation de ce critère de déformation reste ambiguë dans l'étude de la fissuration précoce.

Les problèmes de fissuration au très jeune âge plus fréquents, ont contribué ces dernières années au développement de procédures expérimentales, permettant d'étudier le comportement du matériau dans les premières heures qui suivent le contact entre les grains de ciment et l'eau (Almusallam 2001 ; Baron J 1992 ; Barrouillet 1989 ; Debruyne 2005).
Ce travail de recherche tente de mettre en lumière l'influence du séchage et de la cure sur le comportement des bétons à l'état plastique, en vue de pouvoir limiter, par la suite, le risque de fissuration précoce.

La particularité de cette étude réside dans le fait qu'elle se concentre sur l'influence du séchage et de la cure, vis-à-vis du comportement du béton, à partir d'un système de ventilation crée à cet effet.
Dans notre étude, un programme expérimental basé sur l'évolution des déformations plastiques du béton, soumis à différentes conditions de séchage et différents modes de cure, a été réalisé. La partie expérimentale de ce travail repose sur des essais de mesures de déformations (retrait plastique) et sur l'étude de phénomènes corollaires (la pression capillaire, la perte de masse et l'estimation du début de prise Vicat).
Chaque type d'essai est destiné à rendre compte des phénomènes physiques et mécaniques de nature différente :

- la dépression capillaire (pour l'état de contrainte interne du matériau), liée à un départ d'eau en surface,
- la prise Vicat permet de juger de l'état de structuration du matériau,
- les déformations plastiques (obtenues par les essais de retrait et de fissuration).

Un banc d'essais a été mis en place pour trois formulations de béton différentes (E_{eff} /C=0,60, E_{eff} /C=0,45 E_{eff} /C=0,35) suivant des conditions environnementales bien définies (T=20°C, HR=50%), et différentes conditions de séchage (avec et sans vent) et trois modes de cure (le film plastique, le produit de cure et l'absence de cure).

CHAPITRE II : OUTILS EXPERIMENTAUX POUR L'ÉTUDE DES DÉFORMATIONS PLASTIQUES DES BÉTONS

II.1. La campagne d'essai pour l'étude du comportement du béton frais

II.1.1. La composition des bétons

L'importance de la cure et des conditions de séchage, comme nous l'avons vu précédemment, mettent l'accent sur l'évaporation de l'eau à la surface du matériau et sur l'hydratation de la pâte de ciment ainsi que les différents paramètres qui influent sur cette dernière. Un ensemble de moyens expérimentaux est mis en œuvre afin de mieux évaluer le comportement du béton au très jeune âge.

II.1.1.1. Les constituants du béton

Les bétons sont formulés avec les constituants suivants (annexe A, p.139) :

- Le liant

Le ciment Portland CEM 1 52.5 N CE CP2 NF, qui provient de l'usine de production de Ciment Calcia à Beaucaire, est utilisé dans toutes les formulations de béton étudiées. Les principales caractéristiques du ciment, sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Densité	Surface spécifique (m²/kg)	Début de prise (min)	Chaleur à 41H (J/g)	Demande en eau (%)	Caractéristiques des constituants (%)			
					C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
3.14	***359***	***140***	***374***	***28.4***	***68.5***	***11***	***8.9***	***8.8***

Tableau II-2: Les caractéristiques du ciment.

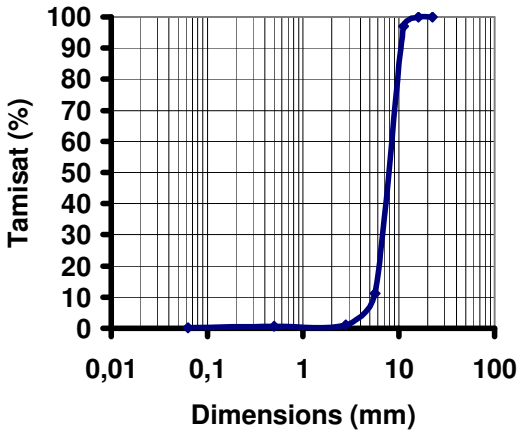
- Les granulats

- Le gravier :

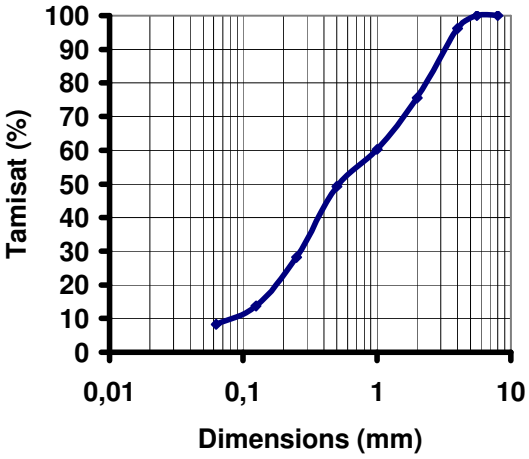
Le gravier est un silico-calcaire, constitué de gravillons naturels, dont la granulométrie est de 5.6/11.2 mm, avec une densité de 2.56 et un coefficient d'absorption de 1.3%. La figure II-48 montre la distribution de la taille des grains dans le gravier.

- Le sable :

Sable silico-calcaire, constitué de granulats recomposés dont la classe granulaire est 0/4 mm, avec une densité de 2.62 et un coefficient d'absorption de 0.8%. La courbe granulométrique est représentée sur la figure II-50.



(***a***) : le gravier



(***b***) : le sable

Figure II-50: Les courbes granulométriques des granulats.

- L'adjuvant réducteur d'eau

Pour améliorer l'ouvrabilité du béton, un superplastifiant nouvelle génération, a été utilisé. Le superplastifiant est le Sika Viscocrete Tempo 12, provenant de la société SIKA France. Cet adjuvant non chloré, est constitué de copolymères acryliques. Les principales caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Densité	pH	Teneur en Na_2O Eq. (%)	Extrait sec (%)	Couleur
1.06	***6***	***≤ 1***	***30.2***	***Brun***

Tableau II-3: Les caractéristiques de l'adjuvant.

II.1.1.2. Les formulations de bétons

Le dosage des constituants diffère d'un béton à autre. Le choix de trois bétons différents permet l'étude de l'ensemble des bétons fabriqués actuellement, c'est-à-dire des bétons de bâtiment aux bétons d'ouvrage d'art.

Les formulations de béton sont présentées dans le tableau II-4 ci-dessous.

Constituants	$E_{eff}/C = 0.60$	$E_{eff}/C = 0.45$	$E_{eff}/C = 0.35$
Ciment (Kg)	300	350	400
Sable (Kg)	818	831	828
Gravier (Kg)	1008	1023	1016
Superplastifiant (% pds ciment)	0.4	0.95	1.85
Eau efficace(Kg)	180	158	140
Eau totale(Kg)	199	177	155
Affaissement (cm)	13 (±1)	15 (±2)	15 (±2)
Rc_{28j} (MPa)	35 (±2)	53 (±2)	69 (±3)

Tableau II-4: Formulations de béton.

II.1.1.3. Les caractéristiques des trois bétons à l'état frais

La vie d'un béton commence lors de l'introduction de l'eau dans le malaxeur. Au moment du gâchage, le béton frais est un mélange granulaire humide constitué de grains de différentes tailles. Il s'agit donc d'un système composé de particules entre lesquelles s'intercalent des espaces vides remplis d'eau ou d'air ou d'une combinaison de ces deux éléments. On peut donc assimiler le béton frais à un sol cohérent saturé. En se basant sur une approche de type sol, on peut alors déterminer les caractéristiques physiques des trois bétons frais qui sont données dans le tableau II-5.

La quantité d'air occlus est évaluée à l'aide d'un aéromètre à béton, selon la norme EN 12350-7.

Le volume de pâte est fonction du dosage des constituants qui forment la pâte du béton : le ciment, l'eau et les fines du sable. Il est calculé à partir de la formule suivante :

$$\textbf{Volume de pâte} = \mathbf{V}_{Eau} + \mathbf{V}_{ciment} + \mathbf{V}_{fines\ du\ sable} \qquad (\textbf{II.1})$$

Pour l'étude des sols, on suppose généralement que l'eau interstitielle est incompressible et que la masse de grains solides se conserve. La teneur en eau w, est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{w}= (\text{masse de l'eau/masse des grains solides}) \times 100\% \qquad (\textbf{II-2})$$

On introduit aussi des paramètres sans dimensions définissant l'état de compaction du sol. Il s'agit de l'indice des vides **e** et de la porosité **n** :

e= (Volume des vides/volumes des grains solides) (**II-3**)

n= (Volume des vides/volume total) x100% (**II-4**)

Caractéristiques des formulations	$E_{eff}/C = 0.60$	$E_{eff}/C = 0.45$	$E_{eff}/C = 0.35$
Air occlus (%)	1.1	1.3	1.5
Volume de pâte (L)	301	295	293
Masses volumiques humides (kg/m^3)	2326	2385	2406
Masses volumiques sèches (kg/m^3)	2126	2204	2244
Teneur en eau (%)	9.4	8.2	7.2
Porosité (%)	18	16.3	15
Indice de vides	0.22	0.19	0.17
Temps de début de prise Vicat (heures)	4 (±0,17)	3,4 (±0,10)	3,17 (±0,18)

Tableau II-5 : Caractéristiques des trois bétons frais.

II.1.2. Démarche de l'étude

La partie expérimentale de ce travail repose sur des essais de déformations (retrait plastique, fissuration induite et tassement) et sur l'étude de phénomènes corollaires (la pression capillaire, la perte de masse et la prise Vicat). Les essais réalisés permettent d'apporter des informations sur l'évolution du matériau à l'état plastique.

Les dispositifs expérimentaux ont été conçus pour chaque essai et sont disposés dans une salle régulée en température (20 ±2°C) et en hygrométrie (50 ±4%). Les échantillons peuvent être soumis à plusieurs conditions de séchage.
Pour ce faire des conditions de séchage et des conditions expérimentales ont été préalablement définies, pour chaque formulation étudiée :

- Conditions de séchage

- Avec vent : Les essais sont réalisés dans un tunnel ventilé, régulé en température (T = 20±2 °C) et hygrométrie (HR= 50 ±4%). La vitesse du vent à l'intérieur du tunnel est de 5 m/s, ce qui correspond à 18 km/h.
- Sans vent : les essais sont réalisés hors du tunnel, c'est-à-dire, dans la salle climatisée, régulée en température et en hygrométrie. Dans des conditions sans vent, seuls les bétons non protégés sont étudiés.

➢ Conditions expérimentales

Pour ce faire, une étude expérimentale sur le comportement des bétons aux très jeunes âges a été menée. Trois bétons présentant un volume de pâte, un rapport G/S (G/S=1.23) et une maniabilité identique (Slump : 15 ±3 cm) mais trois rapports E_{eff}/C différents ont été mis au point pour cette étude, afin d'étudier uniquement l'influence du rapport eau/ciment sur les déformations plastiques du matériau. La mise en place du béton dans les moules se fait par vibration :

- à l'aiguille vibrante : uniquement pour les moules de retrait plastique,
- à la table vibrante : les moules de perte de masse, de pression capillaire et de fissuration.

➢ Conditions de cure

Trois modes de cure sont utilisés, dans des conditions avec vent, pour chaque béton formulé:

- Séchage à l'air ambiant.
- Usage d'un film plastique étanche.
- Usage d'un produit de cure commercial en phase solvantée, le MASTERKURE 114 de la société BASF. Immédiatement après arasement et talochage de la surface le produit de cure est appliqué au pulvérisateur à hauteur de 200 g/m². La densité de ce produit de cure est inférieure à celle de l'eau, elle est de 0.84 g/cm^3.

A propos de la reproductibilité des manipulations, les essais ont été répétés au minimum deux fois pour chaque formulation et pour la consistance souhaitée.

II.2. Dispositifs expérimentaux

La compréhension des différents mécanismes de déformations plastiques, décrits dans la bibliographie, passe nécessairement par l'étude du comportement du matériau à partir d'un bon nombre d'essais.
Pour ce faire, le choix des matériaux constituant le béton a été fait au préalable. Par la suite, il a fallu mettre au point différents dispositifs expérimentaux et définir le mode opératoire pour chaque essai à réaliser.

II.2.1. Etude des déformations plastiques et des phénomènes corollaires

II.2.1.1. Dispositif de mesure des déformations plastiques

a)- *Le retrait libre*

Description du dispositif d'essai :

Le choix de la méthode s'est porté sur une méthode linéique, qui permet de déterminer à la fois l'effet du séchage et de l'hydratation sur les déformations plastiques. Le dispositif expérimental est semblable à celui utilisé par Turcry (2006), pendant ses travaux de recherche (figure II-51) :

- Le moule de retrait est un moule prismatique en acier recouvert de téflon, de dimensions 7x7x28 cm. Les deux extrémités sont percées en leur centre d'une ouverture circulaire afin de pouvoir insérer des capteurs de déplacement LVDT.
- A l'intérieur du moule est placée une « chaussette » en plastique, constituée de deux plaques en PVC (dimensions 6.8x6.7x0.4 cm). Coulé à l'intérieur de la chaussette, le béton n'est pas en contact direct avec le moule. Pour limiter les frottements entre le téflon et la chaussette en plastique, l'intérieur du moule est saupoudré de talc.
- Les capteurs de déplacement LVDT utilisés (sensibilité : 7mm/Volt), entraînent les plaques PVC lorsque le béton se rétracte, et permettent de mesurer le déplacement longitudinal à mi- hauteur de l'échantillon. Chaque capteur enregistre le déplacement à mi-hauteur de l'éprouvette. Le retrait obtenu correspond à la moyenne des déplacements enregistrés à mi-hauteur, par les capteurs de déplacement.

L'usage de vis permet une récupération beaucoup plus facile des plaques PVC après décoffrage. Un thermocouple est placé au milieu de l'éprouvette afin de permettre le suivi thermique du béton durant l'essai.

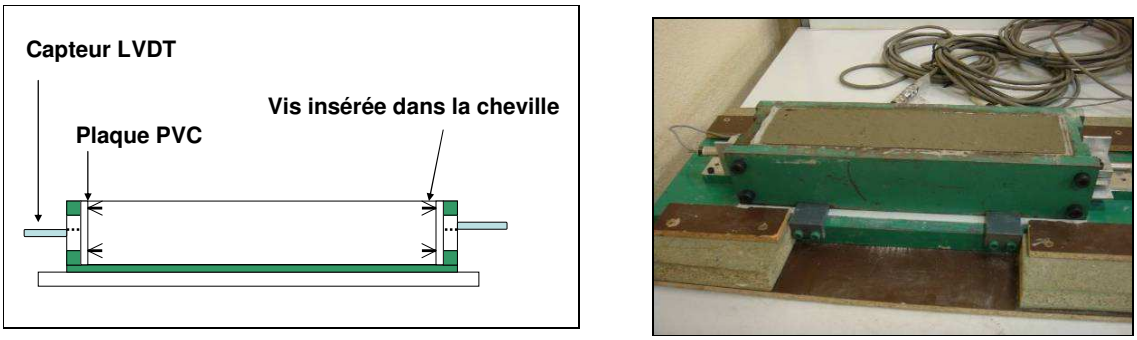


Figure II-51: Schéma et image du dispositif expérimental pour la mesure du retrait plastique.

Calibration de l'essai :

Pour vérifier la reproductibilité de la mesure du retrait plastique, deux éprouvettes issues d'une même gâchée ont été réalisées, les résultats sont présentés sur la figure II-52 suivante :

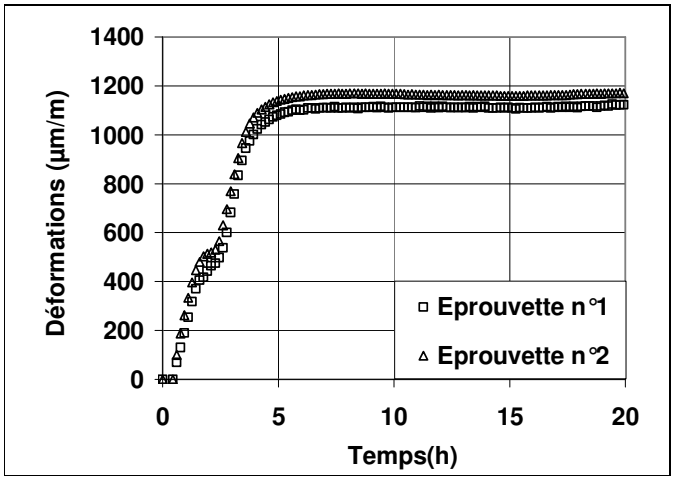


Figure II-52 : Reproductibilité de l'essai.

Une légère dispersion est observée sur les deux courbes. Ce phénomène s'explique par la forte sensibilité du retrait plastique à toutes variations aussi faibles soient-elles de la température et/ou de l'humidité relative.
Ces variations pourront affecter sensiblement la cinétique du séchage et par conséquent la cinétique et l'amplitude du retrait plastique.
On remarque une bonne répétabilité de la mesure, qui pourra être reliée aussi à l'absence de défaut (ouverture de fissure par exemple) à la surface du matériau (figure II-53).

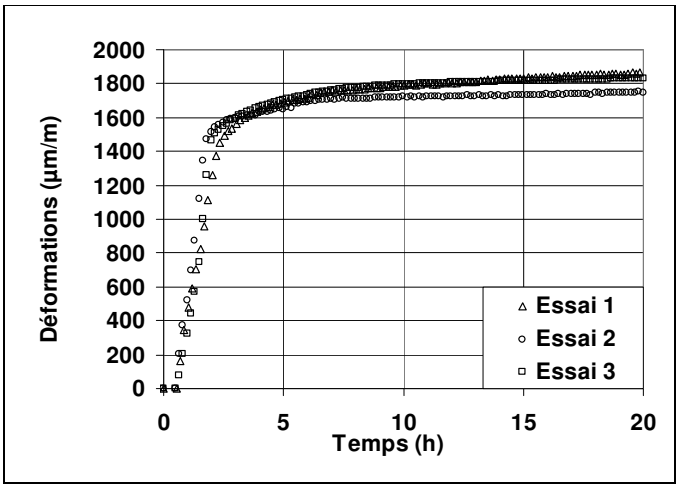


Figure II-53 : Répétabilité de la mesure

b)- *Le tassement*

La mesure du déplacement vertical se fait dans un moule cylindrique Ø16x32 cm. Une fois la mise en place effectuée, un papier filtre est placé à la surface du matériau. Une pierre poreuse (diamètre Ø15 cm), préalablement saturée en eau, repose au-dessus du papier filtre, pour éviter une évaporation trop importante et obtenir des résultats cohérents.
Le plateau métallique surmonte la pierre poreuse et reste à la surface du béton malgré un éventuel ressuage. Le déplacement du plateau rapporté à la hauteur de l'échantillon, et enregistré à l'aide d'un capteur de déplacement LVDT (précision : 5mm/Volt), nous donne le tassement exprimé en µm/m. (figure II-54).

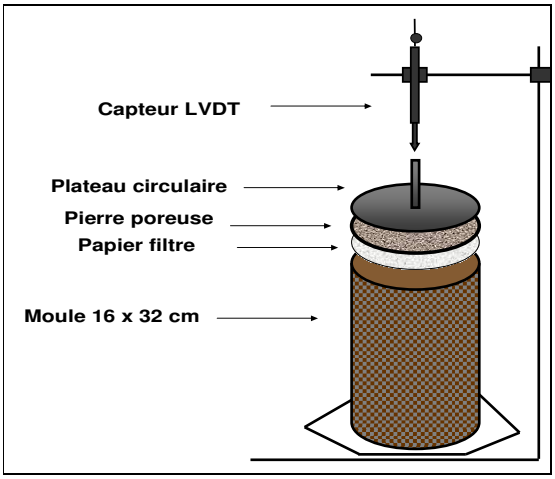


Figure II-54: Mesure du déplacement vertical.

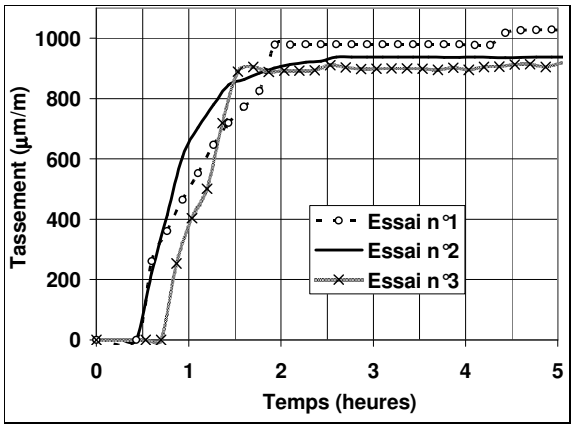


Figure II-55: *Reproductibilité de la mesure du tassement (E_{eff} /C=0.45).*

La figure II-55 montre l'allure des courbes de tassement d'un même béton, mesuré à trois reprises à partir de trois gâchées différentes. La différence observée entre les courbes s'explique par la variation de température ou d'humidité affectant la cinétique et l'amplitude de la déformation. Pour chaque béton fabriqué, trois gâchées voire plus sont donc réalisées pour obtenir un fuseau de courbe.

Lors des essais menés par Turcy (2003) sur les mortiers, la cinétique de retrait a été comparée à celle du tassement. La figure II-56 montre le caractère anisotrope des déformations plastiques. Les vitesses deviennent égales après la prise estimée en moyenne au bout de 3h.
Ce phénomène peut être lié à la mise en place du matériau et à sa maniabilité.
Par conséquent la déformation volumique consécutive au séchage est anisotrope lorsque le matériau est dans sa phase plastique.

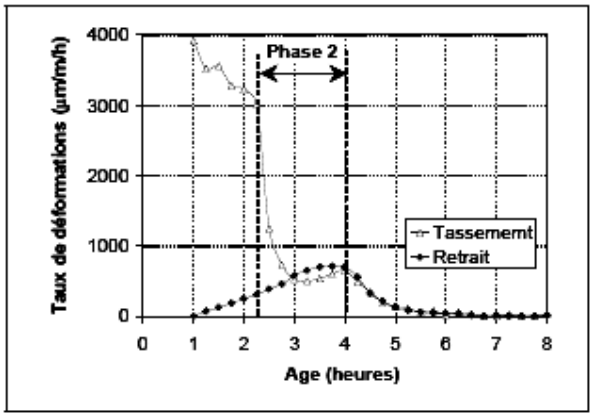


Figure II-56: Comparaison des vitesses de déformations du béton (Turcry 2003).

c)- *Le retrait empêché: l'évaluation de la sensibilité à la fissuration*

Dans l'objectif de suivre l'évolution de la contrainte générée dans le matériau cimentaire lors d'un retrait empêché, des essais dans différents laboratoires ont été développés (chapitre I).

Le retrait empêché est fortement influencé par la géométrie et les conditions de contrainte de la structure, sans oublier les conditions environnementales.
Les techniques des essais à l'échelle du laboratoire sur la fissuration de retrait empêché du béton ont à relever le défi de produire des fissures de retrait plastique dans des échantillons de laboratoire de faible dimension avec des conditions de contraintes suffisamment réalistes.
Les essais de retrait empêché qui ont été adoptés pour la présente étude, sont un dispositif de fissuration utilisé par Soroushian et al. (1998). Il se distingue des autres couramment rencontrés dans la littérature par sa simplicité et son originalité.

Ce dispositif d'essai est un moule prismatique 40x20x7cm. Trois surélévations triangulaires sont placées au fond du moule. Seule la surélévation centrale permet d'initier la fissuration. Les deux surélévations placées aux extrémités produisent des contraintes assez faibles qui n'induisent cependant pas la fissuration (figure II-57). Cette technique fournit des informations quantitatives sur la fissuration des structures minces en béton soumises au séchage.

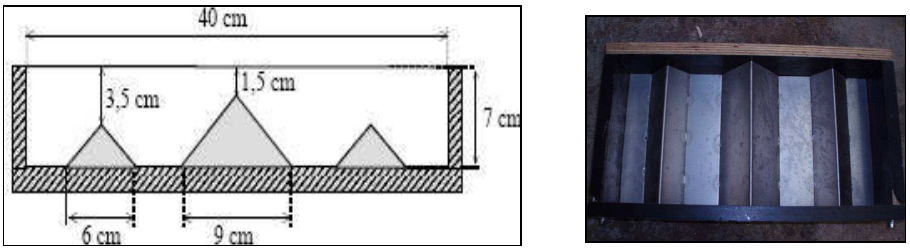


Figure II-57: Vue en coupe et image du dispositif expérimental de fissuration.

Au cours de l'essai, on mesure l'âge d'apparition de la fissure centrale ; puis, huit heures après confection, l'ouverture maximale de la fissure est mesurée, à partir d'une photographie de la fissure, grâce un logiciel de traitement d'image. (Figure II-58).
Ce logiciel de traitement d'analyse d'image (Analysis 3.0 docu) permet à partir de la calibration de l'image à différentes échelles, de déterminer les différents paramètres de l'objet à analyser. Le but étant de mesurer l'ouverture tout le long de la fissure et de ne retenir que l'ouverture maximale.
Les résultats sont ensuite représentés graphiquement afin de pouvoir corréler l'âge d'apparition de la fissure et son ouverture maximale.

Les conditions d'essais relativement sévères (avec vent) et modérées (sans vent) sont nécessaires pour pouvoir produire la fissuration de retrait plastique empêché.
Certaines études estiment qu'aucune évolution substantielle de la fissure n'a été observée après la prise du matériau (Saroushian and al. 1998).

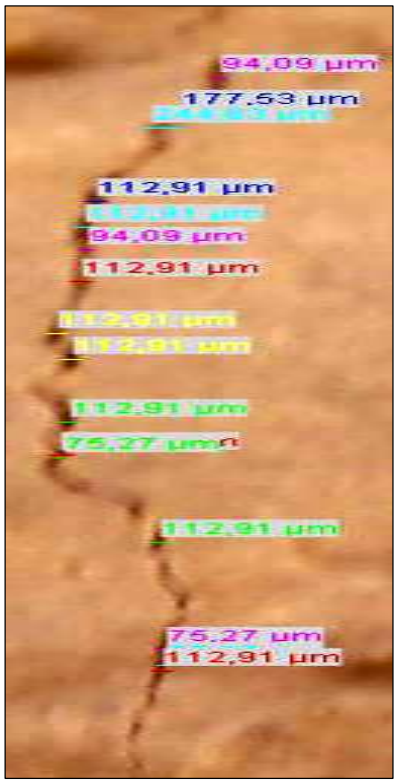


Figure II-58 : Exploitation de la fissure par traitement d'image.

II.2.1.2. Les phénomènes corollaires étudiés

a)- *La mesure de la pression capillaire*

La mesure de la pression capillaire se fait dans un moule cylindrique de diamètre 11 cm et de hauteur 7 cm à l'aide d'un capteur de pression, relié à une céramique poreuse par un tube capillaire. Le capteur de pression est rempli d'eau désaérée. La céramique poreuse est saturée en eau désaérée et noyée dans le béton.

La mesure se termine lorsque la diminution de pression mène à une vaporisation de l'eau interstitielle. La céramique poreuse va alors se trouver en contact avec une phase gazeuse et une phase liquide ; une bulle de vapeur a d'ailleurs tendance à remonter dans le tube capillaire du capteur.

A cette échéance la mesure n'est plus possible (Figure II-60)

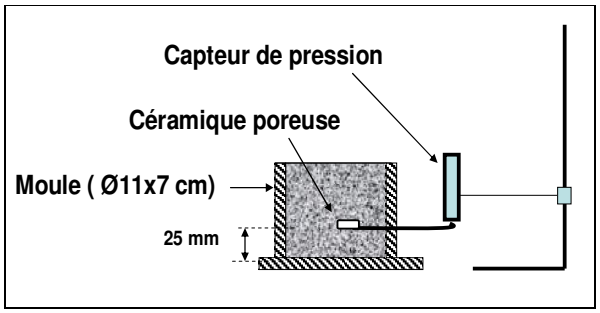


Figure II-59: Schéma du dispositif de la mesure de la pression capillaire.

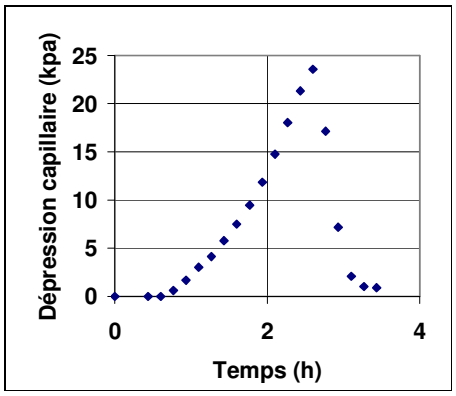


Figure II-60: Evolution de la dépression capillaire dans le temps.

La préparation des céramiques poreuses s'effectue la veille de l'essai, comme suit :

- Collage de la céramique avec un tube capillaire à l'aide de la résine époxy.
- Désaération de l'eau de l'ensemble (céramique + tube capillaire) à l'aide d'une pompe à vide.
- Remplissage du capteur de pression d'eau désaérée à l'aide d'une seringue.

Une fois le remplissage des capteurs terminé, les céramiques poreuses restent immergées dans un tube plastique ou en verre remplie d'eau désaérée jusqu'au début de l'essai.
L'ensemble de la préparation des céramiques poreuses est détaillé en annexe C (p.154).

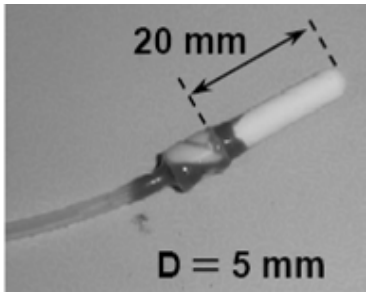


Figure II-61: Céramique poreuse.

Dans un premier temps, la dépression capillaire a été mesurée à différente profondeur du moule, afin de se renseigner sur la continuité de la phase liquide dans le matériau à l'état frais (figure II-62). Cette dernière se développe dans les premières heures qui suivent la période de gâchage.

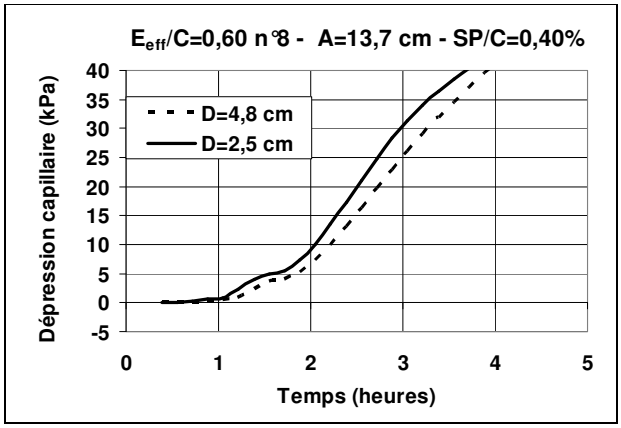


Figure I-62: Evolution de la pression capillaire à 2.5 et 4.8 cm de profondeur.

Les dépressions capillaires mesurées, en présence de vent, à 2.5 cm et à 4.8 cm, de profondeur sont sensiblement identiques malgré l'existence d'un faible gradient de pression lié à l'évaporation. Ce qui signifie une très bonne connectivité des pores du béton avant prise.

b)- *Le suivi de l'évaporation*

Des mesures de pertes de masse ont été effectuées sur des cylindres de diamètre 16 cm et de hauteur 7 cm posés sur des balances enregistreuses. Chaque cylindre offre une surface d'évaporation de 200 cm². L'évaporation est définie par le rapport :

$$E(\mathbf{t}) = [m_0 - m(\mathbf{t})-]/S \qquad (\mathbf{II\text{-}5})$$

Où, m_0 est la masse initiale de l'éprouvette, m(**t**) la masse de l'éprouvette à l'instant t et S la surface d'évaporation égale à 200 cm².

Les vitesses d'évaporation de l'eau dans le béton seront comparées aux vitesses d'évaporation d'une surface d'eau libre, placée dans les mêmes conditions thermodynamiques.

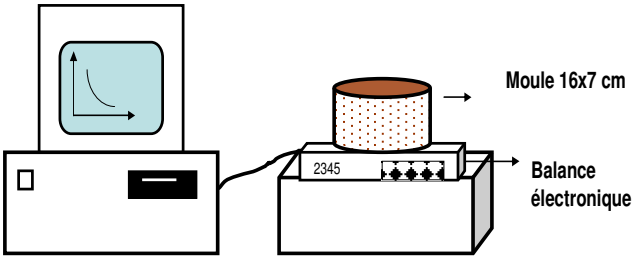


Figure II-63 : Schéma du dispositif de la mesure de la perte de masses.

II.2.2. Estimation du temps de début de prise du matériau

Jusqu'aujourd'hui, il était possible de déterminer le temps de début de prise à l'aide l'appareil de Vicat (figure II-65). Actuellement, il existe dans la littérature, un dispositif de mesure de la prise qui est expérimenté. Il est basé sur la propagation des ondes ultrasonores (ondes de fréquence supérieures à 20 kHz) en cours de prise (figure II-64). Turcry (2003) et Khokar (2010), ont utilisé ce dispositif pour suivre l'évolution de la prise. Le dispositif expérimental permet en particulier, l'enregistrement de l'amplitude de signaux des ondes de compression d'une part, et des ondes de cisaillement d'autre part, et enfin le temps entre émission et réception des deux types d'onde dans l'échantillon (Robeyst, 2009).
Il faut noter que dans le cas de matériau cimentaire, l'onde de cisaillement, qui ne se propage que dans les milieux solides ou très visqueux, n'apparaît que lorsqu'un chemin continu d'hydrates s'est formé entre les grains solides, c'est-à-dire lorsque la prise a commencé.

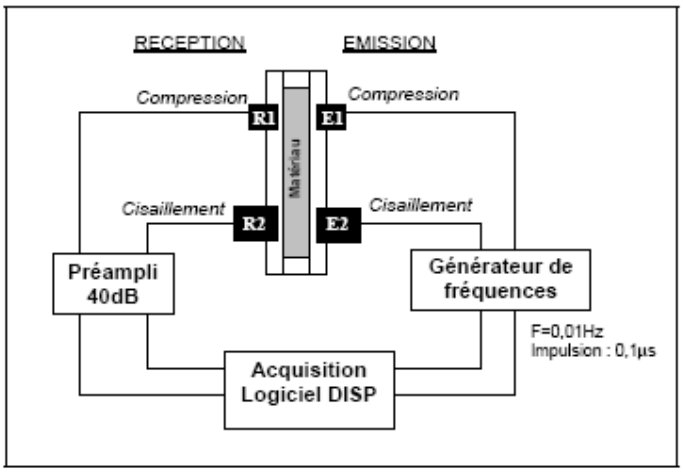


Figure II-64: Schéma du dispositif de suivi de prise avec ultrasons.

Pour notre étude, le choix du dispositif d'essai pour la mesure de la prise, s'est porté sur celui de Vicat.
Relatif à la norme EN 480-2, le principe de l'essai consiste en l'observation de la pénétration d'une aiguille dans le mortier jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur spécifiée.
Le temps, écoulé entre l'introduction de l'eau dans le malaxeur et le moment où la distance entre l'aiguille et la plaque de base est de 4mm (d), est le temps de début de prise du matériau. L'essai de pénétration est répété toutes les 10 minutes.

Le protocole d'essai retenu diffère de celui recommandé par la norme. Les essais de prise Vicat ont été réalisés sur des bétons tamisés à 4mm. Les échantillons ne sont pas immergés dans l'eau mais plutôt recouverts de produit de cure, afin de respecter les conditions d'essais de la campagne.

Le procédé d'immersion des échantillons du béton dans le produit, permet l'obtention des valeurs plus précises, et aussi d'éviter toute perturbation de mesure, liée par exemple à l'infiltration de l'eau, suite à la pénétration de l'aiguille dans le matériau frais.

Les essais de début de prise, ont lieu dans une salle régulée à une température de 20 °C et une hygrométrie de 90 %, afin de respecter les conditions d'essais préconisées par la norme européenne EN 480-2.

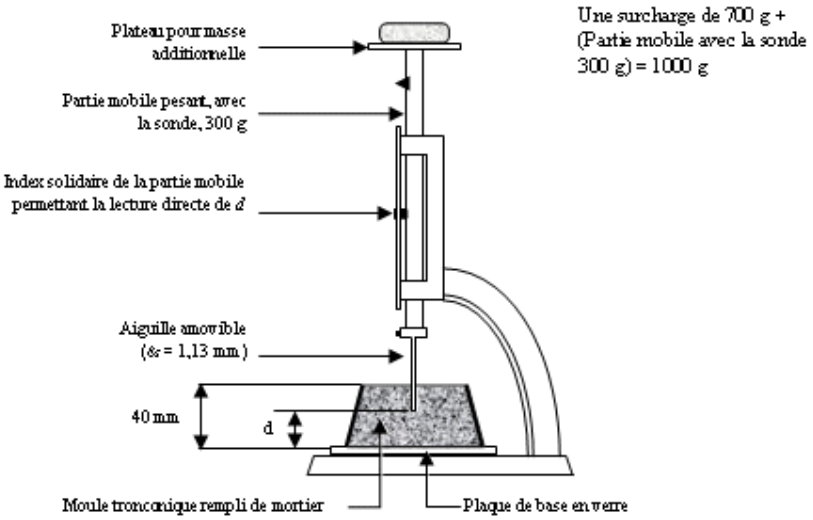


Figure II-65: Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

II.2.3. Conditions et procédure d'essais

L'exposition d'une structure en béton à des conditions environnantes différentes de celles régnant au sein du matériau est à l'origine d'un déséquilibre hygrométrique, qui se traduit par un mouvement de l'eau de l'intérieur du matériau vers l'extérieur, conduisant au séchage de celui-ci. La prise en compte du transport de l'eau au sein du béton est d'une grande importance pour les matériaux à matrice cimentaire. En effet, la teneur en eau affecte considérablement l'évolution des déformations de retrait.

II.2.3.1. Essais en présence de vent

a)- *Descriptif du dispositif expérimental développé*

Les essais, réalisés sur une durée de 24h, ont lieu dans un tunnel ventilé de section 0,6 m x 0,3 m et de 3 m de longueur du tunnel. La vitesse de vent est de 5 $m.s^{-1}$ (± 0.5 $m.s^{-1}$). L'ensemble est disposé dans une salle climatisée régulée en température (21°C ±1°C) et en hygrométrie (50% ±1%).

Le tunnel ventilé est constitué d'un ventilateur centrifuge dont la turbine, montée en porte à faux, est directement reliée à l'arbre du moteur électrique fixé sur chaise extérieure à la coque du ventilateur. Les caractéristiques du ventilateur sont les suivantes :

- puissance du moteur : 4 kW,
- débit d'air variant de 360 à 120 000 m^3/h
- pression d'air variant de 0.4 à 5.9 kPa
- Température maximale de fonctionnement : 60°C

L'originalité de ce tunnel ventilé permet d'obtenir une circulation d'air uniforme dans toute l'enceinte durant tout l'essai, sans aucune perturbation du flux. Pour ce faire, un anémomètre placé en aval du tunnel permet de contrôler la vitesse du vent dans le tunnel.
En amont du tunnel est placé un hygromètre qui suit l'évolution de l'humidité et de la température à l'intérieur de l'enceinte (figure II-66).
Dans l'enceinte, l'hygrométrie et la température semblent varier pendant l'essai, cela est dû aux variations thermiques et hygrométriques du béton en cours d'essai.
L'application du vent sur les éprouvettes de béton va en somme, accélérer l'apparition des déformations plastiques et par conséquent la fissuration précoce du matériau.

Avant la mise en route de la soufflerie, les moules des différents essais sont disposés sur un plateau en bois, conçu à cet effet, et qui est posé sur un chariot élévateur. Le chariot élévateur permet de disposer chaque moule dans l'ouverture qui lui est associée (figure II-67). Une fois la mise en place faite, l'acquisition des données peut être lancée dès la mise en marche de la soufflerie.

La mise en place du béton et la disposition des moules dans le tunnel ventilé est estimé à 25 minutes en moyenne, après introduction de l'eau dans le malaxeur.

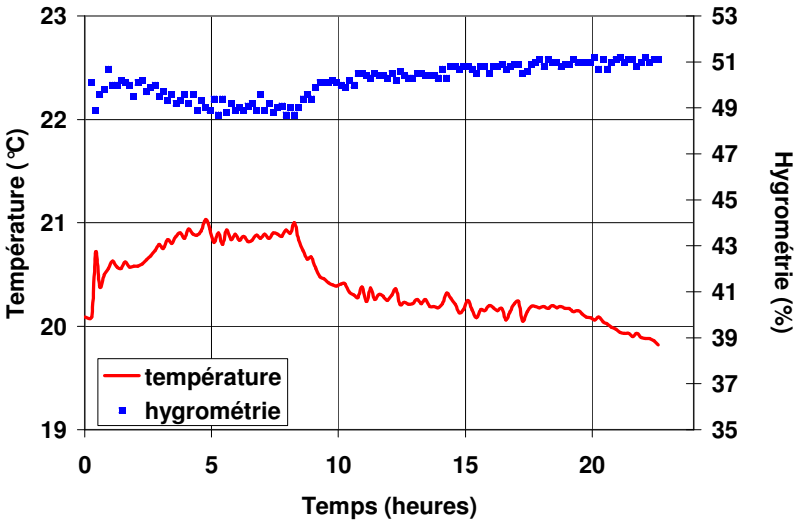


Figure II-66: Évolution de la température et de l'hygrométrie dans l'enceinte du tunnel pendant l'essai.

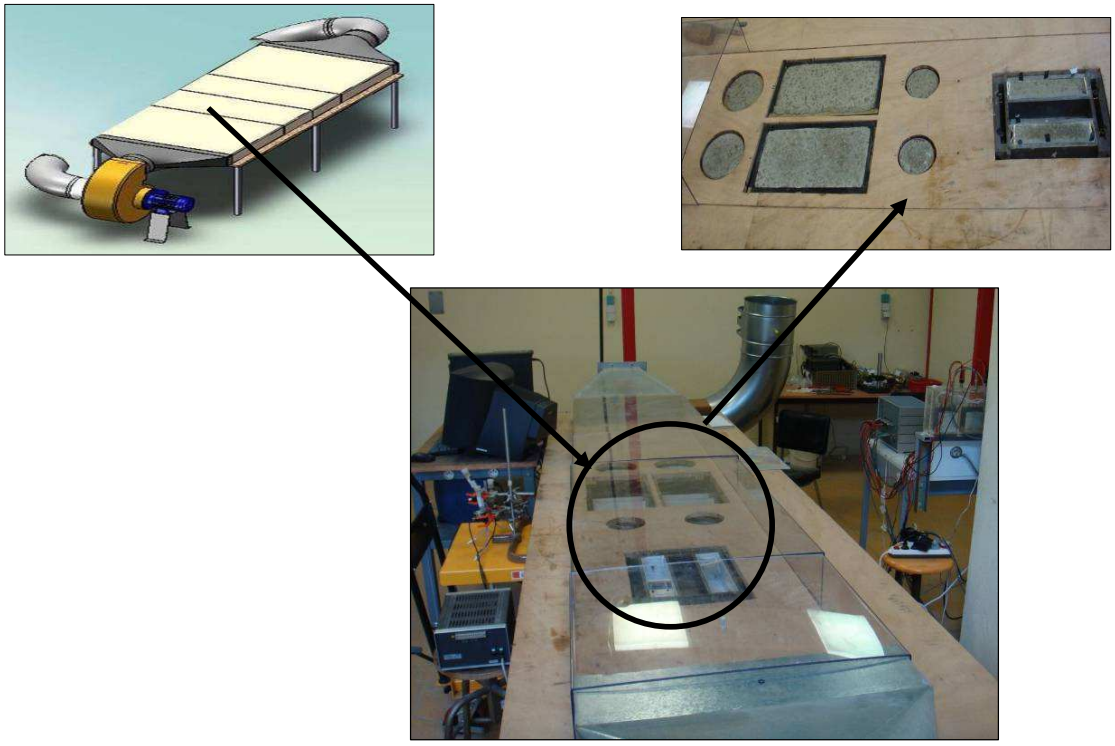


Figure II-67: Schéma du dispositif expérimental de la soufflerie (tunnel ventilé).

b)- *Calibration de la soufflerie*

La calibration de la soufflerie a été faite suivant quatre emplacements différents, situés à l'intérieur de la soufflerie (figure II-68). La circulation d'air se fait en circuit ouvert pour éviter toute élévation de la température dans le tunnel. En effet, lors de la calibration, des essais ont été effectués en circuit fermé. Ces essais ont montré qu'il était impossible de garantir une température de 20°C pendant toute la durée de l'eaais (figure II-69).

La vitesse du vent a pu être évaluée en fonction du nombre de tours par minutes (figure II-70). L'existence d'un très faible gradient du flux dans le tunnel, montre bien que ce dernier y reste constant.

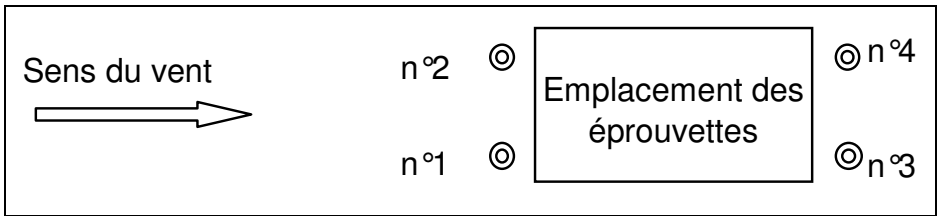


Figure II-68: Emplacements pour la calibration de la soufflerie.

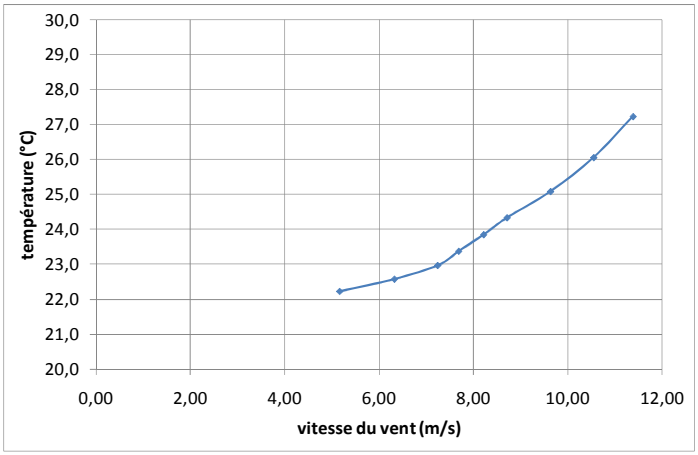


Figure II-69 : Evolution de la température en circuit fermé.

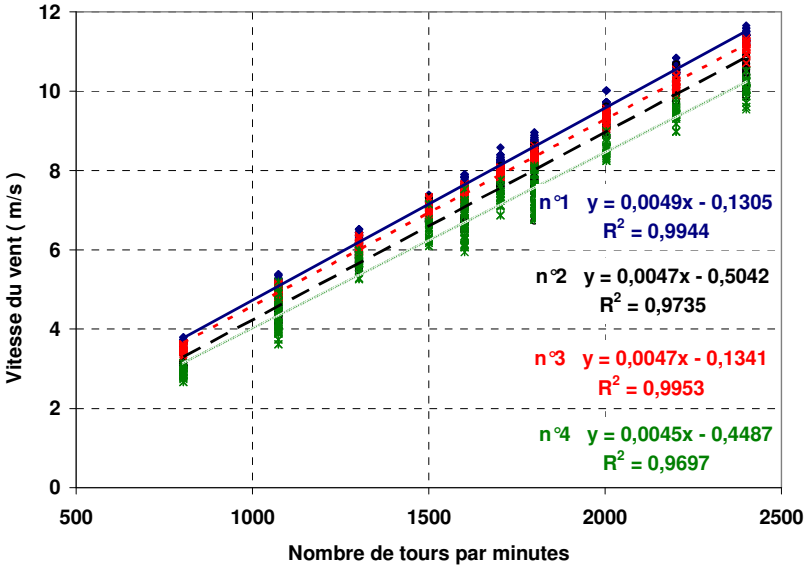


Figure II-70: Calibration de la soufflerie.

II.2.3.2. Essais en absence de vent

Les essais sans vent se déroulent dans une salle climatisée, régulée en température (20°C) et en hygrométrie (HR=50%).

Les diverses mesures sont recueillies par une centrale d'acquisition. La saisie automatique des données se fait toutes les dix minutes.

II.3. Conclusion et bilan de recherche

Les mécanismes à l'origine du retrait au très jeune âge et les différentes techniques de mesure présentées dans cette partie, mettent en évidence la fissuration du béton à l'état frais, liée à certaines conditions environnementales. Ces mécanismes de retrait sont encore aujourd'hui à l'étude. Ces études montrent que le risque de fissuration précoce est plus élevé sur des ouvrages présentant une grande surface d'évaporation par rapport au volume. Dans la littérature certains auteurs ont relié la fissuration prématurée du béton au retrait plastique. Cette fissuration prématurée des matériaux à matrice cimentaire constitue un problème d'actualité qui nécessite une grande attention dans la mesure où les fissures plastiques remettent en cause la durabilité et/ou la pérennité de l'ouvrage.

Nous avons donc orienté nos recherches dans cette voie, en choisissant une approche classique, c'est-à-dire l'étude des déformations plastiques, d'une part suivant les conditions de séchage et d'autre part, suivant les différents modes de cure mis en œuvre. Le dispositif expérimental a été mis au point dans cet objectif.

Les études menées sur la fissuration prématurée ont montré que le retrait plastique n'est toutefois qu'un facteur de fissuration. La capacité de déformation, qui est une caractéristique du matériau, conditionne l'apparition des fissures.

CHAPITRE III : ÉTUDE DES DÉFORMATIONS PLASTIQUES DU BÉTON VIS Á VIS DU SÉCHAGE

III.1. Influence des conditions de séchage sur les mécanismes à l'origine des déformations du béton

III.1.1. La problématique industrielle.

L'amélioration des méthodes de conception et de mise en œuvre, l'utilisation de matériaux innovants en termes de fonctionnalité et de propriétés ainsi que le recours à des systèmes optimisés de vérification et de contrôle, ne sont là que quelques outils qui ont largement contribué à l'avancement et au perfectionnement des structures du génie civil en béton. Ces structures se retrouvent toutefois, de plus en plus prématurément, soumises à de fortes sollicitations avant même la fin de leur mise en œuvre.
Même en l'absence de chargement extérieur, un élément en béton est sujet à des variations volumiques (d'origine thermique ou hydrique) au cours du temps. Cette contraction, plus connue sous le nom de retrait, a notamment pour causes le séchage et l'hydratation du ciment. Dans une structure, le volume du béton ne peut pas changer librement. En conséquence, lorsque son retrait est gêné, le béton est soumis à des efforts de traction, qui le place dans une situation de fissuration potentielle. Le béton est donc un matériau qui a une tendance naturelle à la fissuration. L'apparition de macro et micro fissure reste de nos jours non seulement peu étudiées mais aussi immaîtrisables. La maîtrise du comportement du béton au jeune âge s'avère donc un élément déterminant de la durabilité des ouvrages.

C'est pourquoi, durant ces dernières années, les différents acteurs du BTP se sont montrés de plus en plus exigeants quant à la qualité des structures et plus particulièrement vis-à-vis de la fissuration du béton en cours de réalisation. L'intérêt porté sur la fissuration des bétons à l'état plastique a suscité un rassemblement de la plupart des producteurs de bétons et des laboratoires de matériaux de construction, dont l'objectif commun est d'améliorer encore un peu plus les techniques de formulation, d'une part, et d'autre part, le développement de cahiers des charges de plus en plus restrictifs vis-à-vis des problèmes ponctuels de fissuration rencontrés sur site.

La maîtrise du risque de fissuration devient donc une préoccupation majeure des industriels du BTP qui, compte tenu des surcoûts générés par le traitement de ces fissures (réparation par colmatage par exemple), mettent en œuvre des moyens plus importants en phase d'études afin de privilégier les matériaux et les procédés de construction minimisant un tel risque.

Dans ce contexte, l'objectif principal des résultats obtenus, et qui sont présentés ci-dessous, est d'apporter une meilleure compréhension du comportement hydromécanique des bétons, qui intègre les phénomènes de séchage, de retrait, et de pression capillaire, dans le but de prédire le comportement de structures en béton à l'état plastique et de proposer des recommandations pour minimiser les risques d'apparition de fissures au très jeune âge.

III.1.2. La fissuration des bétons à l'état plastique.

Les résultats des essais de sensibilité à la fissuration montrent, que ce soit avec ou sans vent, que les trois bétons, lorsqu'ils sont non protégés, ont fissuré. Le tableau III-6 donne les résultats de l'étude de la sensibilité à la fissuration des trois bétons. Les valeurs du tableau III-6 correspondent à des moyennes obtenues sur au moins trois échantillons. La mise en relation des tableaux III-6 et III-7 montre que la fissuration a systématiquement eu lieu avant le début de prise, lorsque le béton est à l'état plastique.
Sans vent, l'âge de fissuration semble diminuer lorsque le rapport E_{eff}/C augmente. L'inverse a été constaté en présence de vent (figure III-71). Pour le béton de rapport E_{eff}/C=0,60, le vent ne semble pas influencer l'âge de fissuration.

	Avec vent		Sans vent	
E_{eff} /C	Ouverture maximale de fissure (µm)	Âge (heures)	Ouverture maximale de fissure (µm)	Âge (heures)
0,60	562 (±49)	1,26 (±0,21)	274 (±37)	1,30 (±0,10)
0,45	422 (±103)	1,24 (±0,16)	176 (±30)	2,19 (±0,13)
0,35	176 (±37)	0,97 (±0,05)	159 (±22)	2,53 (±0,05)

Tableau III-6 : Résultat de la sensibilité à la fissuration.

Formulations	E_{eff}/C = 0.60	E_{eff}/C = 0.45	E_{eff}/C = 0.35
Temps de début de prise Vicat (heures)	4 (±0,17)	3,4 (±0,10)	3,17 (±0,18)

Tableau III-7 : Temps de début de prise Vicat des trois bétons.

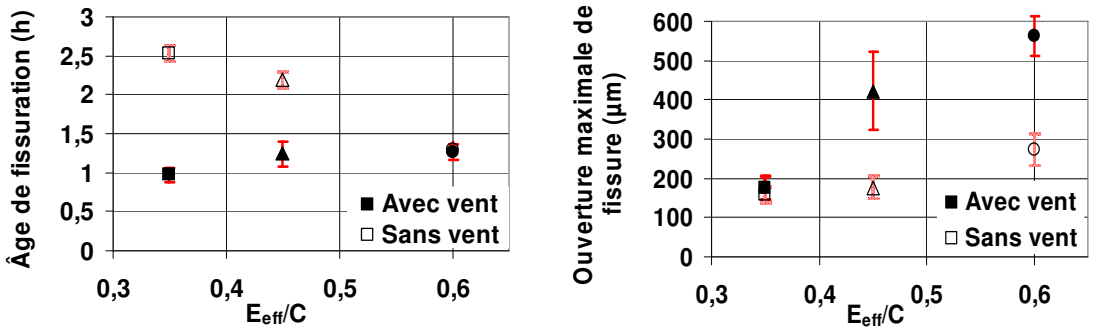


Figure III-71: Âge et l'ouverture maximale de fissure

La largeur maximale de la fissure a été déterminée par analyse d'images, huit heures après l'introduction de l'eau dans le malaxeur, c'est-à-dire après le début de prise. Le tableau III-6 donne les résultats de ces mesures avec et sans vent. Quel que soit le béton considéré, on constate que la largeur maximale d'ouverture de fissure est plus importante en présence du vent. Que ce soit avec ou sans vent, l'ouverture maximale de fissure augmente lorsque le rapport E_{eff}/C augmente (figure III-71).

Pour le béton de rapport $E_{eff}/C=0,35$, le vent ne semble pas influencer l'ouverture maximale de fissure.

Turcry (2003) a réalisé des essais avec le même dispositif expérimental sur deux bétons (figure III-72). Ces essais ont été réalisés à une hygrométrie de 50% et une température de 20°C ou 40 °C. En absence de vent, il n'a pas obtenu de fissuration (figure III-72). Pour le béton vibré BO40, de rapport $E_{eff}/C=0,5$, à 20°C, en présence de vent, la fissuration intervient 1,5 heures après introduction de l'eau (figure III-72) et la largeur maximale de fissure est de 0,4 mm (figure III-73). Ces résultats sont très proches de ceux obtenus pour le béton de rapport $E_{eff}/C=0,45$ en présence de vent (tableau III-6).

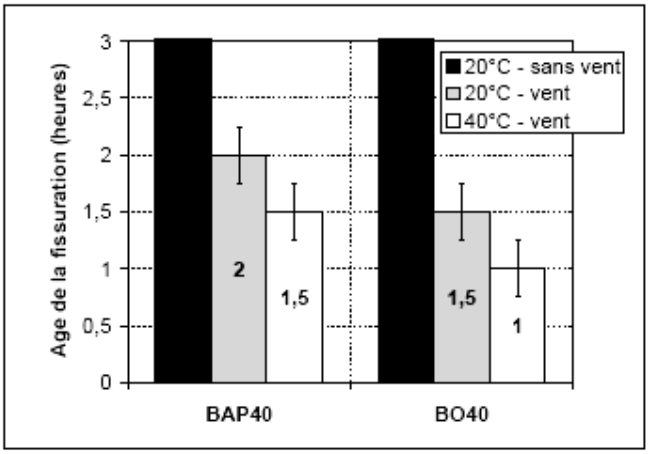


Figure III-72: Age de fissuration des bétons à l'état frais (Turcry 2003).

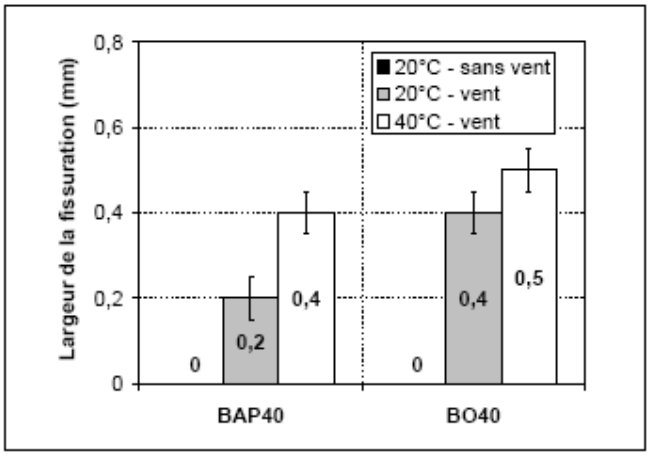


Figure III-73: Largeur de fissure des bétons à l'état frais (Turcry 2003).

III.1.3. L'origine des déformations plastiques : Le phénomène d'évaporation

L'évaporation des trois bétons a été étudiée suivant deux conditions de séchage (avec et sans vent). Le suivi de perte de masse a été mené en parallèle avec celui d'une surface d'eau libre (figure III-74 et III-75). Deux types de cinétiques de flux bien distinctes sont observés lors des essais : le flux linéaire de la surface de l'eau libre diffère de celui des bétons pour les deux conditions de séchage étudiées.

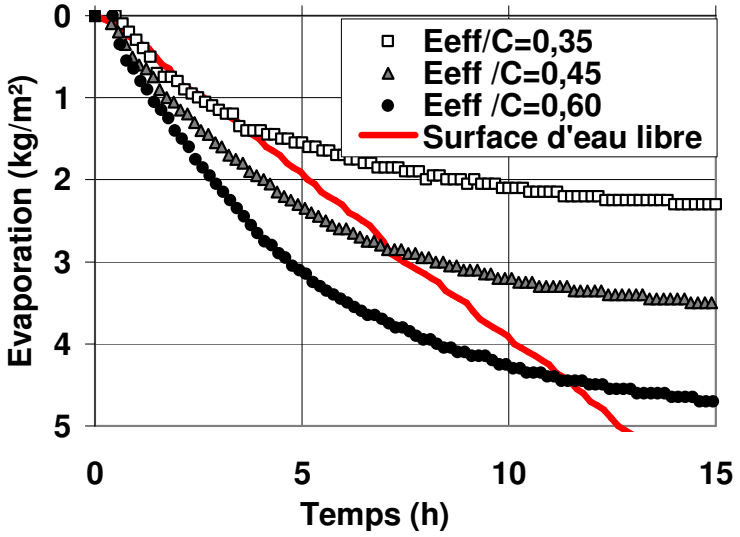


Figure III-74 : Evaporation des trois bétons et de la surface d'eau libre avec vent.

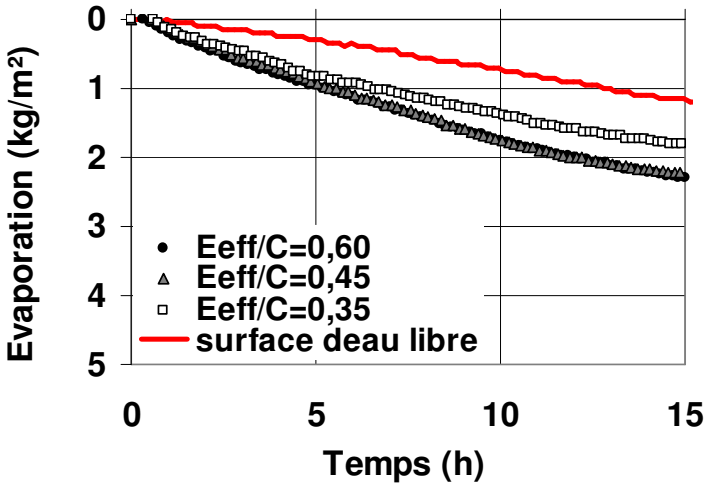


Figure III-75 : Evaporation des trois bétons et de la surface d'eau libre sans vent.

Les résultats de cette étude sont présentés sur la figure III-76. Toutes les courbes de perte de masse démarrent par une partie linéaire. La pente de cette partie linéaire permet de calculer le flux initial d'évaporation (tableau III-8). Les courbes restent linéaires pendant une durée t_i qui

décroît lorsque le rapport E_{eff}/C diminue (tableau III-9). Les courbes sont ensuite fortement non linéaires, le flux d'évaporation diminue pour atteindre une valeur faible.

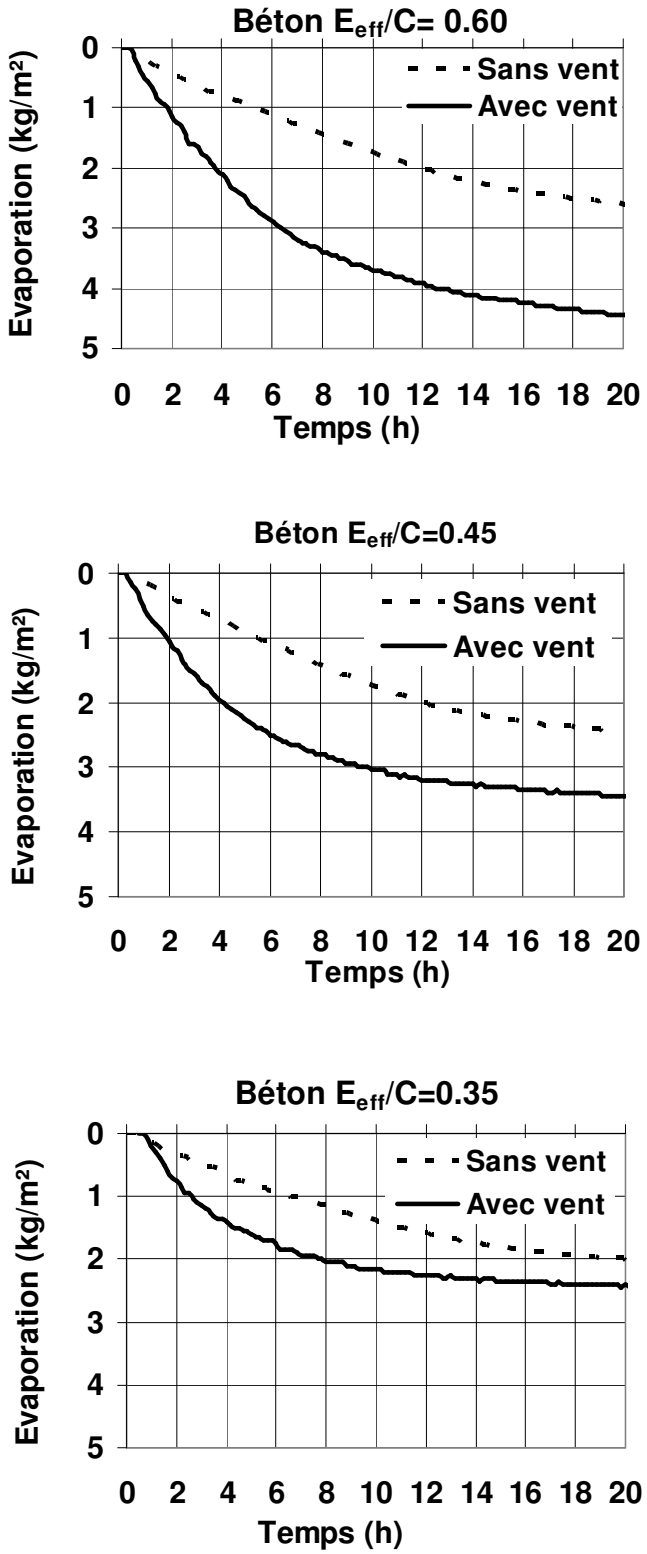


Figure III-76 : Évaporation des trois bétons avec et sans vent.

En présence du vent, le flux initial d'évaporation diminue lorsque le rapport E_{eff}/C diminue. Le flux d'évaporation d'une surface d'eau libre mesuré dans les mêmes conditions est de 0,41 kg/m²/h. Quel que soit le rapport E_{eff}/C considéré, le flux initial d'évaporation est supérieur à celui d'une surface d'eau libre (figure III-74 et III-75)).

La capacité de déformation des trois bétons frais peut expliquer la diminution du flux initial d'évaporation avec le rapport E_{eff}/C. les essais de retrait plastique menés par Cohen and al. (1990), sur des pâtes de ciment et des mortiers, illustrent clairement une différence de taux d'évaporation dans les pâtes de ciment et les mortiers. Cette différence est liée à une différence de microstructure. La distribution de la taille des pores dans les pâtes de ciment et mortiers à l'état plastique est différente.

En effet, on passe d'une porosité de 18% pour un rapport E_{eff}/C=0,60 à une porosité de 15% pour un rapport E_{eff}/C=0,35. La quantité d'eau d'écartement est d'autant plus faible que le rapport E_{eff}/C diminue. Les grains solides sont donc d'autant plus proches les uns des autres que le rapport E_{eff}/C diminue. Il est donc probable que la capacité de déformation d'un béton frais de rapport E_{eff}/C=0,35 soit plus faible que celle d'un béton de rapport E_{eff}/C=0,60. La quantité d'eau initiale présente dans le mélange granulaire humide diminue lorsque le rapport E_{eff}/C diminue (tableau II-4). Pour le rapport E_{eff}/C=0,35, le temps t_i est même inférieur au temps de début de prise. En effet, après une période d'évaporation sévère, si le mélange granulaire humide ne contient plus suffisamment d'eau libre pour venir remplacer l'eau évaporée, le flux d'évaporation diminue car l'eau encore présente est plus fortement liée au squelette granulaire.

	Flux d'évaporation (kg/m²/heure)	
	Sans vent	Avec vent
E_{eff} /C=0,60	0,180	0,700
E_{eff} /C=0,45	0,170	0,510
E_{eff} /C=0,35	0,151	0,450

Tableau III-8: Flux d'évaporation des trois bétons.

	Temps t_i (heures)	
	Sans vent	Avec vent
E_{eff} /C=0,60	10,8	4,5
E_{eff} /C=0,45	9,1	3,3
E_{eff} /C=0,35	7,1	2,3

Tableau III-9: Temps t_i pendant lequel l'évaporation est linéaire en fonction du temps.

Sans vent, le flux initial d'évaporation est pratiquement indépendant du rapport E_{eff}/C (figure III-76). Il semble qu'il diminue légèrement lorsque le rapport E_{eff}/C diminue. Le flux d'évaporation, d'une surface d'eau libre, mesuré dans les mêmes conditions est de 0,14 kg/m²/h. Quel que soit le rapport E_{eff}/C considéré, le flux initial d'évaporation est donc voisin de celui d'une surface d'eau libre. Par contre, il est environ trois fois plus faible que celui mesuré en présence du vent. Dans des conditions de dessiccation modérée, le flux initial

d'évaporation semble donc être moins influencé par la capacité de déformation des trois bétons frais. Quel que soit le rapport E_{eff}/C considéré, les temps t_i obtenus sans vent sont supérieurs aux temps t_i obtenus avec vent. Ceci peut s'expliquer par un flux initial d'évaporation trois fois plus faible sans vent qu'avec vent.

En comparant les flux d'évaporation obtenus suivant nos deux conditions de séchage, avec ceux calculés à partir de la formule d'évaporation établie par Uno (1998), on remarque, qu'en présence de vent, les flux d'évaporation calculés ne coïncident pas avec ceux obtenus expérimentalement (Tableau III-10).
Selon l'équation d'Uno, le béton qui s'échauffe le plus, a le flux le plus élevé (Tableaux III-10 et III-11). Le béton de rapport E_{eff} /C=0,35, qui présente une température plus élevée en début d'essai, a donc un flux d'évaporation plus important que celui des autres bétons, ce qui est contraire aux résultats expérimentaux. Ceci peut s'expliquer par le fait que la formule d'Uno (1998) ne tient pas compte de la capacité de déformation du béton frais.

$$Evap = 5([T_c + 18]^{2,5} - r.[T_a + 18]^{2,5}).(V + 4).10^{-6} \qquad \textbf{(III.1)}$$

Où

Evap (kg/m²/h) représente le taux d'évaporation,

T_c (°C) la température de la surface du béton,

T_a (°C) la température de l'air,

r =l'humidité relative de l'air,

V est la vitesse du vent (km/h).

Avec vent	Flux d'évaporation (kg/m²/heure)	
	Expérimentale	Formule de Uno
E_{eff} /C=0,60	0,70	0,62
E_{eff} /C=0,45	0,51	0,62
E_{eff} /C=0,35	0,45	0,77

Sans vent	Flux d'évaporation (kg/m²/heure)	
	Expérimentale	Formule de Uno
E_{eff} /C=0,60	0,18	0,11
E_{eff} /C=0,45	0,17	0,11
E_{eff} /C=0,35	0,15	0,14

Tableau III-10: Flux d'évaporation des trois bétons déterminé suivant deux méthodes.

Formulations	$E_{eff}/C = 0.60$	$E_{eff}/C = 0.45$	$E_{eff}/C = 0.35$
Température (°C)	22	22	24,1

Tableau III-11 : Température des trois bétons en début d'essai.

III.1.4. Le développement de la dépression capillaire

L'évolution de la dépression capillaire a été tracée pour les trois bétons (figure III-77 et III-78). Dans les deux conditions de séchage étudiées, la dépression capillaire se développe bien avant la prise.

Les courbes de dépression capillaire des bétons sont identiques, elles peuvent être linéarisées par deux droites. Seul, le béton de rapport $E_{eff}/C=0,35$ présente une forme de courbe différente en présence de vent (figure III-77 et III-78).

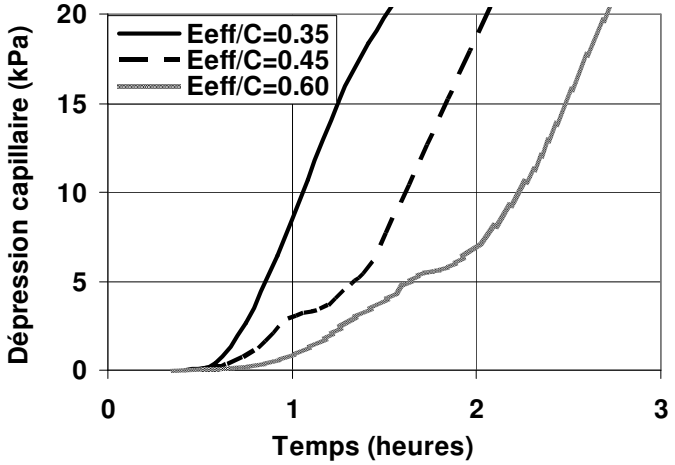


Figure III-77: Evolution de la dépression capillaire avec vent.

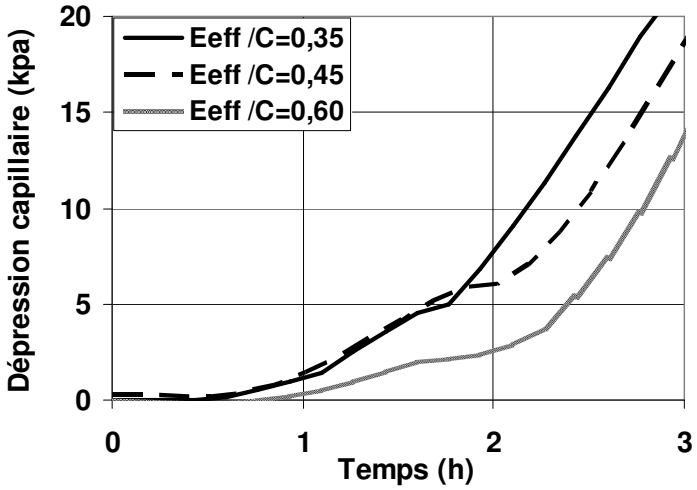


Figure III-78: Evolution de la dépression capillaire sans vent.

Les résultats de l'étude sont présentés sur la figure III-79. Le tableau III-12 donne l'âge de démarrage de la dépression capillaire pour les trois bétons avec et sans vent, c'est-à-dire l'âge à partir duquel la dépression capillaire devient supérieure à 1 kPa.

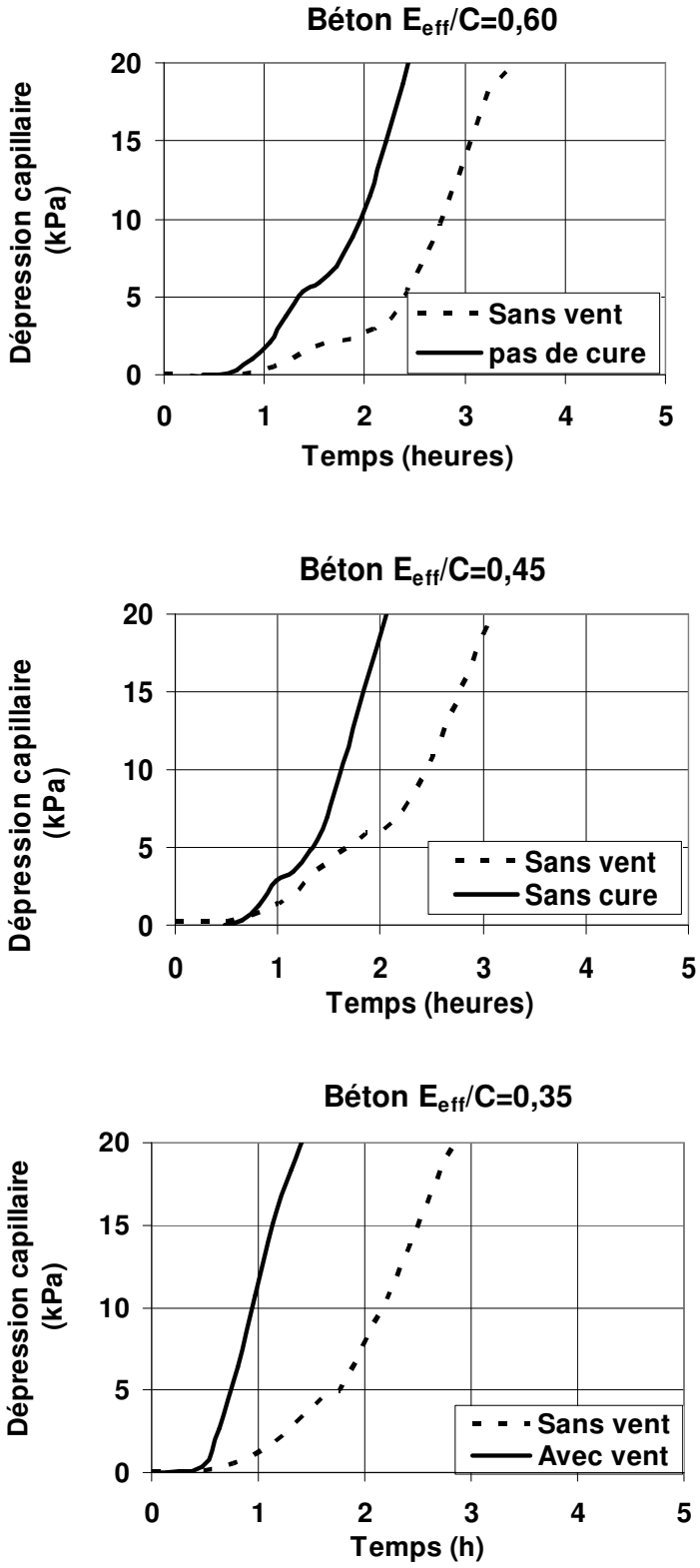


Figure III-79: Développement de la dépression capillaire des trois bétons avec et sans vent.

Sans vent, les cinétiques de développement de la dépression capillaire sont identiques : à partir d'un temps compris entre 1 heure et 1,5 heure, la dépression capillaire commence à se développer lentement (tableau III-12). Durant cette phase, la vitesse de développement de la dépression capillaire est comprise entre 2 kPa/heure et 6 kPa/heure suivant le béton. Puis, à partir d'un temps compris entre 2 et 3 heures, la dépression capillaire augmente rapidement (tableaux III-12 et III-13). Durant cette seconde phase, la vitesse de développement de la dépression capillaire est comprise entre 15 kPa/heure et 18 kPa/heure suivant le béton.

En présence de vent, pour les rapports $E_{eff}/C=0,45$ et $E_{eff}/C=0,6$ les cinétiques de développement de la dépression capillaires sont identiques à celles obtenues sans vent. L'âge de démarrage de la dépression capillaire est inférieur à une heure (tableau III-12).

Durant cette première phase, la vitesse de développement de la dépression capillaire est comprise entre 5 kPa/heure et 7 kPa/heure, elle est environ égale au double de celle obtenue sans vent. L'âge à partir duquel la dépression capillaire commence à se développer rapidement est proche de 2 heures (tableaux III-12 et III-13).

Durant cette seconde phase, la vitesse de développement de la dépression capillaire est comprise entre 16 kPa/heure et 19 kPa/heure. En présence de vent, pour le rapport $E_{eff}/C=0,35$, la première phase n'existe pas. A partir de l'âge de démarrage de la dépression capillaire, cette dernière commence à se développer rapidement à une vitesse voisine de 17 kPa/heure.

	Avec vent		Sans vent	
	1er régime	2ème régime	1er régime	2ème régime
$E_{eff}/C = 0,60$	0,94	1,89	1,43	2,56
$E_{eff}/C = 0,45$	0,89	2,12	1,10	2,44
$E_{eff}/C = 0,35$	-	0,75	1,19	2,04

Tableau III-12: âge de démarrage des régimes linéaires de dépression capillaire (heures).

	Avec vent		Sans vent	
	1ère pente phase 1 (kpa/h)	2ème pente phase 2 (kpa/h)	1ère pente phase 1 (kpa/h)	2ème pente Phase 2 (kpa/h)
$E_{eff}/C = 0.60$	7	19	2	18
$E_{eff}/C = 0.45$	5	17	5	17
$E_{eff}/C = 0.35$	-	16	6	15

Tableau III-13:Vitesses de dépression capillaire des trois bétons.

Que ce soit avec ou sans vent, la comparaison du tableau III-9 avec le tableau III-12 montre que le démarrage de la dépression capillaire a lieu pendant la période où les courbes de suivi de la perte de masse sont linéaires.

Avec vent, dans des conditions dessiccatives sévères, plus le rapport E_{eff}/C est élevé, plus la dépression capillaire démarre tardivement. La prévision des cinétiques de développement de la dépression capillaire nécessite de connaître à la fois la quantité d'eau dans le béton frais et la distribution poreuse du mélange granulaire humide.

C'est pour cela, qu'il n'existe pas de corrélation directe entre l'âge de démarrage de la dépression capillaire et l'évaporation de l'eau, car l'âge de démarrage de la dépression capillaire, dans des conditions de séchage sévères, est proche de celui obtenu dans des conditions de séchage modéré, malgré une différence de flux d'évaporation. En effet, si le démarrage de la dépression capillaire correspondait à l'atteinte d'une teneur en eau au sein du béton, il devrait se produire trois fois plus tard en l'absence de vent puisque les flux d'évaporation initiaux sont trois fois plus faibles en l'absence de vent. Or, ce n'est pas le cas, ce qui montre bien que le développement de la dépression capillaire au sein du béton frais dépend non seulement de l'évaporation de l'eau, mais aussi de la distribution poreuse du béton frais, donc des variations de volume du béton frais.

Les résultats obtenus sont en accord avec ceux obtenus dans la littérature. Les essais de mesure de la dépression capillaire entrepris par Holt and al. (2004), pour différentes vitesses de vent, sur un béton de rapport E/C=0,63, montrent que plus la vitesse du vent augmente, plus la pression capillaire se développe beaucoup plus tôt (Figure III-79). Les cinétiques de développement de la dépression capillaire présentent toutes deux pentes (figure III-79). Les valeurs maximales enregistrées sont de quelques dizaines de kPa.

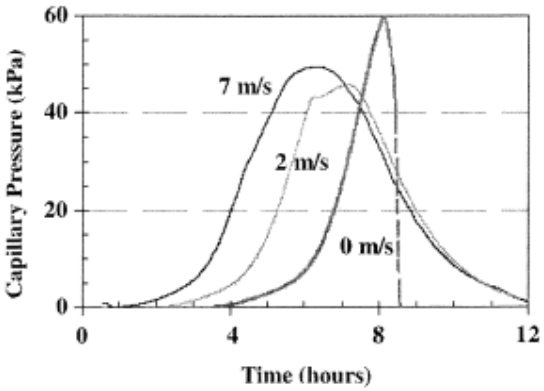


Figure III-80: Développement de la pression capillaire dans le béton suivant trois vitesses de vent (Holt and al. 2004).

III.2. Etude des déformations des bétons à l'état frais

III.2.1. Le retrait plastique des bétons

III.2.1.1. Le retrait plastique et le suivi thermique en condition endogène

La mesure des déformations longitudinales en conditions endogènes ainsi que le suivi de la température du béton ont été réalisés sur le même échantillon. Après la mise en œuvre du matériau, le moule de retrait est recouvert d'un film plastique, afin d'éviter tout échange avec l'extérieur. Un thermocouple est inséré au cœur de l'échantillon pour suivre l'évolution de la température à l'intérieur du béton, pendant toute la durée de l'essai.

La figure III-77 présente les évolutions de la température du béton et des déformations longitudinales en conditions endogènes en fonction du temps. On constate sur chacune des figures que l'allure des courbes de déformation est identique à celle des courbes de température. La température de gâchée du béton est de 30°C pour le rapport $E_{eff}/C=0,35$ alors qu'elle est de 26°C et de 25°C pour les rapports $E_{eff}/C=0,45$ et $E_{eff}/C=0,6$. Immédiatement après la vidange du malaxeur et durant sa mise en place dans le moule de retrait, dans la salle climatisée à 20°C, la température du béton frais commence à diminuer.

Au démarrage de l'essai, la température moyenne du béton frais est de 22°C pour les rapports $E_{eff}/C=0,45$ et $E_{eff}/C=0,6$ et de 24,1°C pour le rapport $E_{eff}/C=0,35$. Une fois l'essai démarré, la température continue à diminuer pour tendre vers 20°C. Cette première phase se traduit par un retrait important compris entre environ 150.10^{-6} et 200.10^{-6} (tableau III-14). La pente des courbes de déformations endogènes semble diminuer avec le rapport E_{eff}/C. Il semblerait que le coefficient de dilatation thermique du béton frais augmente avec le rapport E_{eff}/C. Ceci est probablement dû à la quantité d'eau présente dans le béton frais qui augmente lorsque le rapport E_{eff}/C augmente. En effet, le coefficient de dilatation thermique de l'eau est très élevé, puisqu'il est de 260.10^{-6} °C^{-1}. La prise du béton se traduit ensuite par une légère augmentation de la température du béton. Cette augmentation de température conduit à un léger gonflement du matériau, visible sur toutes les courbes.

Les déformations endogènes enregistrées dès la mise en place du béton peuvent donc s'expliquer à l'aide du suivi de la température du béton. Les légers décalages entre les courbes de température et de déformation (figure III-80) peuvent s'expliquer par le fait que les déformations sont mesurées à mi hauteur de l'échantillon, alors que la température du béton frais n'est pas mesurée à un emplacement fixe. Ces déformations importantes sont dues à l'existence d'un coefficient de dilatation thermique du béton au très jeune âge, bien supérieur à celui du béton durci.

La variation de température $\Delta\mathbf{T}$ obtenue, est égale à la différence de température entre le début de l'essai et la température maximale avant la prise. La valeur de la déformation $\boldsymbol{\varepsilon}$ correspond à la déformation lorsque le matériau atteint la température maximale avant la prise (tableau III-14).

	Avant la prise	
	ΔT (°C)	ε (µm/m)
E_{eff}/C=0,35	-2.5 (± 0.5)	-180 (± 32)
E_{eff}/C=0,45	-0.97 (± 0.1)	-169 (± 52)
E_{eff}/C=0,60	-0.63 (± 0.3)	-164 (± 42)

Tableau III-14: Variations moyennes de températures et des déformations longitudinales correspondantes pour les trois bétons recouverts de film plastique.

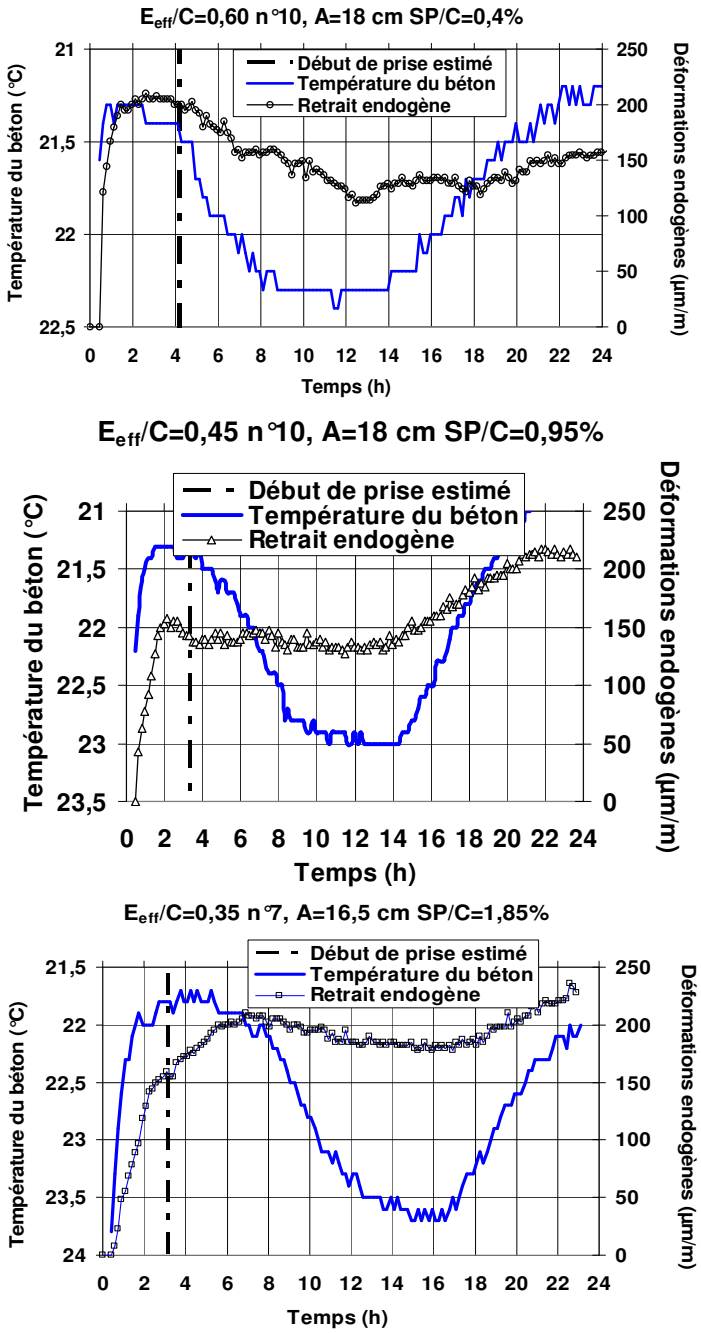


Figure III-81: Suivi thermique et déformations endogènes d'un échantillon de chaque béton.

III.2.1.2. Les déformations plastiques longitudinales

L'évolution des déformations longitudinales corrigées des effets thermiques a été tracée pour les trois bétons (figure III-82 et III-83). Dans les deux conditions de séchage étudiées, le retrait plastique commence à se développer bien avant la prise.

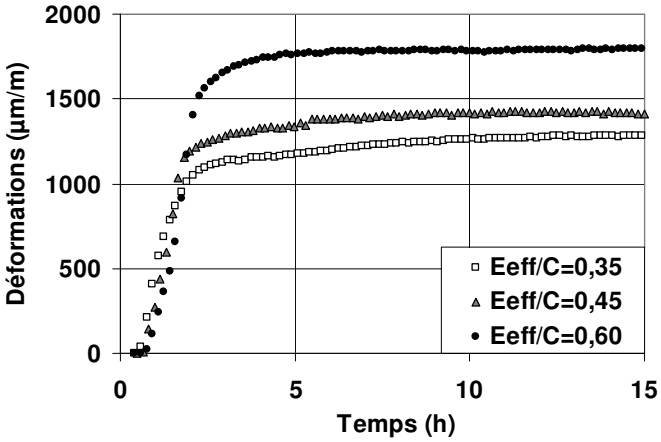


Figure III-82: Evolution des déformations corrigées des effets thermiques avec vent.

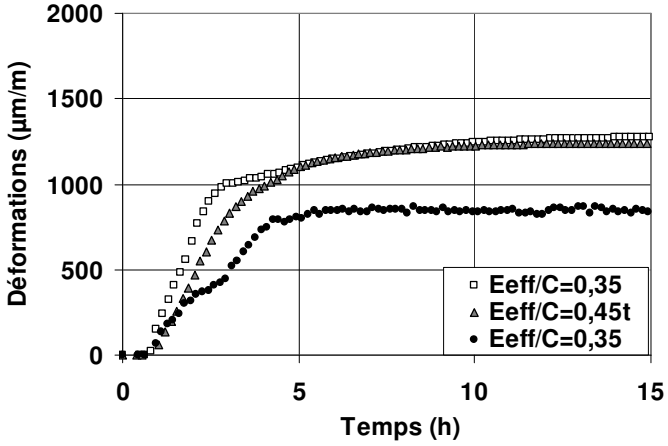


Figure III-83: Evolution des déformations corrigées des effets thermiques sans vent.

La figure III-84 représente les déformations longitudinales corrigées des effets thermiques (décrits dans le paragraphe précédent) avec et sans vent. Toutes les courbes démarrent par une partie linéaire. La pente de cette partie linéaire permet de calculer la vitesse initiale de déformation (tableau III-15). On constate, avec ou sans vent, que la vitesse initiale de déformations diminue lorsque le rapport E_{eff}/C augmente. En présence de vent, la vitesse initiale de déformation est plus importante qu'en absence de vent. Pour le rapport E_{eff}/C=0,60,

la cinétique de déformation fait apparaitre deux pentes initiales (figure III-78). La seconde pente est supérieure à la première (tableau III-15). Les courbes restent linéaires pendant une certaine durée t_j qui augmente lorsque le rapport E_{eff}/C augmente (tableau III-16). Les courbes sont ensuite fortement non linéaires, les vitesses de déformation diminuent jusqu'à devenir nulles. Quel que soit le rapport E_{eff}/C considéré, les temps t_j obtenus sans vent sont supérieurs aux temps t_j obtenus avec vent. Ceci peut s'expliquer par une vitesse initiale de déformation plus faible en absence de vent.

	Avec vent		Sans vent	
	1er régime	2ème régime	1er régime	2ème régime
$E_{eff}/C = 0,60$	722	1361	278	389
$E_{eff}/C = 0,45$	842	-	410	-
$E_{eff}/C = 0,35$	929	-	524	-

Tableau III-15: Vitesses moyennes initiales de déformations longitudinales.

Bétons	Temps t_j (heures)	
	Sans vent	Avec vent
E_{eff} /C=0.60	3.51	1.94
E_{eff} /C=0.45	2.85	1.96
E_{eff} /C=0.35	2.13	1.06

Tableau III-16: Temps t_j pendant lequel les déformations sont linéaires en fonction du temps.

L'écart d'amplitudes des déformations semblent diminuer avec le rapport E_{eff}/C. Cette tendance a été remarquée au niveau des courbes de pertes de masse, décrites précédemment.
Dans des conditions de dessiccation sévère, les déformations plastiques diminuent lorsque le rapport E_{eff}/C diminue. Cependant des déformations très importantes sont observées au niveau des bétons de rapport E_{eff} /C = 0,60. Car plus l'évaporation est importante, plus le matériau est sujet à des déformations importantes.
En absence de vent, les déformations augmentent lorsque le rapport E_{eff}/C diminue.
Bien que la cinétique initiale de déformation ne soit pas la même, il est possible de constater que pour les bétons de rapport E_{eff}/C =0,35, les déformations plastiques évoluent indépendamment des conditions de séchage après la prise.
Une fois que le matériau a fait prise, on constate que la cinétique de déformation est identique (figure III-84).

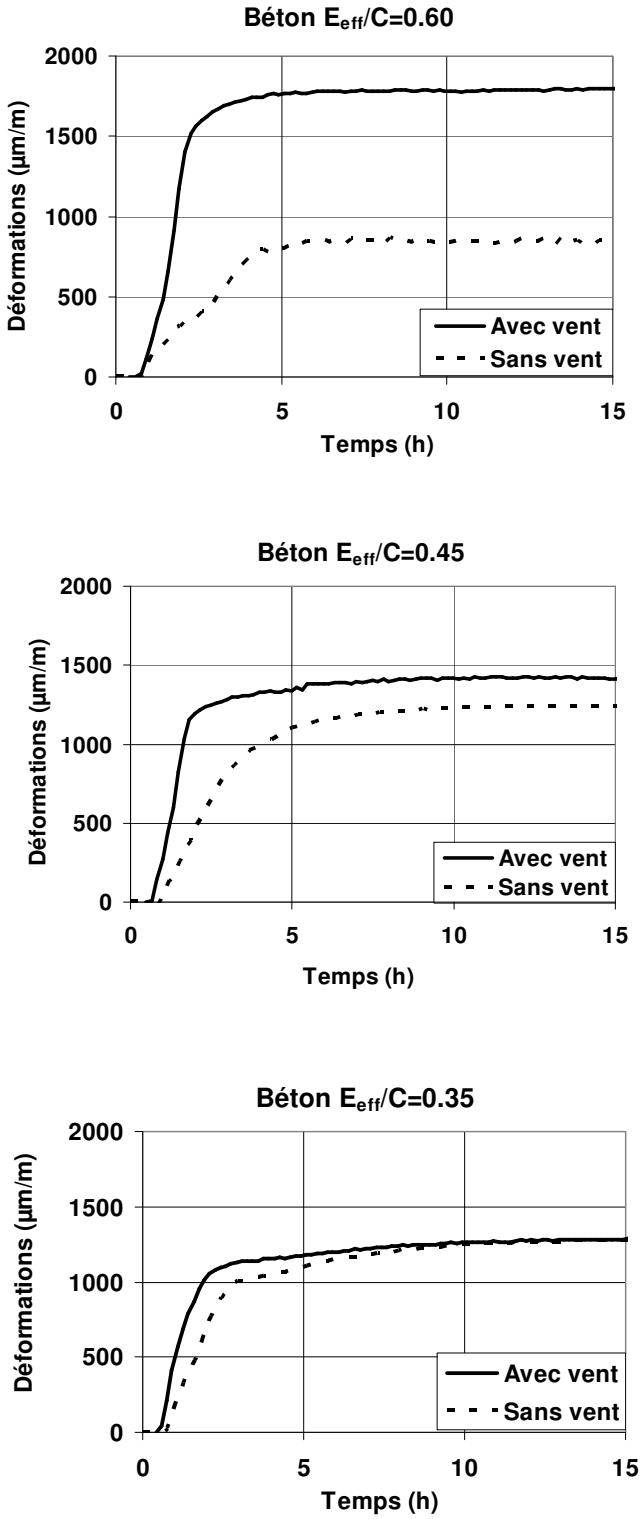


Figure III-84: Retrait plastique des trois bétons avec et sans vent.

III.3. Analyse du comportement des bétons au très jeune âge

Un récapitulatif des résultats obtenus à l'âge de fissuration des trois bétons étudiés, suivant les deux conditions de séchage est présenté dans les tableaux III-17 et III-18. Les résultats présentés ci-dessous, permettront d'approfondir notre réflexion sur la fissuration des bétons à l'état plastique.

Résultats d'essais	**E_{eff} /C = 0.60**	**E_{eff} /C = 0.45**	**E_{eff} /C = 0.35**
Âge $_{fissuration}$ (h)	1.26 (±0.21)	1.24 (±0.16)	0.97 (±0.05)
Evaporation (kg/m²)	0,90 (±0,20)	0,77 (±0,30)	0,43 (±0,10)
Dépression capillaire (kPa)	3.41	3.46	6.24
Déformations (µm/m)	812 (± 162)	663 (±158)	543 (± 25)

Tableau III-17: Bilan des résultats des essais dans des conditions avec vent.

Résultats d'essais	**E_{eff} /C = 0.60**	**E_{eff} /C = 0.45**	**E_{eff} /C = 0.35**
Âge $_{fissuration}$ (h)	1.30 (±0.10)	2.19 (±0.13)	2.53 (±0.05)
Evaporation (kg/m²)	0,30 (±0,10)	0,41 (±0,40)	0,31 (±0,10)
Dépression capillaire (kPa)	0.51	4.10	13.72
Déformations (µm/m)	113 (± 39)	637 (± 94)	896 (± 116)

Tableau III-18: Bilan des résultats des essais dans des conditions sans vent.

La mise en relation des tableaux III-17 et III-18 montre que la fissuration ne se produit pas pour une déformation donnée. En effet, si les déformations à l'âge de fissuration sont quasi identiques pour le béton de rapport E_{eff}/C=0,45, ce n'est pas le cas pour les deux autres bétons. De la même façon, la fissuration ne se produit pas pour une valeur de dépression capillaire donnée. En effet, si les dépressions capillaires à l'âge de fissuration sont similaires pour le béton de rapport E_{eff}/C=0,45, ce n'est pas le cas pour les deux autres bétons. En effet, la pression d'entrée d'air dépend de la teneur en eau et de la masse volumique apparente sèche du béton frais. Son évolution dépendra donc de l'histoire de l'évaporation et des déformations du béton. Les dépressions capillaires à l'âge de fissuration similaires pour le béton de rapport E_{eff}/C=0,45 peuvent ainsi s'expliquer par le fait que les déformations à l'âge de fissuration sont quasi identiques pour ce béton.

III.3.1. Evolution du matériau en cours d'hydratation

Pour comprendre les différents phénomènes liés à la fissuration, les déformations plastiques, la dépression capillaire, l'évaporation et le temps de début de prise Vicat ont été étudiés pour les trois bétons suivant deux conditions de séchage. Il apparaît que la courbe des déformations plastiques présente deux périodes distinctes, que se soit avec ou sans vent (figure III-85 et III-86).

III.3.1.1. Analyse des déformations au très jeune âge

- La première période

Elle commence dès le début de l'essai. Le fort taux d'évaporation initiale entraîne des déformations importantes. Les bétons sont alors saturés. Pour assurer un flux de masse constant à la surface, il faut que la pression de l'eau diminue, ce qui conduit au développement de la dépression capillaire. Cette période est caractérisée par l'apparition d'une dépression capillaire négative, liée à la formation de ménisques dans les pores à la surface du béton. L'évolution de la dépression capillaire dans la phase liquide est à l'origine de la compression de la phase solide. C'est, durant cette phase que la fissuration du matériau a été observée. Elle se produit bien avant le début de prise et après le développement de la dépression capillaire. A cet âge, le matériau est dans un état plastique et n'a donc pas encore acquis une rigidité élevée. Après le démarrage de la dépression capillaire, le retrait continue à augmenter linéairement La fin de cette période est marquée par un changement de pente de la courbe de retrait. Il semble que le temps au bout duquel la dépression capillaire n'est plus mesurable corresponde également à la fin de cette période.

- La seconde période

Durant cette phase, la cinétique des déformations diminue et finit par ne plus évoluer, car le matériau devient de moins en moins plastique, à cause de l'hydratation. Cette période est marquée par le début de prise du matériau. Durant cette seconde période, le degré de saturation des bétons commence à diminuer alors que les variations de volume du béton se stabilisent. L'évaporation, encore importante, ne conduit pas à de fortes déformations des bétons.

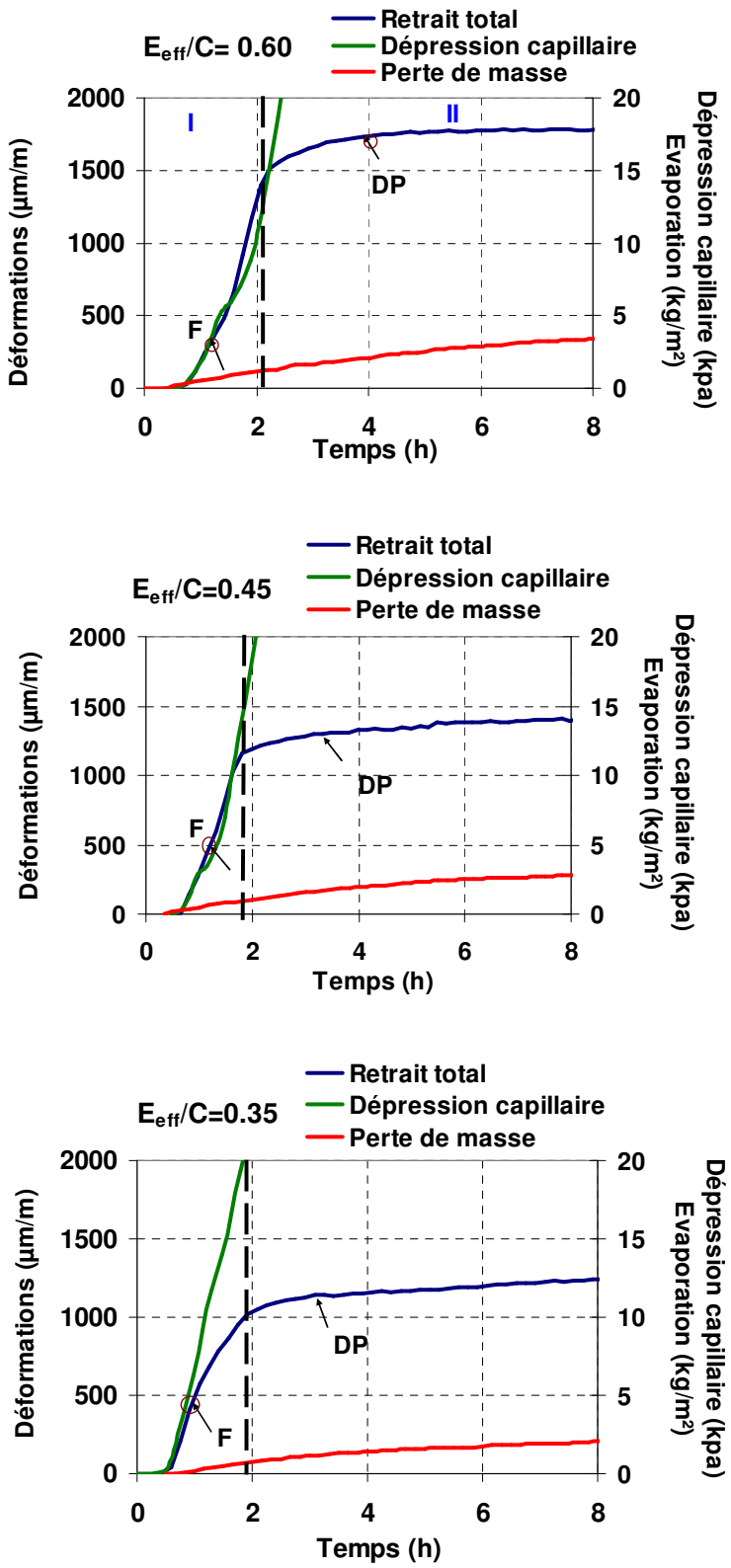


Figure III-85: Evolution des déformations plastiques, de l'évaporation et de la dépression capillaire des trois bétons avec vent.

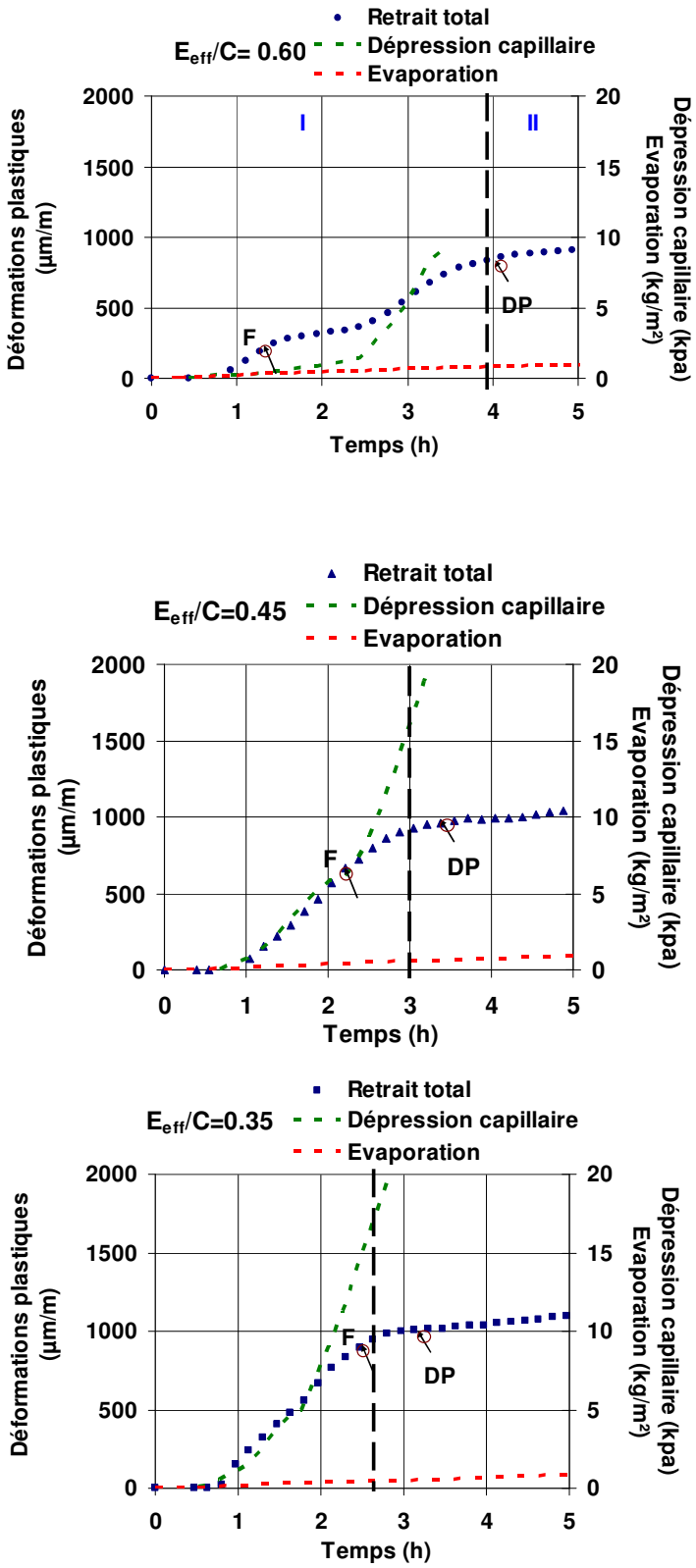
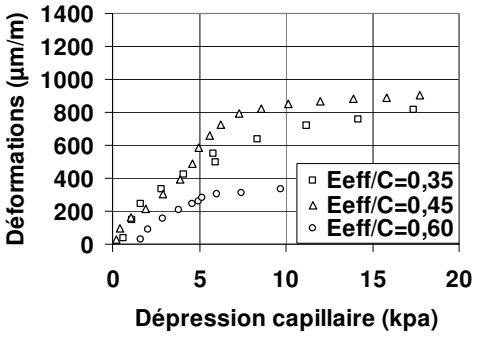
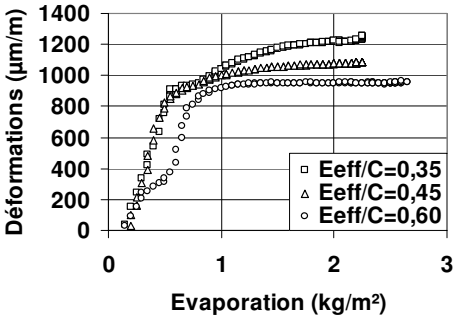


Figure III-86: Evolution des déformations plastiques, de l'évaporation et de la dépression capillaire des trois bétons sans vent.

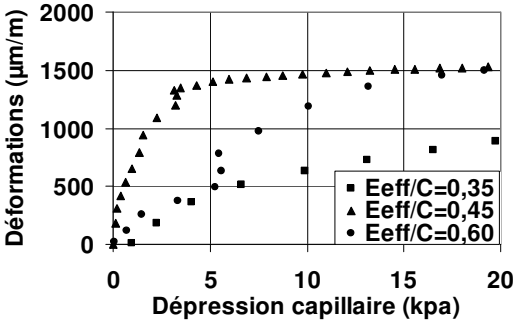
On retrouve les deux périodes observées sur les figures III-85 et III-86 sur les graphes déformations en fonction de l'évaporation et dépression capillaire en fonction de l'évaporation, pour les deux conditions de séchage (figure III-87):

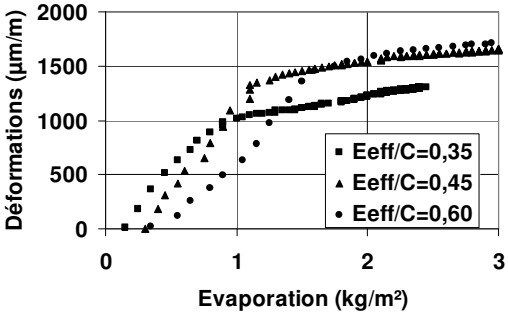
- Une zone linéaire, où la déformation est proportionnelle à la pression capillaire et à l'évaporation. La contraction du squelette solide est principalement provoquée par l'évaporation. Durant cette phase, la fissuration se produit juste après le démarrage de la dépression capillaire.
- Une zone asymptotique, qui présente une évolution de l'évaporation sans déformations de retrait. La teneur en eau diminue, la dépression capillaire continue à augmenter et le squelette se rigidifie





(**a**) : Sans vent





(**b**) : Avec vent

Figure III-87: Evolution des déformations suivant l'évaporation et la dépression capillaire.

III.3.1.2. La fissuration des bétons

Le tableau III-19 donne la quantité d'eau évaporée à l'âge de fissuration avec et sans vent. On remarque qu'il n'existe pas de corrélation évidente entre la quantité d'eau évaporée à l'âge de fissuration et l'âge de fissuration lui même. En effet, on a montré que l'âge de fissuration est lié à l'âge de démarrage de la dépression capillaire ; or il n'existe pas de relation évidente entre l'âge de démarrage de la dépression capillaire et l'évaporation de l'eau. Il semble donc que le suivi de l'évaporation ne soit pas suffisant pour prédire l'âge de fissuration.

	Quantité d'eau évaporée à l'âge de fissuration (kg/m²)	
E_{eff}/C	Sans vent	Avec vent
0,6	0,30 (±0,10)	0,90 (±0,20)
0,45	0,41 (±0,40)	0,77 (±0,30)
0,35	0,31 (±0,10)	0,43 (±0,10)

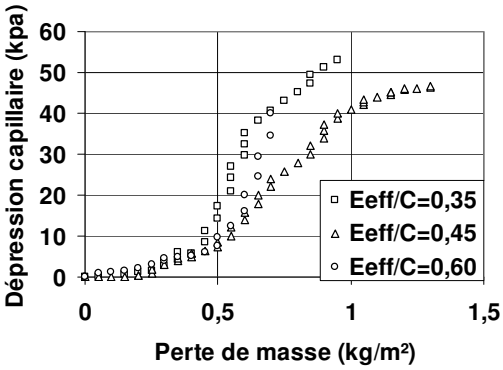
Tableau III-19: Quantité d'eau évaporée à l'âge de fissuration.

La mise en relation de données relatives au démarrage de la dépression capillaire et à la fissuration, montre que l'âge de fissuration est lié à l'âge de démarrage de la dépression capillaire. Avec vent, dans des conditions dessiccatives sévères, plus le rapport E_{eff}/C est grand, plus la fissuration apparait tardivement. Par exemple, pour les rapports E_{eff}/C de 0,35 et 0,45, on note que la fissuration survient plus tardivement en l'absence de vent puisque que la dépression capillaire démarre plus tard en l'absence de vent. Par contre, pour le rapport E_{eff}/C=0,6 on note que l'âge d'apparition de la fissure est identique avec et sans vent.
Tout comme l'âge de fissuration, l'âge de démarrage de la dépression capillaire diminue en présence de vent. Pour les rapports E_{eff}/C=0,45 et E_{eff}/C=0,6 la fissuration intervient dans la première période, lorsque la dépression capillaire se développe lentement que ce soit avec ou sans vent. Par contre, pour le rapport E_{eff}/C=0,35 la fissuration intervient dans la seconde période, lorsque la dépression capillaire se développe rapidement.

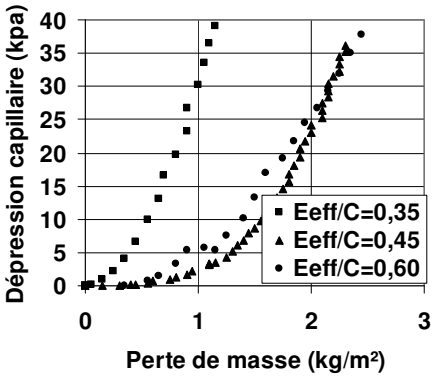
En traçant l'évolution de la dépression capillaire en fonction de l'évaporation pour les deux conditions de séchage, différentes informations émanent des courbes (figure III-88):

- Dans des conditions sans vent, la première phase quasi-linéaire est identique pour les trois bétons étudiés. C'est durant cette première phase que se produit la fissuration pour les trois bétons étudiés. Les flux d'évaporation quasi identiques pour les trois bétons peuvent expliquer ce comportement similaire. Par contre, au démarrage de la seconde phase, l'évolution de la dépression capillaire avec l'évaporation diverge d'un béton à un autre.

- Dans des conditions avec vent, au cours de la première phase, les courbes sont identiques pour les bétons de rapport $E_{eff}/C=0,45$ et $E_{eff}/C=0,60$. La fissuration se produit pendant cette première phase pour les bétons de rapport $E_{eff}/C=0,45$ et $E_{eff}/C=0,60$. Pour le béton de rapport $E_{eff}/C=0,35$, cette première phase n'existe pas et la fissuration a lieu pendant la seconde phase.



(**a**) : Sans vent



(**b**) : Avec vent

Figure III-88: Evolution de la dépression capillaire suivant la perte de masse

D'après les résultats obtenus, l'ouverture de fissure, beaucoup plus importante, observée en présence de vent, pourrait s'expliquer par la quantité d'eau évaporée (tableau III-20) huit heures après le démarrage de l'essai qui est systématiquement plus faible sans vent qu'avec vent.

En comparant le temps t_j (des déformations longitudinales) et l'âge de fissuration, on remarque que la fissuration a lieu pendant la phase où les déformations sont linéaires en fonction du temps, sauf pour la formulation $E_{eff}/C=0,35$ pour laquelle, sans vent, la fissuration intervient juste après la fin de la phase linéaire. Dans ces conditions, le béton frais reste proche de la saturation.

	Évaporation 8h après l'âge de fissuration (kg/m²)	
E_{eff}/C	Sans vent	Avec vent
0,6	1,45 (±0,20)	3,53 (±0,20)
0,45	1,43 (±0,10)	2,93 (±0,30)
0,35	1,18 (±0,10)	1,95 (±0,20)

Tableau III-20: Évaporation des bétons huit heures après introduction de l'eau.

Le tableau III-21 donne les déformations longitudinales, corrigées des effets thermiques, mesurées 8 heures après le démarrage de l'essai. On constate que pour le rapport E_{eff}/C=0,35, les déformations obtenues 8 heures après le démarrage de l'essai sont du même ordre de grandeur avec ou sans vent. Par contre, lorsque le rapport E_{eff}/C augmente l'écart entre les déformations obtenues avec et sans vent augmente : pour le rapport E_{eff}/C=0,60, les déformations obtenues en présence de vent sont deux fois supérieures à celles obtenues sans vent. Cette tendance est identique à celle observée pour l'ouverture de fissure. Les données relatives à la fissuration et aux déformations plastiques du matériau montrent qu'il existe une bonne corrélation entre l'ouverture maximale de fissure et les déformations longitudinales.

Bétons	Déformations à 8h (µm/m)	
	Sans vent	Avec vent
E_{eff} /C=0.60	930	1930
E_{eff} /C=0.45	1147	1474
E_{eff} /C=0.35	1170	1118

Tableau III-21: Déformations longitudinales 8 heures après démarrage de l'essai

III.3.2. Analogie avec un milieu capillaro-poreux soumis à un séchage de type convectif

A la sortie du malaxeur, le béton frais est en déséquilibre thermodynamique avec le milieu ambiant. Le séchage va lui permettre de retrouver, très lentement, un équilibre hydrique avec le milieu ambiant. L'extraction de l'eau d'un milieu poreux, généralement appelée séchage, est le plus souvent interprétée par l'intermédiaire de la cinétique de séchage. L'observation des cinétiques d'évaporation de l'eau en milieu capillaro-poreux soumis à une atmosphère séchante contrôlée fait généralement apparaître trois périodes de séchage : une première période durant laquelle la vitesse est constante, une deuxième période qui correspond à un premier ralentissement de la vitesse suivie d'une troisième période qui correspond à une seconde décroissance de la vitesse (Kowalski 2001; Moyne 1987; Scherer 1990; Yanful 1997).

III.3.2.1. La cinétique de séchage des bétons à l'état plastique

Pour l'étude du comportement des bétons au très jeune âge, seule la première période, correspondant à un flux d'évaporation constant nous intéresse. L'interprétation du séchage la plus fréquemment adoptée, se base sur l'identification des différents modes de transport de matière qui se succèdent (Nadeau and al. 1995; Pourcel and al. 2007). Durant la première période à vitesse constante le séchage provoqué par les caractéristiques de l'atmosphère extérieure se traduit par un transport d'eau liquide jusqu'à la surface séchante, modélisé par la relation de Darcy généralisée (Coussy and al. 2001).

Cette période est donc associée au domaine funiculaire. Durant cette phase, la vitesse d'évaporation de l'eau dans le béton est supérieure à la vitesse d'évaporation de la surface d'eau libre. Ceci peut être attribué à la rugosité de la surface du béton qui augmente la surface d'échange béton/atmosphère séchante.

Durant cette phase, la vitesse de séchage ne dépend que des conditions externes. En effet, la résistance au transfert pendant cette période est exclusivement confinée dans une couche limite à la surface du béton humide. La nature et la structure interne du béton n'interviennent pas. Sans vent, les flux d'évaporation des trois bétons sont pratiquement identiques et légèrement supérieurs à celui d'une surface d'eau libre. Par contre, en présence de vent, le flux d'évaporation des bétons de rapport $E_{eff}/C=0,60$ est bien supérieur à celui des deux autres bétons. Ceci est probablement dû à une grande capacité de déformation de ce béton.

Holt and al. (1994) ont entrepris des essais de mesure de l'évaporation en faisant varier la vitesse du vent. Les résultats obtenus (figure III-89) confirment que la théorie des trois phases de séchage des matériaux capillaro-poreux est applicable au séchage des bétons à l'état plastique, lorsque ceux-ci sont à température constante..

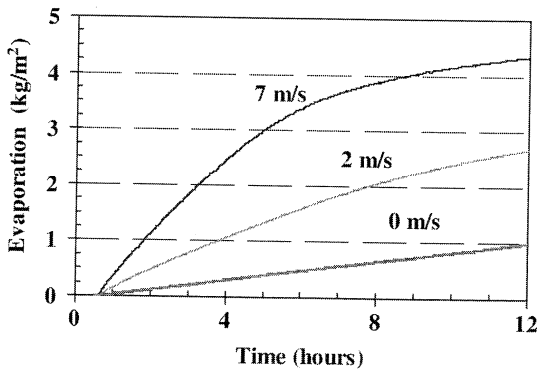


Figure III-89: Evaporation en fonction des conditions de séchage (Holt and Al. 2004).

Une étape essentielle de l'analyse des cinétiques réside dans la reconnaissance des points critiques qui traduisent les transitions entre les différentes périodes de séchage. Le tableau III-22 donne les teneurs en eau critique qui correspondent au passage de la première phase de séchage à la seconde phase de séchage, c'est-à-dire à la fin du domaine funiculaire. Ces teneurs en eau critique ont été déterminées à partir des caractéristiques physiques des trois bétons (tableau II-5), des flux initiaux d'évaporation (tableau III-8) et des temps ti (tableau III-9).

On constate que pour les bétons de rapport $E_{eff}/C=0,45$ et $E_{eff}/C=0,35$ les teneurs en eau critique sont identiques avec et sans vent, ce qui est logique puisque le point critique est une caractéristique du milieu granulaire humide. Ce n'est pas le cas pour le rapport $E_{eff}/C=0,60$, pour lequel, la teneur en eau critique sans vent est légèrement supérieure à celle obtenue en présence de vent. Ceci peut s'expliquer par le fait que, sans vent, la première phase de séchage dure environ 11 heures. A cette échéance, le matériau a déjà commencé à se structurer et à se transformer.

Bétons	Teneur en eau critique (%)	
	Sans vent	Avec vent
E_{eff} /C=0.60	8,1	7,3
E_{eff} /C=0.45	7,2	7,1
E_{eff} /C=0.35	6,5	6,5

Tableau III-22: Teneur en eau critique.

III.3.2.2. Le couplage séchage-retrait-contraintes mécaniques dans un milieu déformable : cas du béton à l'état plastique.

Lors du séchage, les milieux poreux déformables restent saturés jusqu'à l'entrée d'air. Durant cette phase, le volume d'eau évaporée doit être occupé instantanément par la phase solide afin de maintenir un flux de masse constant à la surface. Les variations de volume de l'échantillon sont donc égales au volume d'eau évaporée. Pour assurer un flux de masse constant à la surface, il faut que la pression de l'eau diminue, ce qui conduit au développement de la dépression capillaire.

Les valeurs de la dépression capillaire ou de la pression de l'eau sont donc directement liées à l'aptitude du béton frais à se déformer, c'est-à-dire qu'elles dépendent des paramètres mécaniques du milieu granulaire humide. Par contre, les gradients de pression d'eau ou de dépression capillaire ainsi que leurs évolutions n'ont pas de forte liaison avec la déformation du milieu, ils sont liés plutôt à la facilité avec laquelle le fluide peut s'écouler dans le milieu c'est-à-dire à la perméabilité du béton frais (Agreba and al. 1990; Jomaa 1991; Cáceres 2006).

Pour les milieux poreux les moins déformables et peu perméables la vitesse de séchage est plus faible et la montée de la dépression capillaire est très forte. C'est le cas pour le séchage avec vent du béton de rapport $E_{eff}/C=0,35$ pour lequel la première phase de développement de la dépression capillaire n'existe pas.
La dépression capillaire se développe rapidement à une vitesse voisine de 15 kPa/heure. C'est également pour ce béton qu'on a mesuré le plus faible flux d'évaporation en présence de vent.

Les milieux poreux très déformables et très perméables amènent à de plus fortes vitesses de séchage. La montée de la dépression capillaire est par contre plus faible. C'est le cas pour le séchage avec vent du béton de rapport $E_{eff}/C=0,60$ pour lequel la dépression capillaire se développe lentement, à une vitesse voisine de 7 kPa/heure. C'est également pour ce béton qu'on a mesuré le plus fort flux d'évaporation en présence de vent. Le béton de rapport $E_{eff}/C=0,45$ présente un comportement intermédiaire, la dépression capillaire se développe à une vitesse de 9 kPa/heure en présence de vent.

Les résultats de cette étude montrent que le comportement des bétons au très jeune âge présente deux étapes bien distinctes : un premier domaine durant lequel les déformations sont importantes et le béton reste proche de la saturation, suivi d'un second domaine durant lequel les déformations sont faibles et le degré de saturation diminue (figure III-90). Ces résultats sont similaires à ceux observés pour les sols fins soumis à la dessiccation (Devillers and al. (2009). Les essais de retrait gêné réalisés par Péron and al. (2009), sur un limon de la région de Bioley en Suisse, ont montré que la fissuration de ce limon intervenait au voisinage de la pression d'entrée d'air. Ils ont également montré que la plus grande partie des déformations a lieu lorsque le matériau est saturé, ou au voisinage de la saturation. Lorsque la dépression capillaire dépasse la pression d'entrée d'air, les déformations qui accompagnent la diminution de la teneur en eau sont quasi nulles.

Les résultats montrent que pour les trois bétons la fissuration intervient au voisinage de la saturation. En effet, la fissuration intervient pour de faibles valeurs de la dépression capillaire, voisines de la pression d'entrée d'air. Cette pression d'entrée d'air correspond au temps au bout duquel les variations du volume total de l'échantillon ne sont plus égales au volume d'eau évaporée. Slowik and al. (2008) ont réalisé des essais sur des pâtes de ciment et des bétons (figure III-91). On remarque, que pour les pâtes de ciment, l'entrée d'air intervient 130 minutes environ après le démarrage de l'essai, alors que pour les bétons, elle intervient beaucoup plus tôt, moins de 60 minutes après le démarrage de l'essai. L'entrée d'air dans les pores en surface du béton amorce la fissuration

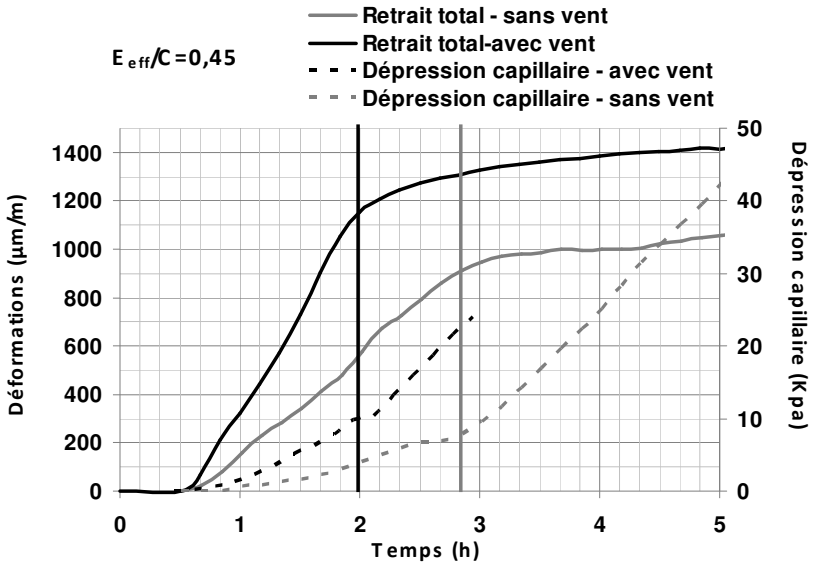
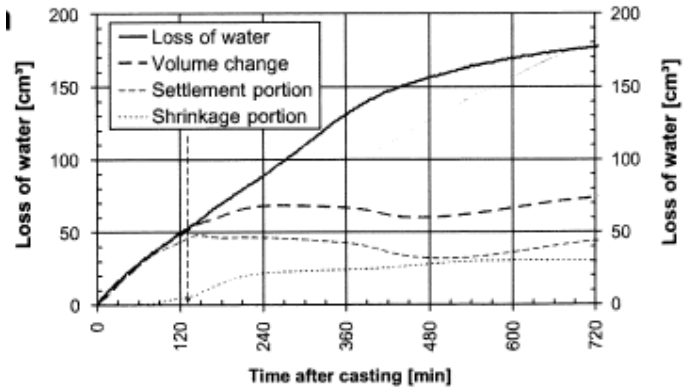
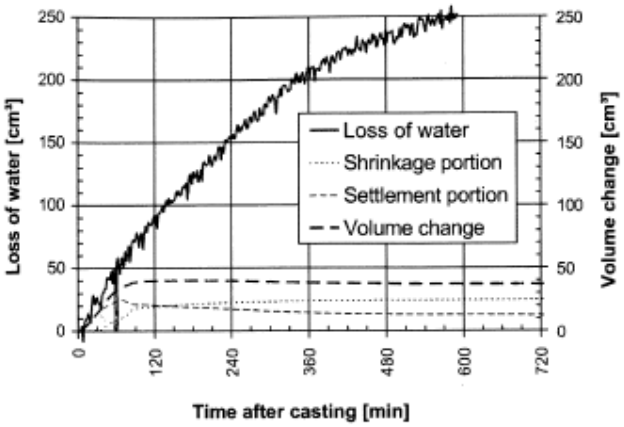


Figure III-90: Déformations et dépression capillaire pour le béton de rapport E_{eff} /C =0,60.



(**a**) : pâte de ciment



(**b**) : béton

Figure III-91: Variations de volumes de déformations et d'eau évaporée (Slowik 2008).

En présence du vent, la pression d'entrée d'air est très vite atteinte, c'est-à-dire dans l'heure qui suit le gâchage. Ce qui pourrait expliquer la fissuration des bétons à cet instant. Ainsi, la fissuration n'est pas directement causée par le retrait. Le retrait libre n'est qu'une manifestation des phénomènes qui provoquent la fissuration. Certains auteurs considèrent certes qu'une amplitude de retrait de 1000µm/m est une valeur critique, mais ils ne précisent pas si cela dépend de la nature du béton, ou même du dispositif de mesure. Cette affirmation pourrait être valable dans des conditions de séchage modéré, cependant, la fissuration survient dans certains cas (notamment en présence de vent) à des faibles valeurs d'amplitudes de déformations, c'est-à-dire inférieures à 1000µm/m.

Le tableau III-23 montre que la pression capillaire à l'âge de fissuration, voisine de la pression d'entrée d'air n'est pas une caractéristique intrinsèque de la formulation de béton, elle va dépendre des déformations plastiques du béton avant fissuration : plus les déformations plastiques du béton sont importantes, plus la pression capillaire à l'âge de fissuration sera importante.

Par exemple, pour le béton de rapport E_{eff}/C=0,35, en présence de vent la pression d'entrée d'air est de 4,9 kPa pour une déformation correspondante de 500 µm/m alors que sans vent la pression d'entrée d'air est de 13,6 KPa pour une déformation correspondante de 930 µm/m. Ces résultats sont conformes à ceux observés pour les sols : lorsque la densité apparente sèche augmente, la taille des pores diminue et la pression d'entrée d'air du sol augmente.

Bétons	Pression d'entrée d'air (kPa)	
	Sans vent	Avec vent
E_{eff} /C=0.60	1,0	3,5
E_{eff} /C=0.45	4,2	4,5
E_{eff} /C=0.35	13,6	4,9

Tableau III-23: Pression d'entrée d'air des bétons.

III.4. Conclusion

Deux périodes bien distinctes sont observées dans le comportement des bétons au très jeune âge : une première période durant laquelle la vitesse des déformations évolue linéairement dans le temps. Cette période s'accompagne d'importantes amplitudes de déformation liées à une quantité d'eau évaporable élevée. La second période durant laquelle la vitesse des déformations et l'évaporation diminuent considérablement. Ce comportement est similaire à celui observé pour les sols argileux soumis à la dessiccation.

Les résultats montrent une importante influence du séchage pour les bétons de bâtiment, alors qu'elle est moins prononcée au niveau des bétons d'ouvrage d'art.
Dans des conditions sévères, le vent, bien qu'il soit faible (20km/h), influe, de façon prononcé, sur les bétons de bâtiment, c'est-à-dire des bétons avec une porosité élevée (un rapport E_{eff}/C élevé). Ces derniers sont très sensibles à la fissuration, car sujet à des déformations très importantes et un flux d'évaporation très élevé. Ainsi l'absence de cure dans l'heure qui suit la période de gâchage est fatale pour l'ouvrage, car la dépression capillaire qui est à l'origine des déformations plastiques du matériau, se développe très rapidement, d'où une entrée rapide dans le matériau entrainant la fissuration précoce du matériau.
Dans des conditions de séchage modéré, l'amplitude des déformations est fortement réduite. La distribution poreuse du matériau n'influe pas sur l'évaporation. De plus la cinétique de développement de la dépression capillaire est similaire pour les trois bétons étudiés. Cependant, vis-à-vis de la fissuration, l'apparition et l'ouverture des fissures diffère selon le béton (pour les bétons d'ouvrage d'art, la fissure apparaît beaucoup plus tard, et reste la plus faible des trois bétons).
Lors du séchage du béton frais, le matériau devient insaturé en surface suite au départ d'eau, le liquide restant va être mis en tension suite au développement de la dépression capillaire. La mise en tension du liquide à deux conséquences. La première étant la contraction du squelette granulaire qui supporte la tension et la seconde est le transport de l'eau vers l'extérieur conformément au gradient de pression, liés à la facilité avec laquelle le fluide s'écoule dans le matériau (perméabilité du matériau).

Les résultats expérimentaux montrent que la fissuration des bétons est indépendante des déformations plastiques du matériau. Car en présence de vent, la fissuration se produit quasiment au même instant pour les trois bétons, bien que les déformations évoluent suivant le rapport E_{eff}/C. En l'absence de vent, l'évaporation est indépendante de la distribution poreuse des bétons, et la fissuration se produit beaucoup plus tard lorsque le rapport E_{eff}/C diminue.

CHAPITRE IV : INFLUENCE DE LA CURE SUR LE COMPORTEMENT DU BETON FRAIS

IV.1. Effets de la méthode de cure sur le comportement du béton frais

Le but de la cure est de réduire le transfert d'humidité du béton à son environnement et ainsi de retenir l'eau à l'intérieur de la microstructure du béton, pour garantir l'hydratation du béton et une résistance mécaniques adéquates (Al-Kkaiat and Haque 1998 ; Bonavetti and al. 2000). Le maintien d'un taux humidité élevé ne dépend pas seulement du type de cure mis en œuvre mais aussi des conditions environnementales dans lequel le béton est mis en place, car à sa sortie du malaxeur, ces dernières ont une influence directe sur les différents mécanismes qui régissent le comportement du matériau poreux (McCarter and al. 2001).

L'usage de différents modes de cure montre que la cinétique des bétons protégés par la cure diffère de celle des bétons non protégés. De plus chaque mode de cure exerce une influence sur le comportement du béton, pour une période bien précise.

IV.1.1. La cure du béton par des matériaux d'étanchéité : le film plastique étanche

La perte de masse négligeable (voir même absente) observée au niveau des bétons recouverts de film plastique montre bien que ce dernier reste le meilleur procédé de cure contre toute évaporation à la surface du béton, particulièrement avant la période prise (McCarter 2001). Généralement la couleur du film plastique a un effet sur la température de surface du béton. L'usage d'un film plastique de couleur clair, permet de réfléchir les rayons lumineux et donc de maintenir une température constante, à la surface du matériau, tout au long de l'essai. Contrairement au produit de cure, il permet une rétention d'eau à la surface du béton. Ce qui est montré par la présence de goulettes d'eau sur le film plastique après chaque essai. Cette eau permet de garder humide la surface du béton frais et donc une bonne hydratation du ciment. L'efficacité de la cure par le film plastique dépend du degré d'emprisonnement de l'eau. En particularité les pertes d'eau par les bords ou la présence de trous, la diminuent.
L'usage d'un film plastique permet de réduire par cinq les déformations plastiques du plastique, et par conséquent la capacité de déformation du matériau, comparé au produit de cure. L'usage du film plastique est utile en cure initiale, pour éviter la fissuration précoce du matériau, compte tenu des résultats obtenus sur la fissuration à l'état plastique du béton.

Déformations plastiques avant la prise (µm/m)	$E_{eff}/C = 0.60$	$E_{eff}/C = 0.45$	$E_{eff}/C = 0.35$
Avec produit de cure	600	473	265
Avec film plastique	154	140	130

Tableau IV-24: Les déformations plastiques des bétons avant la prise.

IV.1.2. La cure du béton par des liquides en phases solvantés

Les produits de cure peuvent empêcher, dans une certaine mesure, l'évaporation de l'eau à l'intérieur du béton frais ou bien la retarder, afin de permettre la bonne hydratation de la pâte de ciment (Alsayed and al. 2003 ; Huo and Wong 2006 ; Carrier and al. 1970).
Le produit de cure reste sur la surface du béton jusqu'à la fin du séchage.
Les produits de cure sont composés de matériaux résineux synthétiques ou naturels dissous dans des solvants. Ces solutions sont appliquées à la surface du béton frais, et les solvants permettent d'évaporer les enduits résineux qui agissent pour retarder l'évaporation de l'eau du béton. Nombreux de ces composés, en particulier ceux qui sont conçus comme des agents d'imperméabilisation, permettent de rester sur la surface du béton indéfiniment, pour empêcher le passage de l'eau à travers la surface (Perz 1981).
L'étude de la cure des bétons par le produit de cure a montré que ce dernier est efficace pour diminuer les déformations plastiques du béton comme le retrait plastique lié au séchage (Al-Gahtani 2010 ; Nassif and al.2007).

IV.1.2.1. Etude de l'efficacité du produit de cure : le Maskure 114

Le produit de cure utilisé est un produit solvanté composé d'une résine de solvant diluée, avec un pouvoir couvrant de 200g/m² et 11 à 13% d'extrait sec. Les caractéristiques du produit sont fournies en annexe A.

Le produit est pulvérisé en surface. Il reste en surface à cause de sa faible densité comparée à celle du béton. Après évaporation du solvant, la résine polymérise et forme une pellicule efficace pour la rétention d'eau et donc empêche une partie de l'évaporation (Wang and Al. 1994).

Figure IV-92: Pellicule formée après pulvérisation du produit de cure

Pour une surface d'éprouvette de 200 cm², la masse de produit cure à pulvérisé en surface est de 4g. Ainsi, 3.52g sont constitués de solvant et 0.48g d'extrait sec.
L'extrait sec du produit de cure a été évalué à partir de plusieurs échantillons, cinq jours après pulvérisation. Ce dernier est estimé à 14.43% (±0.02%), ce qui confirme les données apportées par le fabricant.
Le flux d'évaporation propre du produit de cure est estimé à 0.82 kg/m²/h (figure IV-93).

Donc, l'évaporation totale du solvant est estimée à 0.18 kg/m², c'est-à-dire au bout de 0.21h (≈13 minutes).

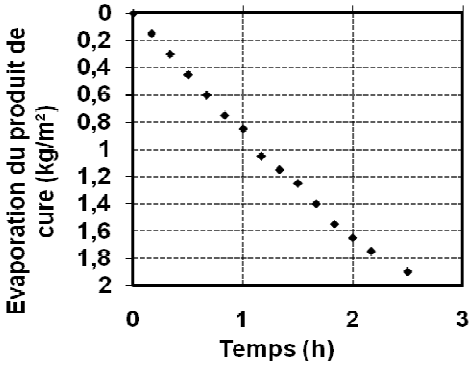


Figure IV-93: Evaporation du produit de cure

Les coefficients de protection de produit de cure a été déterminé pour les trois bétons, les résultats sont présentés dans le tableau IV-25. Le coefficient de protection augmente lorsque le rapport E_{eff}/C diminue. Cela traduit bien l'efficacité du produit de cure, car, selon le mode opératoire préconisé dans l'annexe 1 du règlement NF « Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis-produit de cure », un produit de cure empêche l'évaporation de l'eau lorsque son efficacité atteint les 90% à 6h.

Coefficient de protection (%)	$E_{eff}/C = 0.60$	$E_{eff}/C = 0.45$	$E_{eff}/C = 0.35$
A 6h	76	84	96
A 24h	71	81	87

Tableau IV-25: Les coefficients de protection des bétons.

IV.1.2.2. Le fonctionnement du produit de cure

En comparant la perte de masse propre du produit de cure pulvérisé sur une planche en bois et celle des éprouvettes de bétons recouverts de produit de cure (figure IV-94), il en ressort que le flux des bétons recouverts de produit de cure reste constant environ les cinq première heures tandis que celui du produit de cure pulvérisé sur la planche en bois reste constant les 15 premières minutes.

Ce qui sous entend que l'évaporation des bétons protégés par la cure, durant les cinq premières heures, ne correspond pas uniquement au solvant du produit de cure qui s'évapore, car une faible quantité du produit pénètre dans les pores capillaire du matériau. Durant le processus de polymérisation de la résine, la perte de masse enregistrée est notamment celle du béton.

La polymérisation de la résine a donc un effet sur le flux d'évaporation des bétons protégés par la cure. En effet, elle semble prendre fin 8h après introduction de l'eau dans le malaxeur, et date à laquelle un changement de pente est observé, sur les bétons recouverts de produit de cure (figure IV-94).

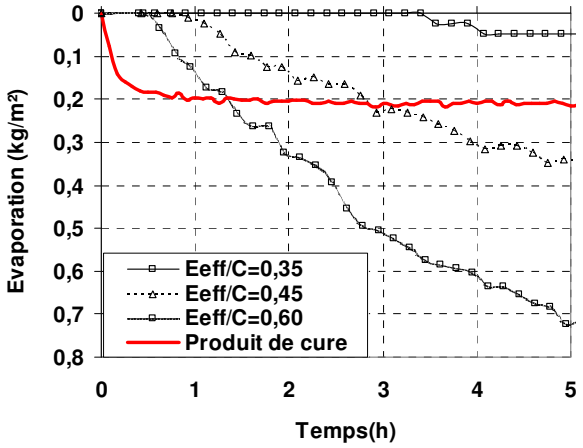


Figure IV-94: Evaporation d'une planche bois et des bétons protégés par le produit cure.

Les courbes d'évaporation des bétons protégés par le produit de cure (E_{eff}/C=0,60 et E_{eff}/C=0,45) présentent trois changements de pentes, qui constituent quatre périodes dans l'évolution du matériau (figure IV-95) :

- La **première période** se situe dans l'heure qui suit le gâchage. Durant cette phase, seule la phase solvantée du produit de cure s'évapore. Cependant pour les bétons de rapport E_{eff}/C=0,60, une perte de masse est enregistrée durant cette période. En effet, le matériau étant beaucoup plus fluide, dispose ainsi d'une faible quantité d'eau de ressuage en surface qui s'évapore.

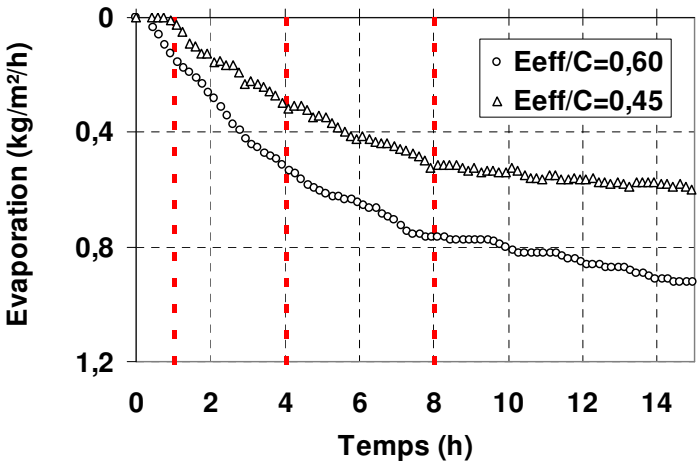


Figure IV-95: Evaporation des bétons recouvert de produit de cure.

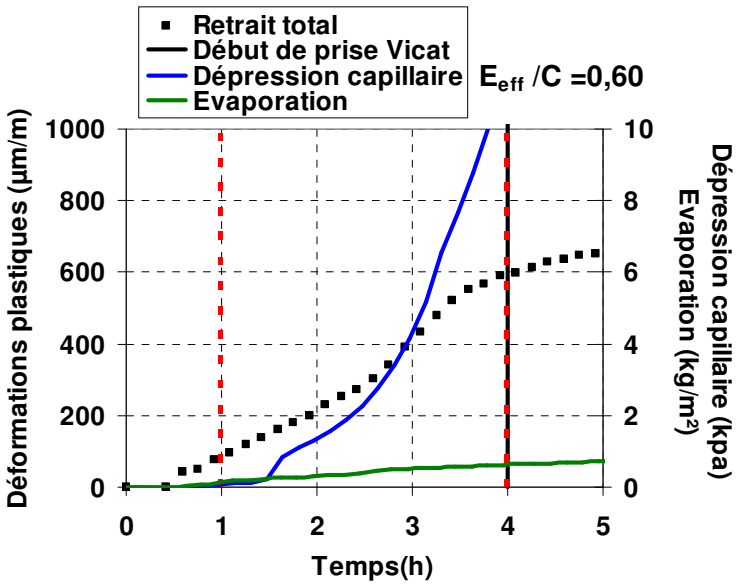
- La **seconde période** débute une heure après la période de gâchage et se termine environ quatre heures après la période de gâchage, c'est à dire qu'elle se termine pendant la prise. L'hydratation de la pâte de ciment est à l'origine de la diminution de l'évaporation.
- La **troisième période** se situe entre 4h et 8h. Le changement de pente qui survient au bout de 8h correspond sans doute à la fin de la polymérisation de la résine, formant alors une pellicule imperméable contre l'évaporation.
- La **dernière période** se produit avant la fin de prise. Durant cette phase la perte de masse devient négligeable.

Cependant les courbes d'évaporation des bétons $E_{eff}/C=0.35$, ne présente qu'un seul changement de pente qui se produit une heure après la période de gâchage. La polymérisation de la résine n'influe pas sur la cinétique d'évaporation. La porosité et la faible capacité de déformation du matériau (liée à une faible évaporation) serait à l'origine des résultats obtenus.

Les différentes périodes observées lors de l'évaporation des bétons protégés par la cure, peuvent être assimilées à celle de l'évolution des déformations et phénomènes corolaires du matériau en cours d'hydratation, pour les bétons de rapport $E_{eff}/C=0,60$ et E_{eff}/C 0,45 (figure IV-96). En effet dans l'heure qui suit la période de gâchage, aucun phénomène ne se produit.

Le matériau commence à se déformer dès lors qu'il commence de l'eau en surface. Or l'évaporation qui se produit pendant cette période est bien celle du produit du cure.

La pression capillaire se développe lors que justement tout le produit s'est évaporé et donc lorsque le matériau perd de l'eau en surface.



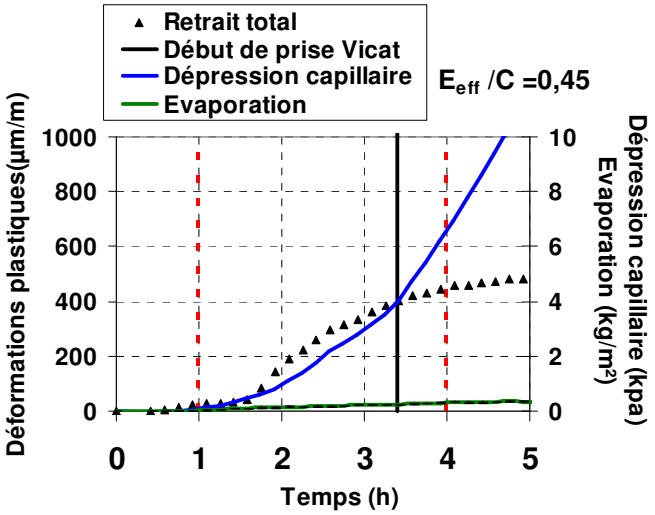


Figure IV-96: Evolution des déformations et des phénomènes corollaires du béton en cours d'hydratation.

Lors de la polymérisation de la résine, la résine protège partiellement le matériau contre un retrait important. Peu de temps après cinq heures, les déformations n'évoluent plus, bien que le matériau soit entrain de faire prise. La polymérisation complète de la résine influerait sur l'évolution des déformations.

Par contre pour les bétons de rapport E_{eff} /C=0,35, la courbe de perte de masse, ne présente pas ses différentes phases, la courbe de perte de masse reste linéaire dans le temps. L'assimilation des différentes périodes observées au niveau des deux autres bétons parait moins évidente (figure IV-97).

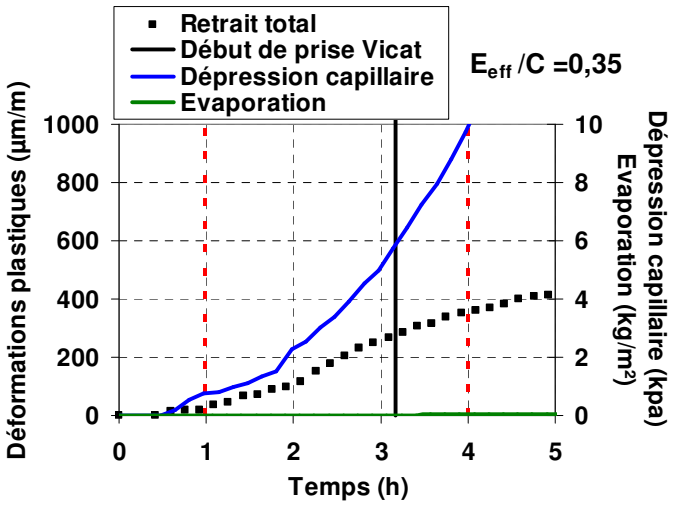


Figure III-97: Evolution des déformations et des phénomènes corollaires du béton en cours d'hydratation.

IV.2. Le comportement du béton frais suivant la cure

Le béton frais doit être protégé pendant un temps suffisant, après la mise en œuvre pour éviter un départ trop rapide d'eau qui se traduirait, non seulement, par des variations dimensionnelles importantes pouvant amorcer l'apparition de fissures, mais aussi par une hydratation incomplète du ciment (Balayssac and al. 1997 ; Bombled 1984 ; El-Dieb 2006). D'où la nécessité de protéger du béton frais, surtout avant la prise où il est sujet à d'importantes déformations (Ho 1987). La qualité des premiers centimètres de béton, d'une part, est essentielle pour des raisons d'esthétiques et/ou de durabilité (Devillers and al. 2007).

L'étude du comportement de la cure a été réalisée suivant deux modes de cures bien distincts :

- usage d'un film plastique,
- usage d'un produit de cure,

IV.2.1. Étude du phénomène d'évaporation des bétons vis-à-vis de la cure

➢ Usage du film plastique

Aucune perte de masse n'est enregistrée au niveau des bétons protégés par le film plastique. Ce qui montre l'efficacité du film plastique contre toute évaporation à la surface du matériau.

➢ Usage du produit de cure

Les figures IV-98 et IV-99 présentent la courbe de perte de masse des bétons protégés par la cure, corrigée de l'évaporation du solvant contenu dans le produit de cure (la courbe représente la moyenne de perte de masse réalisée sur au moins trois échantillons). Pour les bétons protégés par le produit de cure, seules les courbes des bétons de rapport $E_{eff}/C=0,60$ et $E_{eff}/C=0,45$ démarrent par une partie linéaire pendant un certain temps et deviennent ensuite fortement non linéaires. La courbe des bétons de rapport $E_{eff}/C=0,35$, reste linéaire dans le temps (figure IV-99). Les faibles pertes de masse enregistrées, ne permettent pas de déterminer un flux d'évaporation initial. Cependant, comme pour les bétons non protégés, l'évaporation diminue lorsque le rapport E_{eff}/C diminue. Ainsi même en présence de cure, l'évaporation semble être influencée par les caractéristiques physiques du béton.

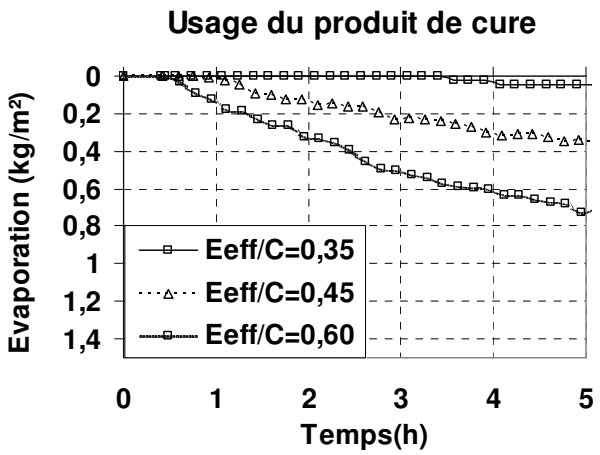


Figure III-98: Evaporation des trois bétons recouverts de produit de cure.

Le tableau IV-26 regroupe l'évaporation avant et après la prise des différents bétons selon le mode de cure mis en œuvre. D'après les résultats obtenus, la perte de masse diminue non seulement avec le rapport E_{eff} /C, mais aussi suivant le mode de cure mis en œuvre.
Même après 20h, l'évaporation des bétons protégés par le produit n'évolue presque plus, par rapport à celle des bétons dépourvus de cure.

Evaporation à 3h (kg/m²)	E_{eff}/C = 0.60	E_{eff}/C = 0.45	E_{eff}/C = 0.35
Sans mode cure	1.8 (± 0.4)	1.5 (± 0.1)	1.1 (±0.1)
Usage du produit de cure	0.7 (± 0.1)	0.3 (± 0.1)	0.1 (± 0.1)
Usage du film plastique étanche	-	-	-

Evaporation à 20h (kg/m²)	E_{eff}/C = 0.60	E_{eff}/C = 0.45	E_{eff}/C = 0.35
Sans mode cure	4.5 (± 0.4)	3.6 (± 0.2)	2.4 (±0.1)
Usage du produit de cure	1.0 (± 0.2)	0.6 (± 0.2)	0.4 (± 0.2)
Usage du film plastique étanche	-	-	-

Tableau IV-26 : La perte de masse à 3h et à 20h

La diminution progressive de l'évaporation s'explique par la réduction de la taille des pores et de l'hydratation, qui survient pendant et après la prise.
Les mesures de perte de masse ont permis d'évaluer l'efficacité du produit de cure. Bien qu'il ne réalise pas une cure parfaite, comme le film plastique, il permet néanmoins de limiter une évaporation trop importante, c'est dire il divise par trois voir même par dix la perte de masse (selon les bétons).

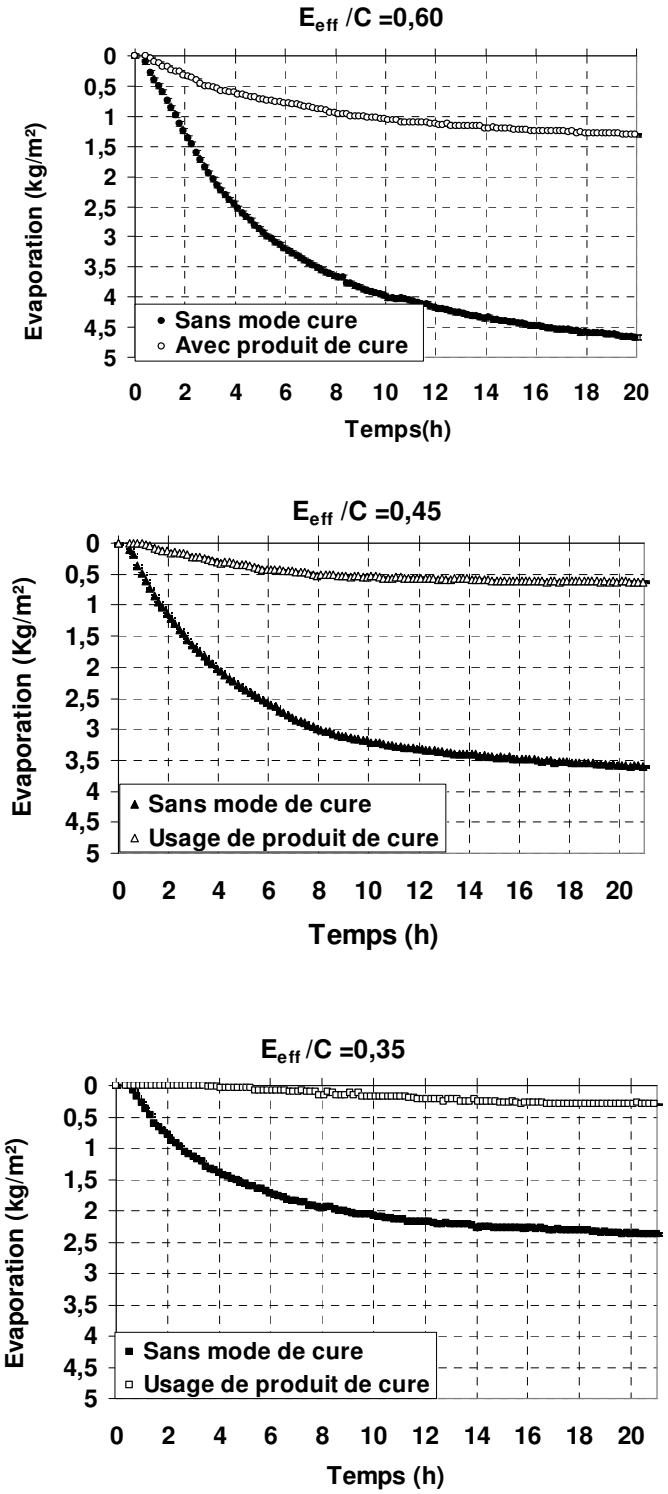
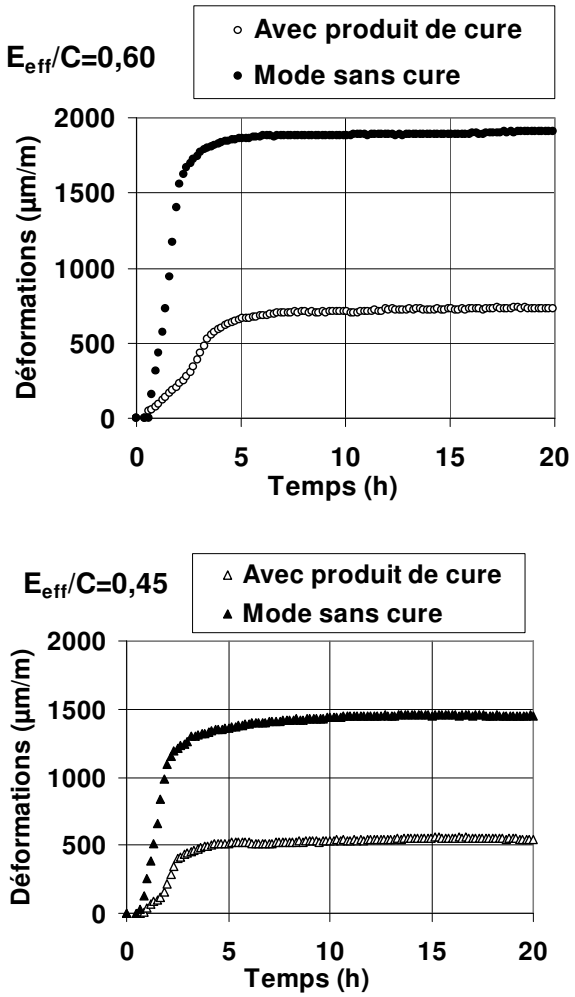


Figure IV-99 : Evaporation des trois bétons suivant le mode de cure mis en œuvre.

Les bétons protégés par le produit de cure ne suivent pas la cinétique de séchage identique à celle des matériaux poreux, comme observée, au niveau des bétons non protégés par la cure.
L'étanchéité imposée à la surface du béton lors du séchage est à l'origine d'un comportement du matériau, qui diffère de celui observé au niveau des bétons non protégés.
Ainsi la frontière du domaine funiculaire et pendulaire, comme observée au niveau des bétons non protégés par la cure (Chapitre III), ne peut être définie pour des bétons soumis à la cure. Car la structuration du matériau en cours de séchage, est influencée non pas par les conditions environnementales, mais plutôt par le procédé de cure utilisé.

IV.2.2. Évolution du retrait plastique en fonction du mode de cure utilisé

La figure IV-100 représente la moyenne des déformations longitudinales corrigées des effets thermiques, réalisées sur au moins trois échantillons.



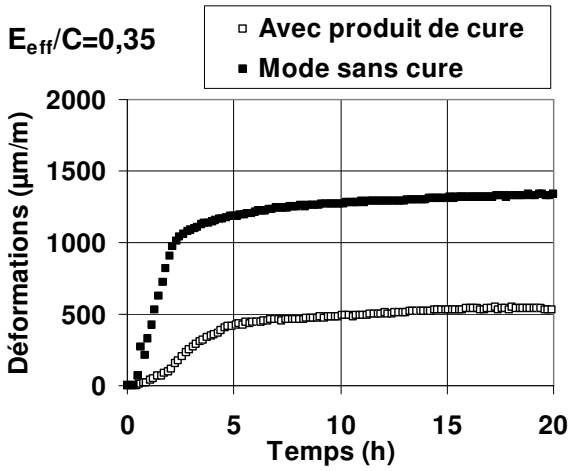


Figure IV-100: Déformations longitudinales non corrigées des effets thermiques.

Toutes les courbes démarrent par une partie linéaire permet de calculer la vitesse initiale de déformation (figure IV-100 et tableau IV-27). La vitesse initiale de déformation est plus importante pour les bétons non protégés. Il n'existe pas de tendance entre les différents bétons soumis au même mode de cure. Pour le rapport $E_{eff}/C=0,6$, la cinétique de déformation fait apparaitre deux pentes initiales observables pour les bétons non protégés et ceux recouverts de produit de cure (figure IV-100). La seconde pente est supérieure à la première (tableau IV-27).

Les courbes restent linéaires pendant une certaine durée t_j présentée dans le tableau IV-28. Contrairement aux observations faites au niveau des bétons recouverts par le film plastique, aucune tendance n'est remarquée pour les deux autres modes, sur la durée t_j. Quel que soit le rapport E_{eff}/C considéré, les temps t_j obtenus pour les bétons non protégés, sont inférieurs aux temps t_j obtenus pour les bétons protégés par le produit de cure. Ceci peut s'expliquer par une vitesse initiale de déformation plus faible en présence de cure. Les courbes sont ensuite fortement non linéaires, les vitesses de déformation diminuent jusqu'à devenir nulles.

Vitesses moyennes initiales (µm/m/h)				
	Sans mode de cure		Avec produit de cure	
	1er régime	2ème régime	1er régime	2ème régime
$E_{eff}/C = 0,60$	722	1361	175	248
$E_{eff}/C = 0,45$	482	-	247	-
$E_{eff}/C = 0,35$	929	-	200	-

Tableau IV-27:Vitesses moyennes initiales des déformations longitudinales.

	Temps t_j (h)	
	Sans mode de cure	Avec produit de cure
Eeff /C=0,60	1.94	2.93
Eeff /C=0,45	1.96	2.50
Eeff /C=0,35	1.06	2.92

Table IV-28: Temps t_j pendant lequel la déformation est linéaire en fonction du temps.

Les essais réalisés par Al-Gahtani (2010) sur l'influence du mode de cure sur les bétons à base de ciments composés, indiquent que l'application du produit de cure diminue à la fois les contraintes liées au retrait plastique. Le retrait plastique augmente linéairement et se stabilise jusqu'à atteindre une valeur constante. Cette stabilisation se produit justement au moment de la prise du matériau. Bien que la différence de retrait ne soit pas significative entre les deux composés de cure utilisés, un faible retrait plastique est tout de même enregistré au niveau des bétons protégés par le produit de cure constitué de composés de polymères acryliques (avec 368µm/m pour le produit de cure constitué de polymères acryliques, contre 400 et 520 µm/m respectivement pour les bétons protégés par un produit de cure à base d'eau et les bétons non protégés par la cure).

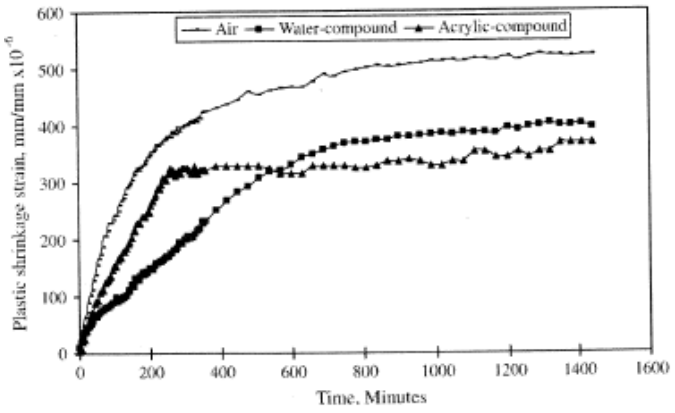


Figure 101: Retrait plastique des bétons à base de ciment CEM I composé.

IV.3. Le développement de la dépression capillaire suivant la cure

IV.3.1. Évolution de la dépression capillaire suivant le mode de cure utilisé

Les résultats de ces mesures montrent que la dépression capillaire se développe bien avant la prise pour les bétons non protégés et ceux recouverts de produit du cure (tableau IV-29 et les figures IV-102 et IV-103). Tandis que pour les bétons recouverts de film plastique, la dépression capillaire se développe pendant la prise. Cela s'explique par l'hydratation du matériau qui entraine une diminution de la teneur en eau dans le matériau, à l'origine de l'apparition de la dépression capillaire dans le matériau.

IV.3.1.1. Le développement de la dépression capillaire avec le film plastique

Pour les trois bétons recouverts de film plastique, les cinétiques de développement de la dépression capillaire sont identiques : à partir d'un temps compris entre 3,6 heures et 4,6 heures, la dépression capillaire commence à se développer lentement (tableau IV-29).
La dépression capillaire se développe durant la prise, quel que soit le rapport E_{eff}/C considéré. Ainsi, le développement de la dépression capillaire en condition endogène pourrait être un indicateur de début de prise.
Durant cette phase, la vitesse de développement de la dépression capillaire est comprise entre 0,2 kPa/heure et 0,7 kPa/heure suivant la formulation. Puis, à partir de 5 heures, la dépression capillaire augmente rapidement (tableau IV-29). Durant cette seconde phase, la vitesse de développement de la dépression capillaire est comprise entre 3 kPa/heure et 7 kPa/heure suivant la formulation.

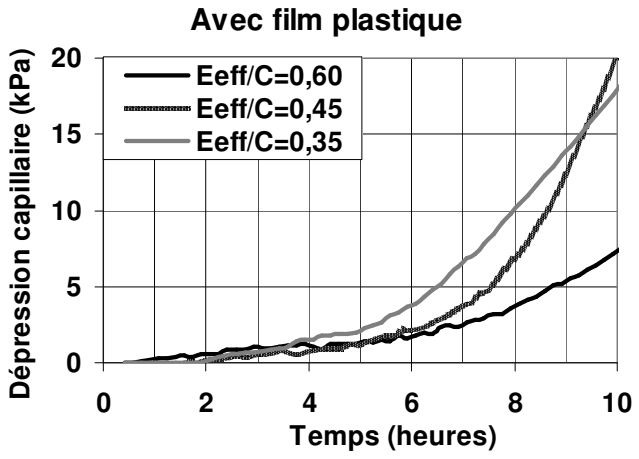


Figure III-102: Evolution de la dépression des trois bétons

IV.3.1.2. Le développement de la dépression capillaire avec le produit de cure

Pour les bétons recouverts de produit de cure, la tendance est la même que celle observée pour les bétons recouverts de film plastique : à partir d'un temps compris entre 1,3 heure et 2 heures, la dépression capillaire commence à se développer lentement (tableau IV-29).

Durant cette phase, la vitesse de développement de la dépression capillaire est comprise entre 1 kPa/heure et 2 kPa/heure suivant la formulation. Puis, à partir d'un temps compris entre 2 et 3 heures, la dépression capillaire augmente rapidement (tableau IV-29).
Durant cette seconde phase, la vitesse de développement de la dépression capillaire est comprise entre 5 kPa/heure et 7 kPa/heure suivant le béton.

La dépression capillaire au niveau des bétons recouverts de produit se développe bien avant le début de prise des bétons, c'est-à-dire un peu avant 2h. En effet, le temps de séchage du produit de cure est estimé à moins d'une heure environ. Dans l'heure qui suit la mise en place du béton, l'évaporation enregistrée est en grande partie celle du solvant. Donc une fois que tout le solvant s'est évaporé, la polymérisation de la résine pour former un film imperméable, se produit durant un laps de temps. Ainsi, cette réaction engendre alors une perte d'eau en surface et par conséquent le rapprochement des grains, qui est à l'origine d'une augmentation de la pression d'eau interstitielle, suite à l'apparition des ménisques en surface.

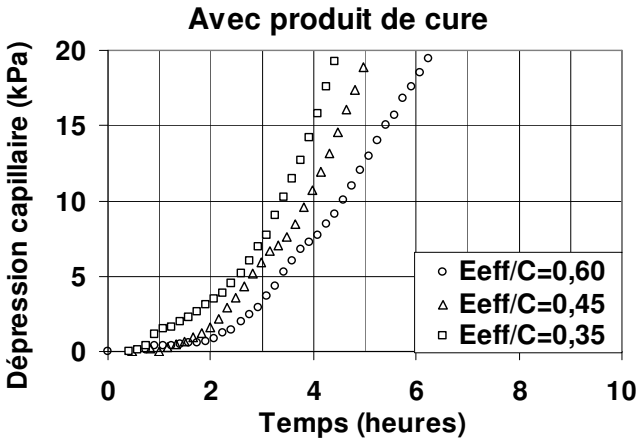


Figure III-103: Evolution de la dépression capillaire des trois bétons

	Sans mode de cure		Avec produit de cure		Avec film plastique	
	1er régime	2ème régime	1er régime	2ème régime	1er régime	2ème régime
$w_{eff}/c = 0,60$	0.94	1.89	1.81	2.64	4.61	6.28
$w_{eff}/c = 0,45$	0.89	2.12	2.06	3.73	4.06	6.06
$w_{eff}/c = 0,35$	-	0.75	1.38	2.97	3.64	6.81

Tableau IV-29: Âge de démarrage des régimes linéaires de dépression capillaires (heures)

IV.3.2. Étude comparative du suivi de la dépression capillaire

L'évolution de la dépression capillaire des bétons dépourvus de cure, a été étudiée dans le chapitre précédent, et comparé aux résultats obtenus pour les bétons protégés par la cure.

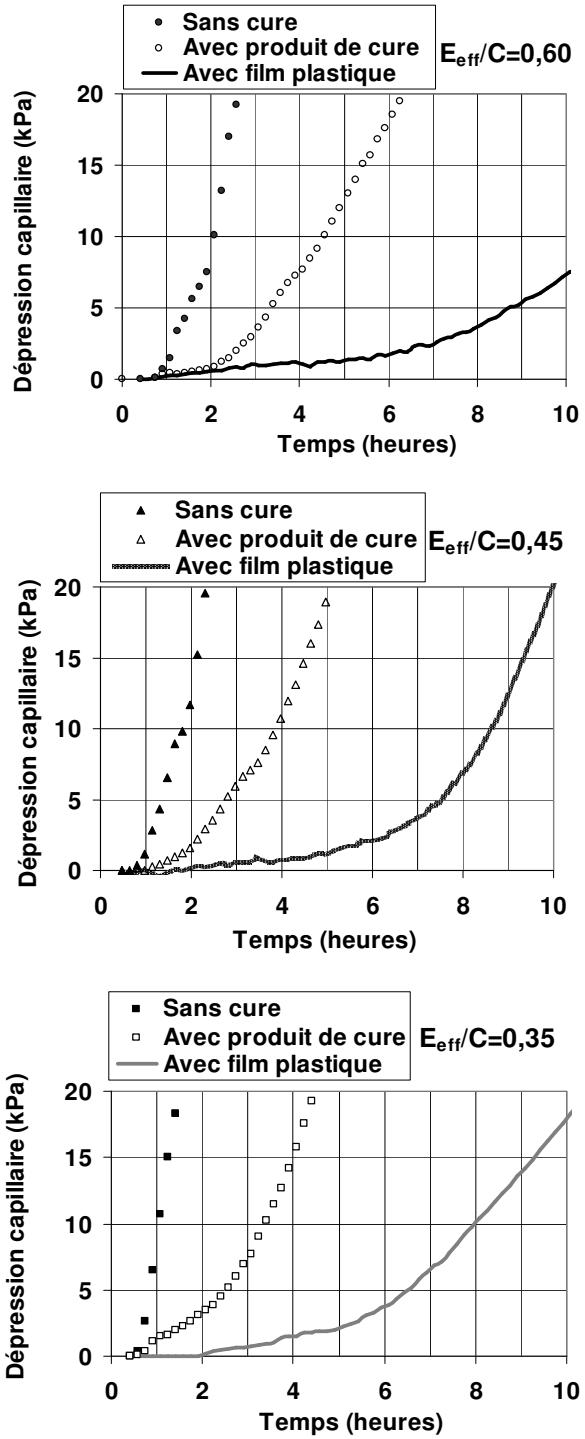


Figure IV-104: Dépression capillaire des trois bétons

La différence de temps d'apparition de la dépression capillaire, observée suivant le mode de cure mis en œuvre, a été constatée pour l'ensemble des trois bétons, cela résulte des différentes pertes de masse enregistrées. Il faut souligner que l'application des matériaux d'étanchéité, manifestement, ne supprime pas la perte d'eau par évaporation, mais de la réduire de façon significative par rapport à la demande d'eau. La cinétique de l'évaporation de l'eau (séchage) et un retrait en découle, montrent les mortiers et pâtes de ciment protégés par la cure sèchent plus lentement et donc moins de perte de masse y est enregistrée. Ainsi, la saturation sera souvent plus grande dans les échantillons de béton protégés par la cure. Leur retrait mesuré est bien plus faible que celui des bétons dépourvu de cure. Ce qui pourrait expliquer que la tension capillaire (σ) devrait être sensiblement réduit pour deux raisons, la réduction de la tension de surface due à la présence du produit de cure ou du film plastique et l'augmentation du rayon r des pores remplis d'eau, en raison de la saturation plus élevée.
Pour un mode de cure identique, l'apparition de dépression capillaire ne dépend pas du squelette granulaire. Sauf pour les bétons dépourvus de cure, où l'on observe une différence de développement de la dépression capillaire (chapitre III). Seule la cure a une influence sur le développement de la pression capillaire. Plus la surface du matériau est étanche plus la dépression capillaire se développe beaucoup plus tardivement (tableau IV-29).

Comme cela a été décrit dans le chapitre précédent, une grande partie des déformations du béton pendant le séchage (externe ou interne) est contrôlé par la pression capillaire en développement dans les pores remplis partiellement d'eau. En présence d'une cure, la réduction de la tension de surface du fluide contenu dans le pore, se traduira par une réduction directe de la tension capillaire et une augmentation de l'humidité relative interne.
Une autre influence de la cure sur les propriétés du béton au très jeune âge est qu'en plus de modifier la cinétique de séchage, elles changent aussi la forme du profil de séchage du béton frais. Toutefois, avec l'incorporation du produit de cure dans le béton frais peut entraîner une différence considérable dans la distribution de l'eau dans les échantillons avec et sans cure, comme illustré dans la figure IV-104.
Dans le cas du produit de cure, ce dernier reste à la surface du matériau pendant la période initiale de séchage, la tension superficielle dans le béton est en outre diminué de sorte qu'il ne peut plus puiser facilement l'eau des pores au sein de l'échantillon.
Dans le cas des déformations endogènes, le film plastique réduit les contraintes internes des capillaires et par conséquent la réduction de l'humidité interne liée à l'hydratation du matériau.

IV.4. Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que la cinétique de séchage des bétons protégés par la cure (avec produit de film ou film plastique) diffère de celle des bétons non protégés par la cure ; bien que le comportement des bétons reste inchangé peu importe le mode de cure mis en œuvre. En effet, le comportement des bétons au très jeune âge présente deux étapes bien distinctes : un premier domaine durant lequel les déformations sont importantes et le béton reste proche de la saturation, suivi d'un second domaine durant lequel les déformations sont faibles et le degré de saturation diminue.

Les résultats montrent bien que le mode de cure le plus efficace contre la fissuration précoce des bétons reste le film plastique. Car l'absence d'évaporation en surface permet non seulement d'atténuer l'amplitude des déformations mais aussi que le matériau reste saturé jusqu'à la prise, puisqu'aucune entrée d'air ne se produit, d'où l'absence de fissure.

L'usage de produit de cure commerciale atténue significativement l'amplitude des déformations des bétons. A titre comparatif, Les vitesses initiales de déformations longitudinales et de développement de la dépression capillaire, obtenues sur les bétons recouverts de produit de cure, bien qu'elles soient plus faibles, avoisinent celles obtenues dans des conditions sans vent sur des bétons non protégés, et pourtant ces derniers ont fissuré. Ce qui n'est pas le cas pour les bétons recouverts de produit de cure. L'absence de fissure des bétons, s'explique notamment par le film imperméable, qui se forme à la surface du matériau, après évaporation du solvant. Ce film protège la surface du béton contre l'entrée d'air dans le système poreux du matériau. Plus l'étanchéité sera meilleure, moins le béton frais sera déformable, indépendamment du séchage.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale

Les bétons ordinaires sont avant tout une source d'information pour les acteurs du BTP. L'évolution des connaissances du matériau, les exigences nouvelles en matière de propriétés ont incité les chercheurs et les utilisateurs à développer de nouveaux matériels et méthodes afin d'approfondir leur connaissance sur le comportement du matériau.
Face aux quelques problèmes rencontrés par les industriels sur le chantier, il devenait primordial d'entreprendre une étude beaucoup plus approfondie de la fissuration précoce des bétons. De ce fait, l'objectif sous-jacent des études de retraits est une meilleure maîtrise de la fissuration.

Ce travail vise à apporter une meilleure compréhension du comportement des bétons au très jeune âge à travers l'étude des déformations plastiques et de la fissuration induite.
Pour ce faire, l'influence du séchage, d'une part et celle de la cure sur le comportement des bétons ordinaires, d'autre part, ont été investiguées.

Une synthèse bibliographique a été réalisée sur le comportement du matériau au très jeune âge. Cela a permis de présenter l'état de l'art des différentes transformations du matériau, parfois couplées, pendant les premières heures qui suivent le gâchage, ainsi que l'influence des conditions environnementales et de la cure appliquée sur le matériau. Les informations issues de cette synthèse ont mis en évidence que le comportement du béton s'avère être délicat puisque de nombreux phénomènes, agissent de façon plus moins couplés, et à différentes échelles d'observations du matériau : séchage, fissuration et retrait. Seule une cure du matériau éviterait la fissuration précoce du matériau tout en amoindrissant l'amplitude des déformations (retrait), grâce à une faible évaporation en surface.
Il en ressort que les matériaux cimentaires présentant de larges surfaces libres sont très sensibles à la fissuration précoce (avant ou pendant la prise).
La fissuration est étudiée sous deux approches distinctes :

- approche découplée où la fissuration du matériau est étudiée à travers le retrait libre à l'échelle de l'éprouvette, et des phénomènes corollaires (évaporation, dépression capillaire).
- approche couplée où la fissuration est abordée à travers des dispositifs d'empêchement du retrait.

L'ensemble des données recueillies de la synthèse bibliographique nous a permis de nous positionner vis-à-vis du problème qui nous a été posé et de mettre en place des moyens expérimentaux afin d'atteindre les objectifs de la thèse.

Un ensemble de dispositifs expérimentaux a été mis en place pour l'étude du comportement du béton au très jeune âge : trois bétons présentant un volume de pâte, un rapport G/S et une maniabilité identique mais trois rapports E_{eff}/C différents (E_{eff} /C=0,60 - E_{eff} /C=0,45 - E_{eff} /C=0.35) ont été mis au point (pour balayer toutes la gamme des bétons existants, c'est-à-dire, du béton classiques vers les bétons de génie civil). Nous avons mis au point un banc de mesure des déformations plastiques et des phénomènes corollaires (dépression capillaire, évaporation, prise Vicat). Un dispositif de retrait empêché a également été développé.

Les essais réalisés sur une durée de 24h, ont eu lieu dans un tunnel ventilé, permettant d'imposer une vitesse de vent de 5 ±0,5 $m.s^{-1}$. Ce tunnel est placé dans une salle climatisée régulée en température (T=20°C ±1°C) et en hygrométrie (HR=50% ±1%).
L'influence du mode de cure mis en œuvre a été étudiée et comparée aux résultats obtenus sur les bétons dépourvus de cure, il s'agit de :

- l'usage d'un produit d'étanchéité (produit de cure commerciale : MasterKure 114 de BASF),
- l'usage d'un matériau d'étanchéité (film plastique étanche).

En parallèle de la campagne d'essais précédente, un banc d'essais a été réalisé, uniquement sur des bétons non protégés (sans cure) en absence de vent. C'est-à-dire que le séchage des éprouvettes se faisait à l'air ambiant. Ce qui nous a permis d'étudier l'effet du séchage sur l'évolution du matériau.

Dans l'étude du comportement des bétons vis à vis du séchage, deux étapes bien distinctes ont été mises en évidence : un premier domaine durant lequel les déformations sont importantes et le béton reste proche de la saturation, suivi d'un second domaine durant lequel les déformations sont faibles et le degré de saturation diminue. Ces résultats sont similaires à ceux observés pour les sols fins soumis à la dessiccation. Les résultats montrent que pour les trois bétons la fissuration intervient au voisinage de la saturation. Pour les bétons de bâtiment, présentant un rapport E_{eff}/C élevé, la présence de vent ne semble pas modifier l'âge d'apparition de la fissure. Par contre, l'ouverture maximale de fissure augmente de manière importante en présence de vent. Pour les bétons de génie civil, présentant un rapport E_{eff}/C faible, en présence de vent la fissuration intervient beaucoup plus tôt. Par contre, l'ouverture maximale de la fissure est identique avec ou sans vent.

En effet, la fissuration intervient pour de faibles valeurs de la dépression capillaire, voisines de la pression d'entrée d'air. L'analogie avec les sols fins déformables permet par ailleurs d'expliciter les couplages entre transferts et déformations au travers de la pression de la phase liquide, cette pression qui paraît ainsi clairement comme le terme moteur du transport et de la déformation du matériau.

Les résultats expérimentaux montrent qu'il n'existe pas de lien entre l'apparition de la fissure et les déformations plastiques du matériau. En l'absence de vent, l'évaporation est indépendante des caractéristiques du béton. Par contre, en présence de vent la capacité de déformation du béton influe sur l'évaporation : un béton frais très déformable aura une évaporation très importante, un béton frais peu déformable aura une évaporation peu importante.
La fissuration des bétons à l'état plastique intervient lorsque la dépression capillaire dans le béton va dépasser la pression d'entrée d'air. Cette étude montre que la prévision de la fissuration des bétons à l'état plastique nécessite la connaissance de l'histoire des déformations du béton afin de pouvoir prédire l'évolution de la pression de l'eau au cours du séchage.

Vis-à-vis de l'influence de la cure appliquée sur les matériaux lors du séchage, les résultats montrent bien que l'usage de matériaux d'étanchéité (ici le film plastique) semble le mode de cure le plus efficace contre la fissuration précoce, à première vue. L'absence de fissure est liée, en autre, à l'apparition beaucoup plus tardive de la dépression capillaire dans le béton, c'est-à-dire pendant la prise. A cet instant le matériau n'est plus plastique.
Ainsi le développement de la dépression capillaire en conditions endogènes pourrait être un indicateur de début de prise du matériau.
L'usage de produit de cure protège partiellement le matériau contre les déformations plastique. Le produit de cure constitue un écran protecteur contre l'entrée d'air dans le matériau. La fissuration ne se produit donc pas, puisque la pression d'entrée survient beaucoup plus tard, c'est-à-dire, lorsque le matériau atteint une certaine rigidité.
Bien que la dépression se développe une heure après le gâchage, l'entrée d'air ne se produit que beaucoup plus tard. La pression capillaire à l'intérieur du matériau ne permet pas d'initier une quelconque fissuration.

Perspectives

Au-delà des résultats prometteurs de cette étude, des perspectives apparaissent aussi bien sur le plan de l'expérimentation que de la modélisation pour mieux appréhender le comportement des béton frais dans des conditions d'exposition plus complexes.

Perspectives expérimentales :

- Etendre l'étude du séchage à l'échelle des bétons constitués de ciments composés, avec un système de tunnel ventilé. Nos résultats sont obtenus à partir des bétons constitués de ciment Portland. Leur généralisation n'est pas immédiate. D'autres études sont bien sûr nécessaires pour confirmer les résultats et/ou apporter des éléments complémentaires de compréhension sur le comportement des bétons au très jeune âge.
- L'approche milieu granulaire poreux fait ressortir dans les essais de retrait, plusieurs paramètres, comme l'évolution des propriétés mécaniques. Un dispositif de mesure des propriétés mécaniques du béton frais est envisageable (angle de frottement inter-granulaire, compressibilité granulaire).
- L'amélioration du dispositif expérimental de retrait empêché dans le but d'accéder à la contrainte du matériau. Dans ce sens, il est nécessaire d'intégrer au dispositif un système de mesure de phénomènes corollaires (perte de masse, pression capillaire et prise), durant l'empêchement du retrait. Toutes ces mesures seront ainsi effectuées sur un même échantillon, ce qui fournira en continu des informations sur l'état de déformation du matériau avant la prise.

- La répartition interne du liquide (l'eau) pendant le séchage dans le béton frais, devrait se poursuivre de façon approfondie. Car la pression de la phase liquide apparaît comme le moteur du transport et de la déformation du matériau, lors du séchage.
- Cette étude devrait se faire avec une campagne d'essais complémentaires sur l'évolution de la distribution poreuse avant prise, où il y a un manque d'information sur la répartition des pores dans le réseau poreux dans les premières heures qui suivent le gâchage. En effet, la texture très friable du matériau avant prise, rend cette démarche assez difficile.

Perspectives de modélisation :

Ce travail doit se poursuivre pour aller vers une prédiction quantitative des contraintes générées dans la structure et de la fissuration induite par la pression capillaire. Cette prédiction passe par une modélisation du retrait plastique en fonction de la pression capillaire, de l'évaporation et des propriétés mécaniques du matériau (angle de frottement inter-granulaire et la compressibilité granulaire. Pour y parvenir, il faudrait prendre en compte:

- Le transport convectif de la phase liquide sous l'effet de gradient de pression. Une description plus précise de transports de l'eau et de l'air passe par l'adoption d'une modélisation de type milieux poreux saturés (Coussy, 1991). Elle permettra d'obtenir un cadre de modélisation global et de connaître précisément la contribution des différentes pressions (eau, gaz) qui interviennent dans l'expression de la déformation du retrait de dessiccation, lors du séchage.
- L'effet des granulats. Une étude est à mener afin de préciser le comportement à l'interface granulat / pâte de ciment et ses effets à l'échelle de la structure.
- Enfin, de nombreux autres phénomènes agissent simultanément. Il paraît judicieux d'en retenir deux : le retrait endogène et les effets thermiques au très jeune âge. En effet, ces derniers peuvent induire une fissuration précoce à l'échelle de la structure.

Une démarche méthodique simplifiée permettrait alors d'arriver à un modèle de prédiction du comportement au très jeune âge des bétons dans des conditions plus réalistes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABD EL-RAZEK M.M. & ABO-EL-ENEIN S.A. (1999)
Moisture performance through fresh concrete at different environmental conditions. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.1819-1825.

ABQ (Association Béton Québec - **2005**)
La cure. Bulletin technique Techno-Béton, n°8, pp.1-5 2005.

ACKER P., BARCELO L., BOVIN S., & Al. (2001)
Early age shrinkage of concrete: back to physical mechanism. Concrete science and Engineering (Revue RILEM), Vol. 3, pp.85-91.

ACKER P. & TORRENTI J.M. (2004)
Comportement du béton au jeune âge. Editions Lavoisier. Paris.

ACI (1997)
Standard Practice for Curing Concrete. 11p. (ACI 308-92).

ACI (1998)
Standard Practice for Curing Concrete. 9p. (ACI 308-98).

ACI (2001)
Guide to Curing Concrete. 31p. (ACI 308R).

AL-FADHALA M. & HOVER K.C. (2001)
Rapid evaporation from freshly cast concrete and gulf environmental. Construction and Building Materials, Vol. 15, pp. 1-7.

AL-GAHTANI A.S. (2010)
Effect of curing methods on properties of plain and blended cement concrete. Construction and Building Materials. Vol.24, pp. 308-314.

AL-KHAIAT H. & HAQUE M.N. (1998)
Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete. Cement and Concrete Research, Vol.28, pp. 859-866.

ALSAYED S. H. & AMJAD M.A. (1994)
Effect of curing conditions on strength, porosity, adsorptivity and shrinkage of concrete in hot and dry climate. Cement and Concrete Research, Vol.7, pp. 1390-1398.

ALMUSALLAM A. A (2001)
Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 23, pp.353-361.

AMZIANE S. & ANDRIAMANANTSILAVO N.R.(2004)
Prediction of cement paste pore water pressure variations during setting period. 15th Advances in Cement Research, Vol.16, pp.23-28.

ANDRIAMANANTSILAVO N.R., AMZIANE S. & BAUDEAU P., (2003)
Experimental study on the pressure of cement-based materials against formwork. 15th ASCE Engineering Mechanics Conference (2002). Rhéologie, Vol.3, pp.12-21.

AREGBA W., JOMAA W. & PUIGGALI J.R. (1990)
Une approche du séchage de matériaux fortement déformables. Revue de Physique Appliquée, Vol. 25, pp.1161-1175.

BAGHABRA Al-AMOUDI O.S., MASLEHUDDIN M., ABIOLA T.O. (2004)
Effect of type and dosage of silica fume on plastic shrinkage in concrete exposed to hot weather. Construction and Building Materials, Vol.18, pp.737-743.

BALAYSSAC J-P., DETRICHE Ch.-H. & DIAFAT N. (1997)
Influence de la durée de cure humide sur les caractéristiques mécaniques de bétons d'usage courant. Materials and Structures, Vol.30, pp.284-292.

BAROGHEL-BOUNY V.(1994)
Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Ed. Presses des Ponts et Chaussées.

BAROGHEL-BOUNY V., MANGUY M., LASSABATERE T. & COUSSY O (1999)
Characterization 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 J. (1992)
Durabilité des bétons. Ed. Presses de l'ENPC.

BARROUILLET M. (1989)
Influence des caractéristiques des granulats sur les actions intergranulaires dans l'écoulement du béton frais. Materials and Structures, Vol.22, pp. 339-343.

BAYASI Z. & MCLNTYRE M. (2002)
Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete. ACI Materials Journal, Vol.99, pp.337-344.

BENBOUDJEMA F. (2002)
Modélisation des déformations différées des bétons sous sollicitations biaxiales – Application aux enceintes de confinement de bâtiment réacteurs des centrales nucléaires. Thèse de doctorat de l'Université de Marne La Vallée.

BENBOUDJEMA F., MEFTAH F. & TORRENTI J.M. (2002)
Interaction between drying shrinkage, creep and phenomena in concrete. Engineering Structures, Vol.27, pp.239-250.

BENTZ D.P. (2008)
A review of early-age properties of cement-based materials.
Cement and Concrete Research, Vol.38, pp.196-204.

BERNIER G. (2006)
Pression interstitielle dans le béton frais. AUGC'06-La Grande Motte.

BJØNTEGAARD Ø., HAMMER T.A. & SELLEVOLD E. (2004)
On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete.
Cement and Concrete Composites, Vol.26, pp.427-435.

BOMBLED J.P. (1984)
La cure du béton. Publication CERILH n°280 de la revue : Ciment, Bétons, Plâtres, Chaux, n°746, pp.45-48.

BONAVETTI V., DONZA H., RAHHAL V. & IRASSAR E. (2000)
Influence of curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp.703-708.

BONGIOVANNI J.-M. (1998)
Traitement des boues résiduaires par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique. Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

BOUWMEESTER W.J. & SCHLANGEN E. (2008)
Influence of curing on the pore structure of concrete. Ed. Tailor Made Concrete Structure – Walraven & Stoelhorst, pp.65-70.

BUFFO-LACARRIERE L. (2007)
Prévision et évaluation de la fissuration précoce des ouvrages en béton.
Thèse de doctorat, Université de Toulouse.

BUSHLAIBI A. H. & ALSHAMSI A.M. (2002)
Efficiency of curing on partially exposed high-strength concrete in hot climate
Cement Concrete Research, Vol. 32, pp. 949-953.

BURLION N., BOURGEOIS F., SHAO J.-F. (2005)
Effects of desiccation on mechanical behaviour of concrete.
Cement and Concrete Composites, Vol.27, pp367-379.

CABRERA J.G., CUSENS A.R. & BROOKES-WANG Y. (1992)
Effect of superplasticizers on the plastic shrinkage of concrete.
Magazine of Concrete Research. Vol. 44, pp.149-155.

CÁCERES SALAZAR G.E. (2006)
Modélisation du séchage d'un milieu poreux saturé déformable : prise en compte de la pression du fluide. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale d'Art et Métier.

CÁCERES SALAZAR G.E., BRUNEAU D. & JOMAA W. (2007)
Two-phase shrinking porous media drying: a modelling approach including liquid pressure gradients effects. Drying Technology, Vol. 25, pp.1927-1934.

CARRIER R.E. & CADY P.D. (1970)
Evaluating effectiveness of concrete curing compounds.
Journal of Materials, Vol. 5, pp.294-302.

CCCTG (Cahier des Charges et des Clauses Techniques Générales) - fascicule 65 (2008)
Relatif à l'exécution des ouvrages en béton armé ou précontraint.
Réal. SETRA-SNBATI.

CEAGLSKE N. & HOUGEN O.A. (1937)
Drying granular solids.
Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 29, pp.805-813.

CHANVILLARD G. (1999)
Matériau béton – Connaissances générales. Ed. Presses de l'ENTPE.

CHEMKHI S. (2008)
Séchage d'un milieu deformable non saturé: Modélisation du couplage hygrométrique.
Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I.

COHEN M.D., OLEK J. & DOLCH W.L. (1990)
Mechanism of plastic shrinkage cracking in Portland cement and Portland cement-silica fume paste and mortar. Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp.103-119.

COUSSY O. (1995)
Mécanique des milieux poreux. Edition Technip.

COUSSY O, BAROGHEL-BOUNY V, DANGLA P & MANGUY M (2001)
Evaluation de la perméabilité à l'eau liquide des bétons à partir de leur perte de masse durant le séchage. Revue Française de Génie Civil, Numéro spécial Transfert 2000, Vol. 5, pp.269-284.

DAIAN J.F. (1989)
Condensation of water vapour. Transport in Porous Media, Vol. 4, pp.1-16.

DEBASTE F. (2008)
Modélisation de l'évaporation en milieux poreux : développement de modèles fondamentaux et appliqués. Thèse de Doctorat de l'Université Libre de Bruxelles.

DEBRUYNE G. (2005)
Modélisation de la thermo-hydratation, du séchage, du retrait et du béton. Modélisations pour le Génie Civil et les géomatériaux, Fascicule R7.01, pp.1-18.

DEVILLERS P., CUSSIGH F. & Al. (2007)
Validation d'une méthode de détermination des durées de cure nécessaires à partir des théories de Powers. Annales du bâtiment et des travaux publics, Vol.5, pp.18-22

DEVILLERS P. & EL YOUSSOUFI M.S. (2009)
Comportement hydromécanique des sols non saturés : identification du coefficient de Biot. Hermés-lavoisier journal, Volume X-n°x/2009, pp.1-12.

DE SA C (2007)
Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton. Influence des gradients et des incompatibilités de déformation. Thèse de Doctorat, LMT ENS Cachan/ CNRS/ UMPC/ UniverSud Paris.

DE SA C., BENBOUDJEMA F., THIERY M. & SICARD J. (2008)
Analysis of microcracking induced by differential drying shrinkage.
Cement Concrete Composites, Vol. 30, pp. 947-956.

DILGER W.H. & WANG C.M. (1999)
Effects of curing member size on shrinkage of high performance concrete.
Revue française de génie civil, Vol. 3, pp.159-171.

EL-DIEB A.S. (2007)
Self-curing concrete: Water retention, hydration, and moisture transport.
Construction and Building Materials revue, Vol.21, pp.1282-1287.

FATTUHI N.I. (1986)
Curing compounds for fresh or hardened concrete.
Building and Environment, Vol.21, pp.119-125.

GOYENECHE M. (2001)
Etude du transport d'humidité par écoulement de film lors du séchage d'un milieu capillaro-poreux. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I.

GUENOT-DELAHAIE I. (1996)
Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton.
Thèse de Doctorat, Ecole National des Ponts et Chaussées.

GRANGER L. (1996)
Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires. Analyse et modélisation. Thèse de Doctorat de l'Ecole National des Ponts et Chaussées.

GRASLEY Z.C. (2003)
Internal relative humidity, drying stress gradients and hygrothermal dilation of concrete. Portland Cement Association, serial n° 2625.

HAMMER T.A. (1998)
Cracking in high performance concrete setting.

In proceedings of international symposium on high performance and reactive powder concrete. 14-16.08.98, Sherbrook, Canada. Ed. P.C. Aïtcin 1998

HAMMER T.A. (2002)
The relationship between settlement and plastic shrinkage of high strength concrete. Presented at 2002 ACI Fall Convention, Cement and Concrete, pp.89-102.

HAOUAS A. (2007)
Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires – caractérisation et modélisation chimio-hydro-mécanique du retrait. Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieur de CACHAN.

HO D.W.S. & LEWIS R.K. (1987)
The water sorptivity of concretes: the influence of constituents under continuous curing. Durability of building materials journal, Vol. 4, pp.241-252.

HOLT E. & LEIVO M. (2004)
Cracking risks associated with early age shrinkage.
Cement and Concrete Composites, Vol. 26, pp.521-530.

HUO X.S. & WONG L.U. (2006)
Experimental study of early-age behaviour of high performance concrete deck slabs under different curing methods.
Construction and Building Materials, Vol. 20, pp.1049-1056.

JOMAA W. (1991)
Séchage de matériaux fortement déformables (prise en compte de la vitesse de retrait. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux.

JOSSERAND L. (2002)
Ressuage des bétons hydrauliques. *Thèse de doctorat*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

KAMP C.L. (1986)
Mechanism of moisture transfer through porous materials.
Transaction of the 9th International Conference, Vol.5, pp. 29-34.

KAPLAN D. (2001)
Pompage des bétons.
Etudes et recherches des Laboratoires Ponts et Chaussées, n°AO36.

KHOKHAR M.I.A. (2010)
Optimisation of concrete mix design with high content of mineral additions: effect on microstructure, hydration and shrinkage.
Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes

KONRAD J.M. & AYAD R. (1997)
An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation.
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 34, pp.477-488.

KOSMATKA S. H. (1994)
Bleeding. Significance of tests and properties of concrete and concrete. Making materials, ASTMSTP 169C, P. Klieger and Lamond, eds. ASTM, West Conshohocken, Pa, pp.88-111.

KOWALSKI S. J. (2001)
Thermomechanical approach to shrinkage and cracking phenomena in drying. Drying Technology, Vol. 19, pp.737-765.

KRISCHER O. & KROLL K. (1962)
Technique de séchage.
2ème edition de Die Wissenschaftlichen Grundlagen der trocknungstechnik, Springer Verlag, traduite par le C.E.T.I.AT., Osay.

KRONLÖF A., LEIVO M. & SIPARI P. (1995)
Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar. Cement and Concrete Research. Vol.25, pp.1747- 1754.

LAURINDO J.B. & PRAT M. (1998)
Numerical and experimental network study of evaporation in capillary porous media: Drying rates. Chemical Engineering Sciences, Vol. 53, pp. 2257-2269

LEONARD. A. (2002)
Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration: Suivi de la texture par microtomographie à rayon X. Thèse de Doctorat de l'Université de Liège, Belgique.

LERCH. W. (1957)
Plastic shrinkage. ACI Journal proceeding, Vol. 53, pp. 797-802.

LOUKILI A., CHOPIN D. & KHELIDJ A. & Al. (2000)
A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp.915-922.

LUIKOV A.V. (1966)
Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Pergamon Press, Oxford.

MBEMBA E. (2007)
Effets de la sécheresse sur les chaussées – Déterminations des paramètres influençant le phénomène. Mémoire de MASTER II- Géomatériaux-Géoenvironnement, Université de Marne La Vallée.

McCARTER W.J. & BEN-SALEH A. M. (2001)
Influence of practical curing methods on evaporation of water from freshly placed concrete in hot climate. Building and Environment, Vol. 36, pp. 919-924.

MESSAN A. (2006)
Contribution à l'étude du comportement au très jeune âge des structures minces en mortier. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.

MICHAUD P-M. (2008)
Vers une approche chimio-poro-visco-elastique du comportement des bétons au jeune âge. Thèse de doctorat INSA Lyon.

MITANI H. (2003)
Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux. Thèse de doctorat, Ecole National des Ponts et Chaussées.

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.

MOYNE C. (1987)
Transferts couplés chaleur-masse lors du séchage : prise en compte du mouvement de la phase gazeuse. Thèse d'Etat de l'INPL-Nancy.

NADEAU J.P. & PUIGGALI J.R., (1995)
Séchage, des processus physiques aux procédés industriels. Lavoisier, Paris.

NASSIF H., SUKSAWANG N. & MAQBOOL M. (2007)
Effect of curing methods on early-age and drying shrinkage of high-performance concrete. Journal of theTransportation Research Board, Vol. 1834, pp. 48-58.

NEVILLE A.M. (2000)
Propriétés des bétons, traduction de la version anglaise par le CRIB. Ed. Eyrolles.

NF P 18 504 (1990) nouvellement **NF EN 13670**
Annexe A –La durée minimale de la cure. Béton et constituants du béton.
5ème édition, Tome 3, Ed. AFNOR.

PERRON H., HUECKEL T., LALOUI L., HUECKEL T. & HU L. (2006)
Experimental study of desiccation of soil. Canadian Geotechnical Journal,
Vol. 147, pp.1073-1084.

PERRON H., HUECKEL T., LALOUI L., HUECKEL T. & HU L. (2009)
Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils:
experimental characterisation and mechanism identification.
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46, pp.1177-1201.

PERRON H., DELENNE J.Y., L. LALOUI, & EL YOUSSOUFI M.S. (2009)
Discrete element modelling of drying shrinkage and cracking of soils.
Computer and Geotechnics, Vol. 36, pp.61-69, 2009.

PERZ J.S. (1981)
Method for curing concrete.
United States Patent, 4, 297,399.pp.1-8.

PICHLER C., LACKNER R. & MANG A. (2006)
A multiscale micromechanics model for the autogenous-shrinkage deformation of early-age cement based materials. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 74, pp.34-58.

POURCEL F., JOMAA W., PUIGGALI J.R. & ROULEAU L. (2007)
Criterion for crack initiation during drying: Alumina porous ceramic strength improvement. Powder Technology, Vol. 172, pp.120-127

POWERS T.C., COPELAND L.E., HAYES J.C. & MANN H.M. (1954)
The permeability of cement paste. Journal of the American Concrete Institute.
Vol. 26, pp.285-298.

POWERS T.C., COPELAND L.E. & MANN H.M. (1959)
Capillary continuity or discontinuity in cement pastes.
Journal of Research and Development Laboratories, Vol.1, pp.38-48.

POWERS T.C. (1968)
The properties of fresh concrete. J. Wiley & Sons, Inc.

QUINTARD M & WHITAKER S. (1997)
Transport in chemically and mechanically heterogeneous porous media IV: Large – scale mass equilibrium for solute transport with adsorption.
Advances in water Resources, Vol.22, pp 33-57

RADOCEA A. (1990)
Water pressure in fresh and young cement paste.
Nordic Concrete Research, Vol. 9, pp.145-159.

RADOCEA A. (1994)
A model of plastic shrinkage. Magazine of Concrete Research, Vol. 46, pp.125-132.

RADOCEA A. (1998)
Autogenous volume change of concrete at very early age.
Magazine of Concrete Research, Vol. 50, pp.107-113.

REMACHE L.& BELHAMRI A. (2008)
Modélisation du séchage par convection.
Revue des Energies Renouvelables CISM'08, Vol. 26, pp.289-297

RENON N. (2002)
Simulation numérique par éléments finis des grandes déformations des sols.
Application à la scarification. Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris.

ROBEYST N. (2009)
Monitoring setting and microstructure development in fresh concrete with ultrasonic through –transmission method. PhD Thesis University of Gent.

ROLF E. & HALDE. (1979)
Sewage sludge characterization by vacuum drying. Filtr. Separat.,pp. 238-242.

SALAGER S. (2006)
Influence de la température sur le comportement hydrique de milieux poreux partiellement saturés. XXIV^{ièmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil-Prix jeunes Chercheurs.

SCHERER G.W. (1990)
Theory of drying. Journal of the American Ceramic Society, Vol.73, pp.3-14

SHERWOOD T K. (1929)
The drying of solids I.
Industrial and engineering chemistry, Vol.21, pp.976-980

SHAHIDZADEH-BONN N., AZOUNI A. & COUSSOT P. (2007)
Effect of wetting properties on the kinetics of drying of porous media.
Journal of Physics: Condensed Matter, Vol.19, pp.101-112

SLOWICK V., SCHMIDT M. & FRITZSCH R. (2008)
Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. Cement and Concrete composites, Vol. 30, pp.557-565.

SLOWICK V., SCHIMDT M., HÜBNER T. & VILLMANN B. (2009)
Simulation of capillary shrinkage cracking in cement-like materials. Cement and Concrete composites, Vol. 31, pp.461-469.

SMOLLEN M. (1990)
Evaluation of municipal sludge drying and dewatering with respect to sludge volume reduction. Wat. Sc. Tech., Vol. 22, pp. 153-161.

SOROUSHIAN P. & RAVANBAKHSH S. (1998)
Control of plastic shrinkage cracking with speciality cellulose fibers.
ACI Materials Journal, Vol. 95, pp.429-435.

SPRINGNSCHMID R., BREITENBUCHER R. & MANGOLD M. (1994)
Thermal cracking in concrete at early ages.
Rilem proceedings 25, thermal cracking in concrete at early ages, R. Springenschmid, E & FN Spon, pp.137-144.

TOLEDO R.D.F., GHAVAMI K., SANJUAN M.A. & ENGLAND G.L. (2005)
Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetables. Cement and Concrete Composites, Vol. 27, pp. 537-546.

TOPÇU I. & ELGÜN V.B. (2004)
Influence of concrete properties on bleeding and evaporation.
Cement Concrete Research, Vol.34, pp. 275-281.

TSANG K. R. & VESILIND P. A. (1990)
Influence of concrete properties on bleeding and evaporation.
Cement Concrete Research, Vol.34, pp. 275-281.

TURCRY P. (2003)
Retrait et fissuration des bétons autoplaçants, influence de la formulation.
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.

TURCRY P. & LOUKILI A., (2006)
Evaluation of plastic shrinkage cracking of self- consolidating concrete.
ACI Materials Journal, Vol. 103, pp.272-279.

UNO J.P. (1998)
Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas.
ACI Materials Journal, Vol. 95, pp.365-375.

VESILIND P. A. & MARTEL C. J. (1989)
Freezing of water and wastewater sludge.
J. Environ. Eng. -ASCE, Vol. 116, pp. 854-861.

WANG J., DHIR R.K. & LEVITT M. (1994)
Membrane curing of concrete: moisture loss.
Cement and Concrete Research, Vol. 24, pp. 1463-1474.

WHITAKER S. (1977)
Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying.
Advances in heat transfer, Vol. 13, pp. 119-203.

WITTMANN F.H. (1976)
On the action of capillary pressure in fresh concrete.
Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp. 49-56.

WITTMANN F.H., ROELFSTRA P.E. & C.L. KAMP (1988)
Drying of concrete: An application of the 3L-approach.
Nuclear Engineering and Design, Vol. 105, pp. 185-198.

YANFUL E.K. & CHOO L.P. (1997)
Measurement of evaporative fluxes from candidate cover soils.
Canadian Geotechnical Journal Vol.34, pp. 447-459.

YURTDAS I., PENG H., BURLION N. & SKOCZYLAS F. (2005)
Compétition entre dépression capillaire et endommagement dans les matériaux cimentaires en cours de dessiccation. XXIIIème Rencontres Universitaires de génie Civil. Risque et Environnement.

ANNEXES

ANNEXE A : Caractéristiques des constituants

Edition du : 01/12/2008

Ciments Calcia
Italcementi Group

CONTROLE STATISTIQUE DES CIMENTS

établissement : **F102 BEAUCAIRE**
Produit : CEM I 52,5 N CE CP2 NF - 100044

LABO	TESTS	STATISTIQUES ANNUELLES du 01/01/2008 au 30/11/2008			MOYENNES MENSUELLES DES TROIS DERNIERS MOIS		
		N	MOYENNE	ECART -TYPE	09/2008	10/2008	11/2008
RESULTATS USINE	Surface Blaine	91	3657	183	3842	3783	3755
	Refus au 40 µm						
	Début de Prise	91	2H42	0H22	2H19	2H43	2H26
	R1	90	20.3	1.8	22.8	21.4	21.8
	R2	92	32.5	2.1	35.5	34.0	33.5
	R7	11	49.4	3.1	51.6	55.0	52.5
	R28	82	64.9	1.7	65.8	65.3	
RESULTATS C.T.G	Retrait à 28 J.	1	450	(*)			
	SO3	4	3.49	(*)			
	MgO	3	1.14	(*)			
	Cl-	21	0.0170	.0030			
	S--	11	0.0082	.0147			
	Chaleur d'Hydr. à 12H	2	218	(*)			
	L (Colorimétrie)	10	59.91	0.75			
	NA2O équivalent	3	0.39	(*)			

réf: MAQFPCOM.FRM

LAZARD AIGUES VIVES

Le Bas Mas Rouge
30670 AIGUES VIVES

Fiche Technique Produit

du 01/01/2005 au 31/01/2006
Page 1/1, imprimé le vendredi 10 février 2006

Producteur : **LAZARD AIGUES VIVES**
Granulats : **Gravillon 5.6/11.2 Naturel Lazard**
Pétrographie : Silico calcaire
Elaboration : Naturel

Partie contractuelle

Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

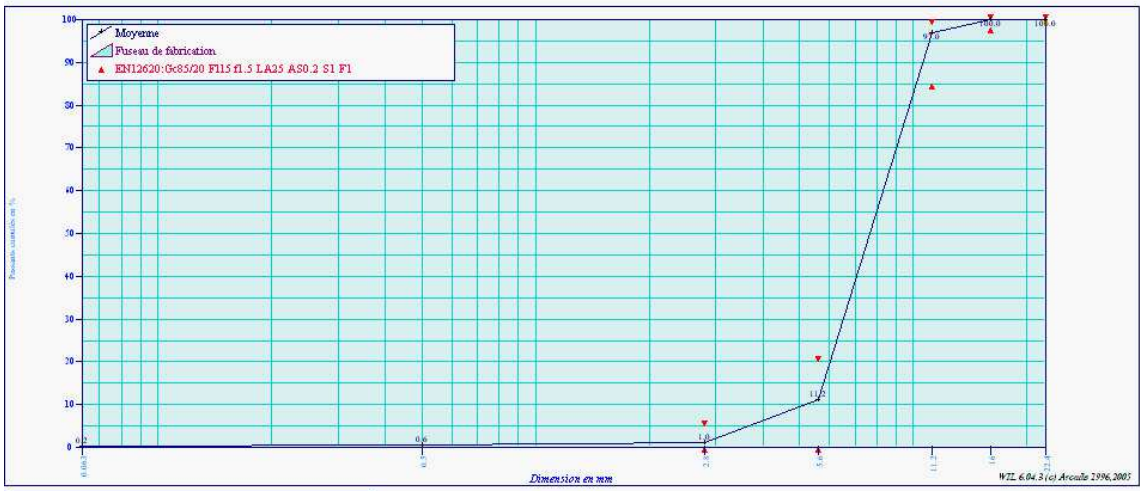
Classe granulaire		Norme	Catégorie
5.6	*11.2*	*EN 12620 Granulats pour bétons*	*Gc85/20 FI15 f1.5 LA25 AS0.2 S1 F1*

			d/2	d	D	1.4D	2D				
	0.063	**0.5**	**2.8**	**5.6**	**11.2**	**16**	**22.4**	**FI**	**MVR**	**WA24**	**W**
Etendue e											
V.S.S.+U											
V.S.S.			5.00	20.00	99.00	100.00	100.00				
V.S.I.			0.00	0.00	85.00	98.00	100.00				
V.S.I.-U											

Partie informative

Résultats de production

	du 01/01/05 au 31/01/06										
	0.063	**0.5**	**2.8**	**5.6**	**11.2**	**16**	**22.4**	**FI**	**MVR**	**WA24**	**W**
Maximum	0.52	2.61	4.30	19.10	98.95	100.00	100.00	12.20			4.3
Xf+0.00xEcart-types	0.21	0.57	1.03	11.16	96.96	100.00	100.00	9.14			2.1
Moyenne Xf	0.21	0.57	1.03	11.16	96.96	100.00	100.00	9.14	2.56	1.3	2.1
Xf-0.00xEcart-types	0.21	0.57	1.03	11.16	96.96	100.00	100.00	9.14			2.1
Minimum	0.00	0.10	0.27	4.46	93.63	100.00	100.00	5.80			0.1
Ecart-type	0.13	0.47	0.76	4.13	1.63	0.00	0.00	2.09			0.93
Nombre de résultats	29	29	29	29	29	29	29	8	1	1	28



Le laborantin : Gilles SAS

LAZARD AIGUES VIVES

Le Bas Mas Rouge
30670 AIGUES VIVES

Fiche Technique Produit

du 01/01/2005 au 31/01/2006
Page 1/1, imprimé le vendredi 10 février 2006

Producteur : **LAZARD AIGUES VIVES**
Granulats : **0/4 Mixte**
Pétrographie : Silico calcaire
Elaboration : Recomposé

Partie contractuelle

Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

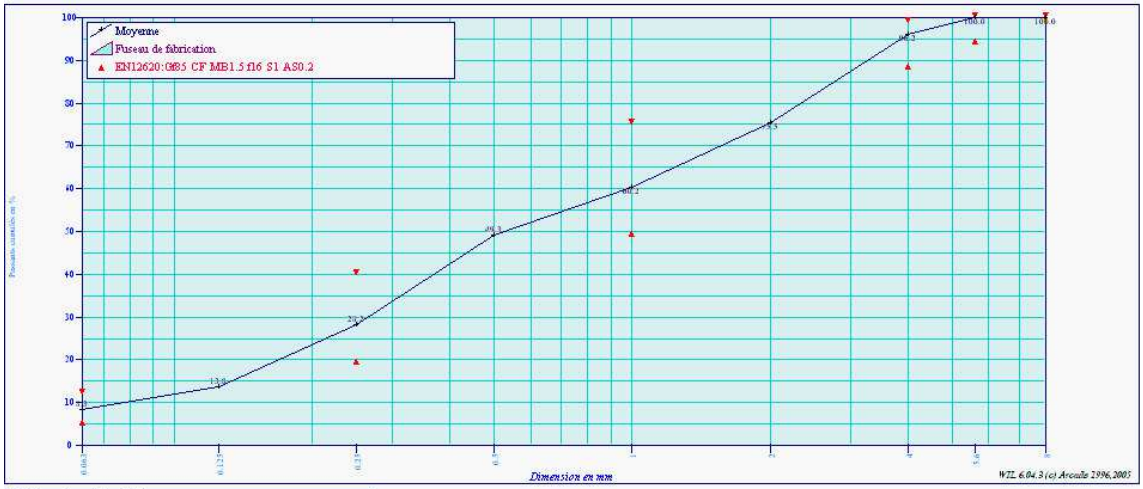
Classe granulaire		Norme	Catégorie
0	*4*	*EN 12620 Granulats pour bétons*	*Gf85 CF MB1.5 f16 S1 AS0.2*

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6 (1.4D)	8 (2D)	FM	MB	MVR	WA24	Na2OEq	W
Etendue e	6		40		40		10								
V.S.S.+U										2.95					
V.S.S.	12.00		40.00		75.00		99.00	100.00	100.00	2.80					
V.S.I.	6.00		20.00		50.00		89.00	95.00	100.00	1.50					
V.S.I.-U										1.35					

Partie informative

Résultats de production

	du 01/01/05 au 31/01/06														
	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	FM	MB	MVR	WA24	Na2OEq	W
Maximum	10.70	16.81	31.30	56.22	69.31	82.62	97.69	100.00	100.00	2.96	0.85				8.1
Xf+0.00xEcart-types	8.26	13.75	28.21	49.28	60.21	75.52	96.18	99.97	100.00	2.77	0.61				5.9
Moyenne Xf	8.26	13.75	28.21	49.28	60.21	75.52	96.18	99.97	100.00	2.77	0.61	2.62	0.8	0.0019	5.9
Xf-0.00xEcart-types	8.26	13.75	28.21	49.28	60.21	75.52	96.18	99.97	100.00	2.77	0.61				5.9
Minimum	6.47	10.47	25.66	43.11	54.35	69.69	94.58	99.76	100.00	2.52	0.45				3.5
Ecart-type	0.86	1.32	1.81	3.21	3.29	3.21	0.77	0.07	0.00	0.11	0.13				1.50
Nombre de résultats	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	18	1	1	1	27



Le laborantin : Gilles SAS

Construction

Notice technique
Edition octobre 2006
Numéro 2.11
Version n°136.2006
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

Présentation	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.
Domaines d'application	■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés. ■ Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
Caractères généraux	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes : ■ longue rhéologie (>2h), ■ robustesse à la ségrégation, ■ qualité de parement.

RHÉOLOGIE	RÉSISTANCES INITIALES	RÉDUCTION D'EAU
5	3	4

Caracteristiques	
Aspect	Liquide brun clair
Conditionnement	■ Fûts de 230 kg ■ CP de 1000 L ■ Vrac
Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	1 an en emballage intact
Donnees techniques	
densité	1,06 ± 0,01
pH	6 ± 1
Teneur en Na_2O Eq.	≤ 1 %
Extrait sec	30,2 ± 1,3 %

BASF
The Chemical Company

Masterkure® 114

Produit de cure et d'étanchéité pour béton, pour des sols industriels et travaux de réparation. Norme NF P 18.370 – NF 085. Décision d'Admission du 27.03.01 sous n° 022.003. Décision de reconduction 04.05.05 n° 022.009.

Description
Le MASTERKURE 114 est un produit de cure et d'étanchéité pulvérisable pour le béton; qui s'applique également à la brosse ou au rouleau. C'est un produit de cure de haute qualité produisant une pellicule efficace pour la rétention d'eau, afin de garantir une complète hydratation du béton; ce qui augmente sa résistance à l'usure et diminue les poussières. Il remplit les pores du béton et réduit l'absorption. Il rend aussi la surface du béton étanche et facilite le balayage et le nettoyage des sols. La pellicule étanche et solide qui se forme en appliquant le MASTERKURE 114, est difficile à enlever. Il est fortement conseillé d'effectuer, avant l'application, un test de compatibilité entre le produit MASTERKURE 114 et l'adhésif concerné pour le collage des carreaux en asphalte, vinyle et amiante vinylique.

Données techniques

État d'agrégation	: fluide
Couleur	: jaune
Densité à 20 °C	: 0,830 à 0,860 kg/litre
Teneur en extrait sec	: 11 à 13 %
Taux de cendre	: 0,1 à 1%
Viscosité (20 °C)	: 25 à 50 secondes
Solubilité	: dans les solvants
Résistance à la T°	: > -4°C à +50°C
Température d'application	: > +5°C
Toxicité	: lisez attentivement les prescriptions, le produit contient des solvants; des vêtements de protection et une protection pour les voies respiratoires sont nécessaires.

Conditionnement et stockage
Le MASTERKURE 114 est conditionné en fûts de 200 litres. Stocker dans des récipients fermés, à l'abri du gel, à une température modérée. Conservation: 24 mois dans les conditionnements d'origine hermétiquement fermés. Le matériau devra être bien mélangé avant utilisation (faites rouler les fûts).

Domaines d'applications
Le MASTERKURE 114 est un produit de cure pour le béton frais, les couches de finition et autres revêtements de sols à base de ciment couleur naturelle et des revêtements de sols colorés. Il peut s'appliquer indifféremment sur des surfaces horizontales ou verticales, lisses ou rugueuses, à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments. Note: si le produit est utilisé à l'intérieur d'un bâtiment, il faut prévoir une ventilation appropriée.
Le produit est recommandé pour le traitement des surfaces avec des produits durcisseurs du type MASTERTOP, comme le MASTERTOP 100 et MASTERTOP 200 naturel et coloré.
Le MASTERKURE 114 est également recommandé comme produit d'étanchéité pour des sols existants de couleur naturelle ou pour réduire la poussière et faciliter le nettoyage.

Quand utiliser
Appliquer le MASTERKURE 114 immédiatement après le durcissement de la surface mais de façon à ce que celle-ci ne soit pas marquée par l'application (ceci est très important par températures élevées). Dans le cas de surfaces banchées, appliquer sur les surfaces verticales aussitôt que les coffrages sont enlevés.

BASF
The Chemical Company

Dans le cas où une partie de la surface est sèche, il est important de l'humidifier immédiatement avant l'application du MASTERKURE 114. La surface doit être saturée mais exempte d'eau stagnante. Ne pas appliquer le MASTERKURE 114 tant que de l'eau libre reste en surface.

Ne pas utiliser
Le MASTERKURE 114 ne peut pas être appliqué pour le traitement des bétons architectoniques ou pour le traitement de sols antistatiques.
Pour l'application du MASTERKURE 114 sur des bétons exposés à une haute température ambiante et des saturations d'eau, nous consulter.
Il est également déconseillé de l'utiliser lorsqu'on sait que le produit de cure doit être enlevé à la fin du temps de cure.
Il est déconseillé de mettre le MASTERKURE 114 sur des surfaces de béton devant recevoir par la suite un mortier, un coulis ou d'autres produits de sol.

Mode d'emploi
Le MASTERKURE 114 s'applique en couches minces au pulvérisateur, à la brosse ou au rouleau sur la surface du béton dès que celui-ci a suffisamment durci et qu'il ne comporte plus d'eau à la surface.
Il s'emploie pur. Pour l'appliquer utiliser un pulvérisateur type chantier ou un rouleau large en peau de mouton à poils courts. L'application doit être mince et uniforme; si elle est inégale, elle donne une apparence tachetée lorsque le béton vieillit.

Au départ, le produit a une brillance temporaire qui permet de contrôler une application uniforme du produit à la surface et d'éviter le gaspillage par une double application. Le temps de séchage est approximativement d'une heure et demie. Lorsque le produit est sec, il devient mat et ne laisse aucune trace. Le MASTERKURE 114 ayant une couleur très légèrement ambrée, il assombrit un peu la couleur naturelle du béton.
Pour le nettoyage du pulvérisateur, du rouleau et des brosses, utiliser des produits diluants à point éclair élevé type naphte, xylène ou à pouvoir de solvabilité élevé du type KB 80. Ces dissolvants sont très inflammables ou combustibles; il faut donc les manipuler avec précaution et dans un local très aéré.

Plage de dosage
Le pouvoir couvrant du MASTERKURE 114 dépend de la porosité et de la rugosité du support.
Plage de dosage : 100 à 250 g/m².

Précautions
Le MASTERKURE 114 est combustible, il doit donc être conservé à l'abri de la chaleur et des flammes.
A n'utiliser qu'avec une ventilation appropriée. Maintenez le conditionnement hermétiquement fermé en cas de non utilisation. Évitez un contact prolongé avec la peau et d'en respirer les émanations. Conservez le produit hors de la portée des enfants.

BASF Construction Chemicals Belgium NV
Industrieterrein 'Ravenshout' 3711
Nijverheidsweg 89, B-3945 Ham
Tel. +32 11 34 04 34. Fax +32 11 40 13 92
basf-cc-be@basf.com - www.basf-cc.be
B.T.W./T.V.A. BE 0417.791.569
RPR/RPM Hasselt

BASF Nederland B.V., Construction Chemicals
Karolusstraat 2
Postbus 132, NL-4900 AC Oosterhout N.B.
Tel. +31 162 47 66 60. Fax +31 162 42 96 94
basf-cc-nl@basf.com - www.basf-cc.nl
B.T.W. NL 001829117B01
HR Arnhem 09022883

Cette information est basée sur notre meilleure connaissance du produit. L'acheteur/applicateur effectuera, en fonction du support et du chantier d'une part, de la mise en œuvre et conditions de travail d'autre part, sur lesquels BASF Construction Chemicals n'a aucune influence, sous sa responsabilité un essai d'adéquation du produit et ce avant de commencer la réalisation. Des conseils écrits et oraux, conforme à nos conditions générales de vente sont sans engagement de notre part. La dernière édition des fiches techniques annule et remplace les précédentes.

ANNEXE B : Formulations des bétons

Ecole des Mines d'Alès

ÉCOLE DES MINES D'ALÈS
ALÈS·NÎMES·PAU

Centre des Matériaux de Grande Diffusion

composition de béton

Etude : **Gâchée n°2**	préliminaire: esssais rhéologiques (E_{eff}/C = 0,6)	Date :		18/02/2009	
désignation du béton :	B	Responsable de l'étude :		Elanga	

	CONSTITUANTS			DENSITE SPECIFIQUE	DOSAGE POUR 1 m³ (kg)	DOSAGE POUR 30 L (kg)
Ciment :	CEM I/ 52,5 N (CE-CP2) CALCIA, de l'usine de Beaucaire			3,14	300	
Filler calcaire						
Sable :	0/4 mixte Aigues Vives (Lazard)	Abs.=	0,80%	2,62	818	24,54
Gravier :	5,6/11,2 naturel Aigues Vives (Lazard)	Abs.=	1,30%	2,56	1008	30,24
superplastifiant :	Sika Viscocrete tempo 12	E.S.=	30%	1,06	1,200	0,036
Eau totale :				1,00	198,81	5,964
Eau efficace :				1,00	180	5,40
Masse volumique théorique (kg/m³)					**2326**	

	Eeff/Léq	0,60			
	G/S	1,23			
	Affaissement	**13,0**	**cm**		
Eprouvette n°1	masse volumique du béton frais		kg/m³	Rc_{28} (Mpa)	**36**
Eprouvette n°2	masse volumique du béton frais		kg/m³	Rc_{28}(Mpa)	**36**
Eprouvette n°3	masse volumique du béton frais		kg/m³	Rc_{28}(Mpa)	**33**
	Moyenne de la masse volumique du béton frais		**kg/m³**		
	masse volumique du béton frais au pot de 5,38L	**2320**	**kg/m³**		
	Volume de pâte	**301**	**L**		
	Volume total du béton	**1001**	**L**		
	pourcentage d'air occlus	**1,10%**			

Ecole des Mines d'Alès

ÉCOLEDESMINESD'ALÈS
ALÈS•NÎMES•PAU

Centre des Matériaux de Grande Diffusion

composition de béton

Etude :	Essais rhéologique sur la formulation de E_{eff} /C = 0,45	Date :	18/02/2009
désignation du béton :	B	Responsable de l'étude :	Mbemba Elanga

	CONSTITUANTS			DENSITE SPECIFIQUE	DOSAGE POUR 1 m³ (kg)	DOSAGE POUR 30 L (kg)
Ciment :	CEM I/ 52,5 N (PM-ES) CALCIA, de l'usine de Beaucaire			3,14	350	10,50
Filler calcaire:						
Sable :	0/4 mixes Aigues vives (Lazard)	Abs.=	0,80%	2,62	831	24,93
Gravier :	5,6/11,2 naturel AiguesVives (Lazard)	Abs.=	1,30%	2,56	1023	30,69
superplastifiant :	Sika Viscocrete tempo 12	E.S.=	30%	1,06	3,33	0,09975
Eau totale :				1,00	177,38	5,321
Eau efficace :				1,00	157,5	4,73
Masse volumique théorique (kg/m³)					**2384,7**	

	Eeff/Léq	0,45			
	G/S	1,23			
	Affaissement	**16,0**	**cm**		
Eprouvette n°1	masse volumique du béton frais		kg/m³	Rc_{28} (Mpa)	**54**
Eprouvette n°2	masse volumique du béton frais		kg/m³	Rc_{28}(Mpa)	**51**
Eprouvette n°3	masse volumique du béton frais		kg/m³	Rc_{28}(Mpa)	**54**
	Moyenne de la masse volumique du béton frais		**kg/m³**		
	Volume de pâte	**295,2**	**L**		
	Volume total du béton	**1009**	**L**		
	masse volumique du béton frais au pot de 5,328L	**2383**	**kg/m³**		
	pourcentage d'air occlus	**1,30**	**%**		

Ecole des Mines d'Alès

Centre des Matériaux de Grande Diffusion

composition de béton

Etude :	préliminaire: esssais rhéologiques (E_{eff}/C = 0,35)	Date :	21/07/2009
désignation du béton :	B	Responsable de l'étude :	Elanga

	CONSTITUANTS			DENSITE SPECIFIQUE	DOSAGE POUR 1 m³ (kg)	DOSAGE POUR 30 L (kg)
Ciment :	CEM I/ 52,5 N (CE CP2 CP2) CALCIA, de l'usine de Beaucaire			3,14	400	12
Filler calcaire:						
Sable :	0/4 mixes Aigues vives (Lazard)	Abs.=	0,80%	2,62	828	24,84
Gravier :	5,6/11,2 naturel AiguesVives (Lazard)	Abs.=	1,30%	2,56	1016	30,48
superplastifiant :	Sika Viscocrete tempo 12	E.S.=	30%	1,06	6,80	0,204
Eau totale :				1,00	155,072	4,652
Eau efficace :				1,00	140	4,20
Masse volumique théorique (kg/m³)					**2406**	

	Eeff/Léq	0,35			
	G/S	1,23			
	Affaissement	**17,0**	**cm**		
Eprouvette n°1	masse volumique du béton frais		kg/m³	Rc_{28} (Mpa)	**71**
Eprouvette n°2	masse volumique du béton frais		kg/m³	Rc_{28}(Mpa)	**66**
Eprouvette n°3	masse volumique du béton frais		kg/m³	Rc_{28}(Mpa)	**70**
	Moyenne de la masse volumique du béton frais		**kg/m³**		
	Volume de pâte	**293,5**	**L**		
	Volume total du béton	**1002**	**L**		
	masse volumique du béton frais au pot de 5,975L	**2445**	**kg/m³**		
	pourcentage d'air occlus	**1,5**	**%**		

ANNEXE C : Protocoles expérimentaux

La mesure du tassement et du retrait au jeune âge

MATERIEL NECESSAIRE

- Le moule de retrait est un moule prismatique en acier recouvert de téflon, de dimensions 7x7x28 cm. Les deux extrémités sont percées en leur centre d'une ouverture circulaire, afin de pouvoir insérer les capteurs de déplacements (précision de 3 à 7 mm/Volts). Le béton est coulé dans une chaussette en plastique, placée à l'intérieur du moule. Sur chaque extrémité de la chaussette est collée une plaque mince en PVC blanc (de dimensions 6.8x6.7 cm² et de 0.4 cm d'épaisseur) avec un ruban adhésif double face. Des chevilles plastiques et des vis (de diamètre 6mm et de longueur 30mm), sont insérées au niveau des plaques PVC. Pour limiter les frottements entre le téflon et la chaussette, l'intérieur du moule est saupoudré de talc.
- Le moule de tassement est cylindrique (diamètre 16 cm, hauteur 32 cm). Une fois le béton mis en place, la surface de celui-ci est recouvert d'un papier filtre (diamètre 15 cm). Une pierre poreuse (diamètre 15 cm), préalablement saturée en eau, repose au-dessus du papier filtre, pour éviter une évaporation trop importante. Le plateau métallique (diamètre 15 cm) surmonte la pierre poreuse et reste à la surface du béton même en cas de ressuage. Le déplacement du plateau rapporté à la hauteur de l'échantillon, est enregistré à l'aide d'un capteur LVDT (précision : 5mm/Volt).

MISE EN PLACE DE L'EPROUVETTE

Le remplissage du moule se fait en une seule couche pour le moule de retrait, et en deux couches pour le moule de tassement.

Le serrage du béton se fait avec **l'aiguille vibrante de 25 mm**, à plusieurs endroits du matériau pendant 5 secondes (+/- 2 secondes), puis l'arasement se fait à la règle.

LE PROTOCOLE D'ESSAI POUR LE RETRAIT PLASTIQUE

Pour un matériau donné, trois essais sont donc à réaliser pour obtenir un fuseau de courbe de retrait plastique.
Les éprouvettes sont conservées dans une salle régulée en température (20°C) et en hygrométrie (HR = 50%)

- Veiller à ce que le moule soit correctement vissé, que les capteurs LVDT soient bien installés et réglés aux deux extrémités du moule, là où les ouvertures ont été faites.
- Placer les vis (préalablement huilées) aux 4 orifices des plaques PVC et les recouvrir avec les chevilles plastiques
- Saupoudrer l'intérieur du moule de talc, pour limiter les frottements entre téflon et polyane.
- Placer à l'intérieur du moule, le polyane et les 2 plaques PVC. Chacune d'elles est collée à la chaussette en plastique avec un ruban adhésif, pour éviter tout contact entre le béton et le moule.
- Remplir le moule et effectuer la mise en place du matériau, puis lancer l'acquisition.

LE PROTOCOLE D'ESSAI POUR LE TASSEMENT

L'éprouvette est conservée dans une salle régulée en température (20°C) et en hygrométrie (HR = 50%)

- Remplir le moule et effectuer la mise en place du béton.
- Placer le papier filtre imbibé d'eau à la surface du matériau.
- Déposer ensuite la pierre poreuse, qui a été préalablement saturée en eau.
- Placer le plateau cylindrique, disposer ensuite la pointe du capteur LVDT sur la tige qui surmonte le plateau cylindrique.
- Lancer l'acquisition.

Le plateau cylindrique reste à la surface du béton malgré un éventuel ressuage. Le déplacement du plateau rapporté à la hauteur de l'échantillon nous donne le tassement exprimé en µm/m.

Le retrait plastique, exprimé en µm/m, est déduit de la somme des déplacements des deux plaques, divisée par la longueur de l'échantillon. Il est à noter que c'est une déformation moyenne, c'est-à-dire à mi-hauteur de l'échantillon.

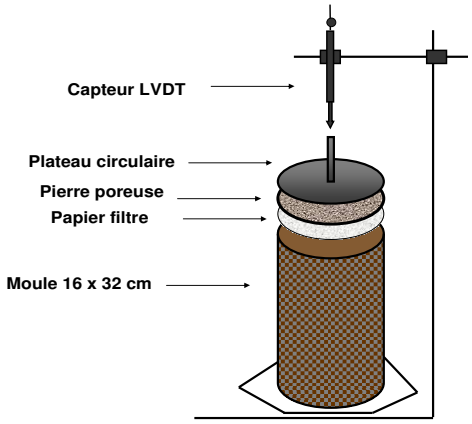


Figure 1a : Schéma du dispositif de mesure du tassement

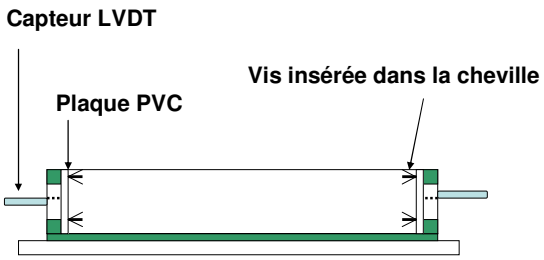


Figure 2a : Schéma du dispositif de retrait plastique

Figure 1b: Dispositif de la mesure du tassement.

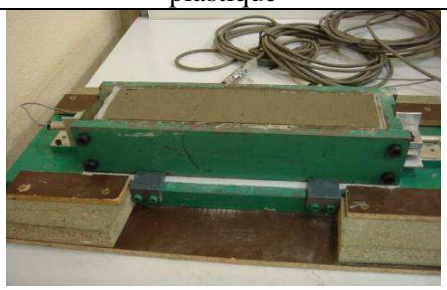


Figure 2b : Dispositif de retrait plastique.

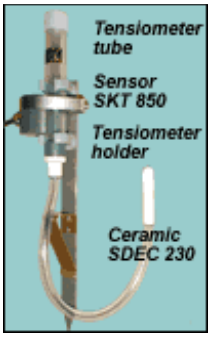
La mesure de la pression capillaire

Les essais sont réalisés dans une salle climatisée à 20°C et 50% d'humidité relative.

MATERIEL NECESSAIRE

- Un moule cylindrique 11x7 cm.
- Céramiques poreuses (diamètre 6mm).
- Capteurs de pression et support (gamme de pression 0-100 Kpa).
- Tube capillaire (diamètres 4mm et 8mm).
- Réservoir d'eau désaérée
- Règle à araser.
- Pompe à vide.
- Seringue.
- Centrale d'acquisition.

MONTAGE DES CERAMIQUES POREUSES ET REMPLISSAGE DES CAPTEURS



Caractéristiques des céramiques poreuses SDEC 230

Dimension : diamètre extérieur 6 mm, diamètre intérieur 2.85 mm, longueur 24.90 mm.

Pression d'entrée d'air : 1 bar.

Taille des pores : 1,5 µm.

Masse : 2,5 grammes.

Conductivité hydraulique : 5. 10 $^{-7}$cm.s $^{-1}$(valeur moyenne calculée par rapport à des mesures effectuées sur une population de 100 pièces du même type).

Caractéristiques des capteurs de pression SKT 850

Tension d'alimentation : tension continue de 5 à 16 Volts).

Gamme de mesure : 0-1 bar (pression maximale admissible sur capteur).

Sensibilité : 6,67 mV/psi = 9,67.10^{-7} V/Pa

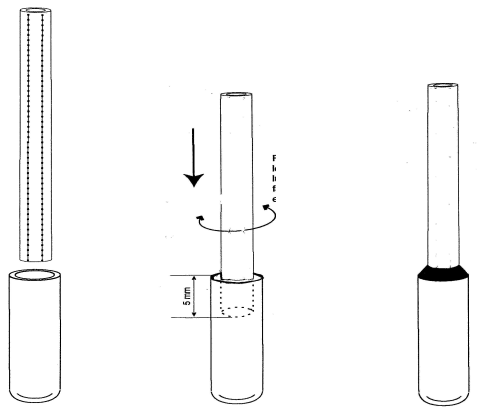
Précision : ± 0,2% à toute échelle.

Dimension du tube capillaire lié à la céramique : diamètre extérieur 4 mm, diamètre intérieur 2 mm, longueur 700 mm.

Dimension du tube capillaire souple lié à la canne: diamètre extérieur 7,5 mm, diamètre intérieur 4 mm, longueur 150 mm.

Dimension de canne (souple) : diamètre extérieur 7,5 mm, diamètre intérieur 4 mm, longueur 150 mm.

Etape n°1 : Collage des céramiques poreuses avec les tubes capillaires



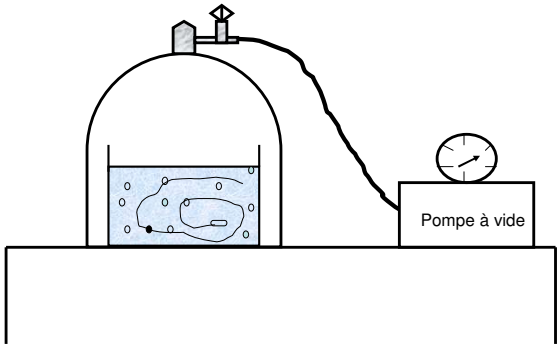
A **B** **C**

- **A** : agrandir le diamètre de la céramique à l'aide d'un tournevis ou d'un foret Ø 4 cm, de façon à pouvoir y insérer l'extrémité du tube plastique.
- **B** : faire pénétrer le tube capillaire ($Ø_{ext}$ 4 mm) de 5mm dans la céramique, en le faisant tourner sur lui-même pour faciliter la mise en place. Ne jamais forcer.
- **C** : étaler la colle (glue ou résine époxy) autour de la partie jointive capillaire/céramique. Attention à ne pas déposer de la colle sur la céramique. Ne manipuler qu'après polymérisation.

- Etaler la colle (glue ou résine époxy) tout autour de l'autre extrémité du tube capillaire ($Ø_{ext}$ 4 mm) sans obstruer l'ouverture et l'insérer à l'intérieur du 2ème tube capillaire ($Ø_{ext}$ 8 mm) qui est relié à la canne souple du capteur à l'aide d'un connecteur plastique pour capillaire.

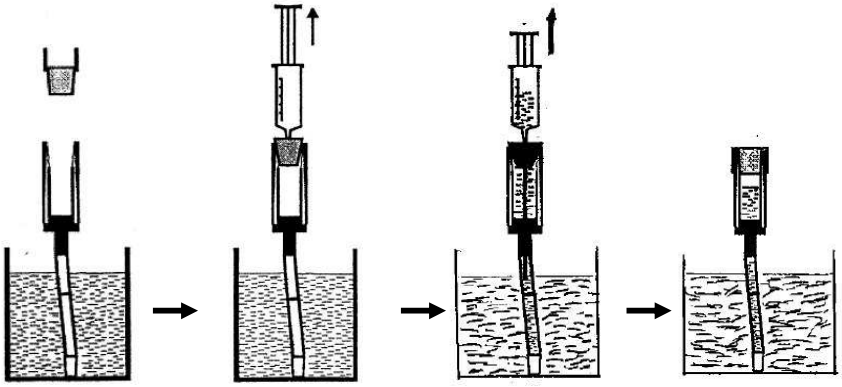
  Une fois les collages et la polymérisation terminés, recouvrir de chatterton le tube plastique à partir de l'embase de la céramique, afin que cette dernière reste immobile à l'intérieur du moule.

Etape n°2 : Désaération de l'eau et des céramiques poreuses



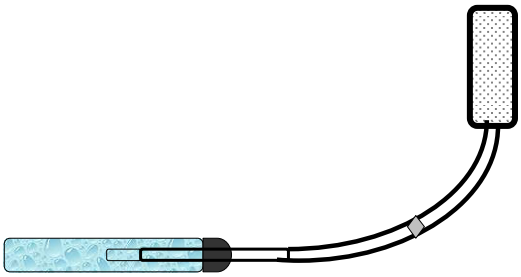
- Introduire tout le système de tube capillaire et la céramique dans un récipient en verre rempli d'eau du robinet afin d'y être désaéré. La désaération à l'aide d'une pompe à vide se fait pendant 30 minutes à 10^{-3} bar.

Etape n°3 : Remplissage des capteurs de pression



Avant le remplissage des capteurs en eau désaérée, il est important de recouvrir de silicone la partie jointive canne souple /capillaire, afin d'éviter toute fuite éventuelle. Le remplissage se fait à l'aide d'une seringue, que l'on inséra dans le bouchon du capteur et dont la céramique trempera entièrement dans le récipient. Une dépression appliquée alors à l'intérieur de la canne aura pour effet immédiat de faire buller l'eau contenue dans les tubes capillaires. Ainsi, on fait monter l'eau aspirée, tout au long des capillaires jusqu'au capteur sous une pression inférieure à 1 bar. Le capteur n'est pas entièrement rempli.

Etape n°4 : Immersion des céramiques poreuses



- Une fois le remplissage des capteurs de pression terminé, les céramiques poreuses restent immergées dans un tube plastique ou en verre rempli d'eau désaérée jusqu'au début de l'essai.

MISE EN PLACE DE L'EPROUVETTE

Le remplissage du moule se fait en une seule couche.
Le serrage du béton se fait à la table **vibrante** pendant 5 secondes (+/- 2 secondes), puis l'arasement se fait à la règle.

LE PROTOCOLE D'ESSAI

L'essai dure 24 heures. Les capteurs de pression ont été préalablement étalonnés en usine, réglés et connectés à l'alimentation électrique et aux tubes plastiques.
Le remplissage des tubes plastiques et des capteurs de pression en eau désaérée s'effectue en 30 minutes.
La mise en place du matériau s'effectue en 5 minutes, suivie de 15 minutes pour la pulvérisation du produit de cure, la pose du film plastique et la disposition des moules dans le tunnel ventilé.

Les essais débutent donc environ 25 minutes après l'introduction de l'eau dans le malaxeur. La saisie automatique des données se fait toutes les 10 minutes.

Trois éprouvettes sont étudiées selon 3 modes de cure:

- 1ère : recouverte d'un film plastique,
- 2ème : recouverte d'un produit de cure, le Masterkure 114 dont le dosage est de 200g/m², ce qui correspond à 2g pour l'éprouvette. Il est appliqué très près de la surface à l'aide d'un pulvérisateur de 500 ml. Une protection est placée tout autour de l'éprouvette pour éviter la dispersion du produit.
- 3ème : sans mode de cure.

- Installer et régler les capteurs de pression sur le dispositif expérimental.
- Remplir le moule de béton à mi-hauteur.
- Installer la céramique poreuse dans l'orifice du moule et terminer la mise en place.
- Pulvériser le produit de cure sur un des 3 moules confectionnés, et couvrir un deuxième avec un film plastique.
- Installer les moules avec produit de cure et sans mode de cure, dans le tunnel ventilé.
- Lancer l'acquisition.

Lors du remplissage des tubes, s'il y a des remontés de bulles, les enlever à l'aide d'une seringue, ou les faire remonter jusqu'au réservoir d'eau du capteur de pression.

La mesure se termine lorsque la diminution de pression mène à une vaporisation de l'eau interstitielle. La céramique poreuse va alors se trouver en contact avec la phase gazeuse et une phase liquide ; une bulle de vapeur a d'ailleurs tendance à remonter dans le tube du capteur. A cette échéance la mesure n'est plus possible.

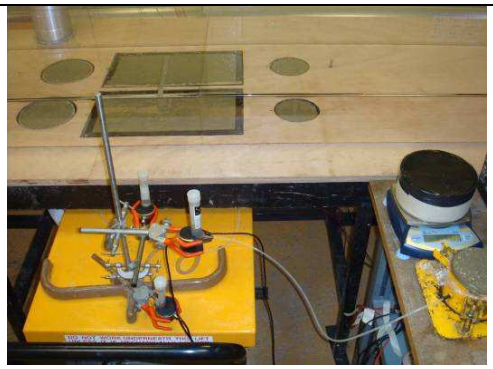


Figure 1 : Dispositif de la mesure de la pression capillaire

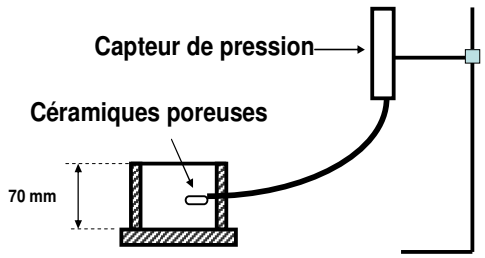


Figure 2 : Schéma du dispositif de la mesure de la pression capillaire

INFLUENCE DU SECHAGE ET DE LA CURE SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS AU TRES JEUNE ÂGE

Résumé :

La maîtrise de la fissuration prématurée ne peut être garantie sans la prévision des retraits au très jeune âge. Ces déformations plastiques nécessitent d'être contrôlées à l'aide d'une cure. Les travaux réalisés présentent une étude expérimentale du comportement des bétons au très jeune âge. Trois bétons présentant un volume de pâte, un rapport G/S et une maniabilité identique mais trois rapports E_{eff}/C différents ont été étudiés. Les essais ont été réalisés dans un tunnel ventilé permettant d'imposer un flux d'air uniforme pendant l'essai, en maintenant une température et une hygrométrie constante. Les essais ont montré que lorsqu'une cure n'est pas appliquée, les bétons fissuraient (avant le début de prise) dans des conditions sévères (dispositif de retrait empêché).

Pour étudier le phénomène, des mesures d'évaporation, de dépression capillaire, des déformations longitudinales horizontales ont été effectuées pour les trois bétons qui ont été étudiés, suivant deux conditions de séchage (avec et sans vent) et différents modes de cure afin d'étudier l'influence de la cure sur les déformations plastiques du matériau.

Les résultats montrent que le comportement du matériau diffère selon le mode de cure mis en œuvre. Deux étapes bien distinctes sont observées dans le comportement des bétons au très jeune âge, suivant les conditions de séchage : un premier domaine durant lequel les déformations sont importantes et le béton reste proche de la saturation, suivi d'un second domaine qui se traduit par de faibles déformations et une baisse du degré de saturation. Ces résultats sont similaires à ceux observés pour les sols fins soumis à la dessiccation.

Mots clés : retrait plastique, fissuration au très jeune âge, dépression capillaire, séchage, teneur en eau, cure.

INFLUENCE OF DRYING ON THE BEHAVIOUR OF CONCRETE AT VERY EARLY-AGE

Abstract:

Controlling premature cracking cannot be guaranteed without forecasting of shrinkage at early age. These plastic deformations need to be controlled by using a curing. This research program presents an experimental study of the behaviour of concrete at very early-age. Three concretes with the same paste, the same G/S ratio and the same workability but different w_{eff}/c ratios have been studied. The tests were conducted in a ventilated tunnel to impose a uniform airflow during the test, while maintaining a constant temperature and humidity. Tests showed that without curing, the concrete cracked (before setting) under severe conditions (restrained shrinkage device).

To study the phenomenon, measurements of evaporation, capillary depression, and longitudinal horizontal deformations were performed for the three concretes. Firstly, according to drying conditions (with and without wind) and second is the use of different methods of curing was used to study the influence of curing and drying on plastic deformation of the material.

The results show firstly that the material behaviour depends on the method of curing implemented. On the other hand, two distinct stages are observed in the behaviour of concrete at early age, following drying conditions: a first area in which the deformations are important and concrete is close to saturation, followed by a second area that results in low distortion and a lower degree of saturation. These results are similar to those observed for the fine soils subjected to drying.

Key words: plastic shrinkage, early-age cracking, capillary depression, drying, water content, curing.