



**HAL**  
open science

# Etude du retrait plastique des bétons à base de granulats recyclés avec mesure de l'influence de leur degré de saturation

Jean-Claude Souche

► **To cite this version:**

Jean-Claude Souche. Etude du retrait plastique des bétons à base de granulats recyclés avec mesure de l'influence de leur degré de saturation. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université Montpellier, 2015. Français. NNT: 2015MONT097 . tel-01831008

**HAL Id: tel-01831008**

**<https://theses.hal.science/tel-01831008>**

Submitted on 5 Jul 2018

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

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

# THÈSE

Pour obtenir le grade de  
**Docteur**

Délivré par **UNIVERSITE DE MONTPELLIER**

Préparée au sein de l'école doctorale **INFORMATION  
STRUCTURES SYSTEMES I2S**

Et de l'unité de recherche **CENTRE DES MATERIAUX DES  
MINES D'ALÈS – C2MA**

Spécialité : **MECANIQUE ET GENIE CIVIL**

Présentée par **Jean-Claude SOUCHE**

**ETUDE DU RETRAIT PLASTIQUE DES BETONS  
A BASE DE GRANULATS RECYCLES  
AVEC MESURE DE L'INFLUENCE  
DE LEUR DEGRE DE SATURATION**

Soutenue le 10 Décembre 2015 devant le jury composé de

Moulay Said El Youssoufi, Professeur, Université Montpellier

Président

Ahmed Loukili, Professeur, Ecole Centrale de Nantes

Rapporteur

Jean-François Georgin, Professeur, INSA Lyon

Rapporteur

Rachid Zentar, Professeur, Ecole des Mines de Douai

Examineur

Philippe Devillers, Maître Assistant, ENSA Montpellier

Examineur

Marie Salgues, Maître Assistant, Ecole des Mines d'Alès

Examineur

Eric Garcia Diaz, Professeur, Ecole des Mines d'Alès

Directeur de thèse



Page laissée intentionnellement blanche

## REMERCIEMENTS

La thèse ! la thèse ! la thèse !

A 45 ans et quelques mois, me voilà arrivé au bout de ce challenge qui a consisté à diriger le département d'enseignement génie civil de l'Ecole des Mines d'Alès et, en parallèle, à mener à bien ce doctorat, qui plus est dans les trois années normalement imparties.

Heureusement, cela ne s'est pas passé comme le décrit *Tiphaine Rivière* dans son livre « *Carnets de thèse* » aux éditions *Seuil*, c'est-à-dire le pur cauchemar !

Et s'il en a été autrement, c'est que j'ai été aidé, encouragé, soutenu à chaque instant par des tas de gens bien à qui je dois un immense merci.

### MERCI :

à Eric Garcia Diaz, mon Directeur de thèse qui m'a proposé l'idée, qui a cru en moi et qui m'a fait confiance du premier au dernier jour.

à la direction de l'Ecole des Mines et à la direction des études (Alain et Jammes) qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mon action.

à la direction de l'école doctorale I2S qui a accepté, sans hésiter, mon inscription en thèse pour 3 ans et à mi-temps.

à Ahmed Loukili et Jean-François Georgin qui ont accepté d'être rapporteurs pour ce travail et à Moulay Said El Youssoufi et Rachid Zentar qui ont accepté de participer à mon jury. C'est un immense honneur qui m'est fait.

à mes encadrants Philippe Devillers et Marie Salgues pour leur aide continue et leurs conseils avisés. Le dynamisme et l'implication de Marie auront été déterminants pour moi. Je lui dois beaucoup.

à Christian, le bob le bricoleur du labo et le Mc Gyver des capteurs. Sans lui, pas de banc et pas de mesure ! et à Pierre le roi des caméras et de l'analyse d'images.

à Gwenn, Etienne, Thibaut, Nathalie, Laurent, Alain D, Jean-Jacques, Valérie qui m'ont aidé à manipuler par ci, qui m'ont aidé dans la gestion du département par là. Sachez que ces coups de pouce furent précieux pour moi, en gain de temps, mais aussi par le soutien et l'amitié que cela témoigne. Je souhaite que cette équipe du pôle MSGC et du département GC garde cette bonne humeur, cette simplicité et cette compétence longtemps...

à mes élèves de missions R&D ou de projets IRD2M, Ambre, Adel, Cindy, Clément, Florian, Quentin, Rémi, Thomas et Vibhu. Merci pour leur enthousiasme, leur envie et leurs bonnes idées. Je pense en avoir fait bon usage.

aux relecteurs de mon mémoire de thèse, Audrey, Eric, Marie, Philippe, Christine et Norma.

à toutes les personnes qui m'ont fait le plaisir, la gentillesse et l'amitié d'assister à la soutenance finale.

à Elise, mon âme sœur, à Guilhem, Céleste, Raphaëlle, Julianne, mes enfants adorés qui ont toujours manifesté de l'intérêt pour mon travail, qui m'ont encouragé et soutenu. Ils ont parfois partagé la charge et supporté...

Si j'en suis là aujourd'hui, c'est grâce à eux !

Je leur dédie l'intégralité de ce travail réalisé pour moi ET pour eux.

Page laissée intentionnellement blanche.

## RESUME

### Résumé en français:

Dans une démarche de valorisation des déchets, les granulats recyclés sont introduits dans la formulation des bétons pour donner naissance à de nouveaux bétons recyclés qui représentent l'objet du projet national RECYBETON et du projet ANR ECOREB. Cette thèse se concentre sur l'étude du béton frais et en particulier la maîtrise du retrait plastique et l'effet du degré de saturation initial des gravillons recyclés sur le comportement des bétons recyclés.

Deux familles de bétons avec des rapports eau/ciment respectifs de 0,6 et 0,45 ont été testés en conditions endogènes ainsi qu'en dessiccation ( $V_{\text{vent}} = 8 \text{ m/s}$ ). Chaque famille de bétons est constituée d'un béton naturel de référence et de deux bétons recyclés différenciés par le degré initial de saturation des gravillons recyclés (50 et 120 % de l'absorption nominale).

Les résultats expérimentaux soulignent la capacité des gravillons recyclés initialement partiellement saturés à capter rapidement l'eau contenue dans la pâte de ciment, modifiant ainsi le rapport E/L, les propriétés rhéologiques du béton frais et les résistances mécaniques du béton durci. Après saturation en eau, si les conditions de séchage conduisent à un manque d'eau dans le béton, les gravillons recyclés peuvent fournir de l'eau à la pâte et constituer un potentiel de cure interne qui reste assez modéré toutefois.

Le retrait plastique sous vent est explicitement lié au ressuage, au développement de la pression capillaire et à la fissuration. Le temps d'initiation de la fissuration dépend de la quantité d'eau totale dans le béton et de sa capacité à ressuer tandis que l'ouverture de fissure varie avec la valeur de retrait plastique mesurée. Dans cette étude, le développement de la pression capillaire est le paramètre majeur du processus qui conduit à la fissuration. La fissuration apparaît au moment où l'air entre dans le matériau poreux. Les différences de comportements les plus importantes sont observées entre bétons ayant des quantités d'eau totale différentes. Par ailleurs, les bétons recyclés manifestent un retrait plus grand que les bétons naturels témoins.

La compilation des résultats expérimentaux a permis de mettre sur pied des modélisations simplifiées qui illustrent les comportements observés. Les pores concernés par l'entrée d'air dans les bétons recyclés au moment de la fissuration semblent correspondre aux plus gros pores de la pâte. Enfin, un couplage hygrothermique séchage-température du béton pourrait influencer sur le démarrage de l'hydratation.

**English abstract :**

In the context of sustainable development, the reuse of construction and demolition waste is necessary to conserve nonrenewable natural aggregate resources, so recycled aggregates are introduced in concrete mix design. This is the aim of the national projet RECYBETON and the research project ECOREB. This study deals with the fresh concrete and more specifically with shrinkage control and the effects of the initial saturation degree of recycled coarse aggregates on concrete behavior.

Two concrete families, with two different water/cement ratios 0,60 and 0,45, are tested under endogenous and drying (wind speed equal to 8 m/s) conditions. Each concrete family contains a reference natural concrete and two recycled concretes. The initial saturation degree is the difference between them (recycled coarse aggregates saturated or semi saturated).

Experimental results underline the capacity of non-saturated aggregates to quickly absorb water from cement paste, modifying the W/C ratio, rheological properties of the fresh concrete and the mechanical strength at 28 days of recycled concretes. After saturation in water, recycled aggregates can release water into the cement paste if the undergone drying conditions lead to a lack of water in the cement matrix. The recycled coarse aggregates could be seen as a moderate internal curing potential.

Experimental plastic shrinkage studies carried out under drying conditions highlight a link between bleeding, capillary pressure, plastic shrinkage and cracking. It should be pointed out that the initial cracking is dependent on the total quantity of water in the concrete and on its bleeding capacity. The opening cracks vary with the plastic shrinkage values measured during the test. The analysis of the results emphasizes that the capillary pressure is the determining parameter and that the air entry value matches the cracks. The major behavior differences are found between concretes with different volumes of water. The recycled concretes have a larger plastic shrinkage than natural concretes.

Finally, the analysis of all the experimental results have allowed concrete modelling and understanding why concretes do not behave in the same way. When it cracks, the air come into the largest pores of the concrete paste. Moreover, a hygrothermal coupling exists between the drying and the temperature in concrete. It can affect hydration start up.

<b>SOMMAIRE GÉNÉRAL</b>
-------------------------

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>3</b>
<b>RESUME .....</b>	<b>5</b>
<b>SOMMAIRE GÉNÉRAL.....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>11</b>
<b>CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>13</b>
1 NECESSITE DU RECYCLAGE.....	13
1.1 Le recyclage, contexte actuel et constat .....	13
1.2 La déconstruction des ouvrages et le tri .....	15
2 LE MATERIAU BETON .....	17
2.1 Les composants du béton.....	17
2.2 La formulation .....	23
2.3 Le processus d'hydratation du ciment : .....	24
2.4 De la fabrication à la prise .....	26
3 ETUDE DES DEFORMATIONS DU BETON AU TRES JEUNE AGE, PHASE PLASTIQUE.....	35
3.1 Le béton, matériau poreux .....	35
3.2 L'eau présente dans le béton frais .....	36
3.3 Le séchage du béton.....	43
3.4 Les déformations verticales : consolidation et ressuage.....	45
3.5 Les déformations horizontales : retrait plastique.....	47
3.6 Le béton au très jeune âge, milieu granulaire humide .....	55
4 LES BETONS A BASE DE GRANULATS RECYCLES .....	57
4.1 Le référentiel normatif des bétons recyclés .....	57
4.2 Propriétés des bétons recyclés durcis .....	57
4.3 Propriétés des bétons recyclés au jeune âge .....	62
4.4 Cure des bétons recyclés, notion de cure interne.....	66
5 CONCLUSION DU CHAPITRE 1.....	68



<b>CHAPITRE 2 : PROGRAMME EXPERIMENTAL.....</b>	<b>71</b>
1 LES MATERIAUX ET LA FABRICATION DES BETONS .....	71
1.1 L'eau .....	71
1.2 Matériaux utilisés.....	72
1.3 Fabrication des bétons .....	74
1.4 Caractéristiques des bétons à l'état frais.....	76
2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL D'ETUDE, BANC VENTILE.....	78
2.1 Démarche de l'étude .....	78
2.2 Soufflerie et tunnel ventilé.....	78
2.3 Capteurs de mesure.....	82
2.4 Etudes des déformations et de la sensibilité à la fissuration.....	82
2.5 Etudes des pressions capillaires dans le béton.....	89
2.6 Evaluation du gradient de pression capillaire .....	92
2.7 Mesures de pertes d'eau.....	93
2.8 Estimation du temps de début de prise .....	95
3 MESURES DES ECHANGES D'EAU GRANULATS RECYCLES / PATE .....	97
4 MESURES DE LA PERMEABILITE A L'ETAT FRAIS ET DE L'AIR.....	99
5 MESURES ET INCERTITUDES.....	101
5.1 Précision des appareils de mesure .....	101
5.2 Effet du protocole de fabrication sur les mesures.....	101
5.3 Isotropie des mesures de retrait .....	102
5.4 Evaluation du retrait thermique .....	104
6 CONCLUSION DU CHAPITRE 2.....	107
<b>CHAPITRE 3 : INFLUENCE DU DEGRE DE SATURATION INITIAL DES GRANULATS RECYCLES SUR LES BETONS RECYCLES.....</b>	<b>109</b>
1 CALCULS PREALABLES .....	109
1.1 Absorption des granulats .....	109
1.2 Séchage sous vent et perte d'eau .....	111
2 TENEUR EN EAU DES GRANULATS RECYCLES .....	114
2.1 Teneur en eau des gravillons recyclés au fil du temps .....	114
2.2 Evaluation des transferts hydriques gravillons recyclés-pâte.....	118
3 CARACTERISTIQUES DE LA PATE A L'ETAT FRAIS.....	122
3.1 Variation du rapport E/L en fonction du temps .....	122

3.2	Air occlus.....	123
3.3	Variation du volume de pâte en fonction du temps .....	124
4	EFFETS SUR L'OUVRABILITE .....	125
4.1	Mesures effectuées au cône d'Abrams .....	125
4.2	Etude des valeurs d'affaissement mesurées en sortie de malaxeur .....	126
4.3	Suivi de l'évolution de l'affaissement en fonction du temps .....	126
4.4	Modélisation de la perte d'affaissement en fonction du temps .....	128
4.5	Evaluation des paramètres de la loi de comportement .....	129
5	EFFETS SUR LES RESISTANCES MECANIQUES .....	131
5.1	Analyse des résistances mécaniques.....	131
5.2	Corrélation avec quelques méthodes de formulation.....	132
6	SYNTHESE DU CHAPITRE TROIS .....	134
 <b>CHAPITRE 4 : ETUDE DES DEFORMATIONS ET DE LA FISSURATION DU BETON A L'ETAT PLASTIQUE .....</b>		<b>135</b>
1	FISSURATION DU BETON A L'ETAT PLASTIQUE.....	135
1.1	Positionnement du problème .....	135
1.2	Détermination de l'âge de fissuration.....	136
1.3	Détermination de l'ouverture de fissure .....	138
2	DESCRIPTION DES PHENOMENES PHYSIQUES .....	140
2.1	Observations expérimentales .....	140
2.2	Méthodologie de détermination des temps caractéristiques .....	141
2.3	Déformations verticales : détermination de l'âge $\{t_{cons}\}$ .....	142
2.4	Pressions capillaires et retrait : détermination de l'âge $\{t_{pc}\}$ .....	143
2.5	Courbes caractéristiques des matériaux : détermination de $\{t_{pair}\}$ .....	144
2.6	Synthèse relative à la cinétique des essais.....	148
3	INFLUENCE DES GRANULATS RECYCLES SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS A L'ETAT PLASTIQUE .....	153
3.1	Déformations verticales .....	153
3.2	Etude de la pression capillaire .....	156
3.3	Etude du retrait plastique .....	159
4	SYNTHESE DU CHAPITRE 4 .....	166
4.1	Corrélations entrée d'air et fissuration .....	166
4.2	Bilan du chapitre 4.....	167

<b>CHAPITRE 5 : VERS UNE MODELISATION DU COMPORTEMENT DES BETONS A L'ETAT PLASTIQUE .....</b>	<b>169</b>
1 MESURES DE LA PERMEABILITE DU BETON FRAIS .....	170
1.1 Mesures directes au perméamètre.....	170
1.2 Mesure du gradient de pression capillaire et calcul des perméabilités associées ....	172
1.3 Bilan et comparaisons.....	174
2 MODELISATION DU RETRAIT PLASTIQUE A PARTIR DE LA PRESSION CAPILLAIRE .....	175
2.1 Variations volumiques des bétons sous séchage .....	175
2.2 Le retrait plastique en fonction de la pression capillaire .....	178
3 EFFET DU SECHAGE SUR LA TEMPERATURE DU BETON FRAIS .....	181
3.1 Modèles présentés.....	181
3.2 Principes de modélisation et équations.....	182
3.3 Données de base et calculs préliminaires .....	183
3.4 Résultats et discussions.....	184
4 PRESSION D'ENTREE D'AIR ET PARAMETRES DE FORMULATION .....	186
4.1 Détermination du diamètre de pores à l'entrée d'air .....	186
4.2 Corrélation diamètres de pores et paramètres de formulation .....	187
5 BILAN DU CHAPITRE 5 .....	189
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>191</b>
1 CONCLUSIONS.....	191
2 BESOINS EN RECHERCHE ET PERSPECTIVES.....	193
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>195</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>205</b>
ANNEXE 1 : FICHES MATERIAUX .....	205
ANNEXE 2 : COURBES DE RETRAIT PLASTIQUE .....	214
ANNEXE 3 : COURBES DE DERIVEES DES PRESSIONS CAPILLAIRES EN FONCTION DU TEMPS .....	217

## INTRODUCTION

Le secteur de la construction fait face à deux défis concomitants. Premièrement, les ressources naturelles deviennent plus rares avec une baisse programmée de la production des ressources alluvionnaires. Deuxièmement, le volume de déchets issus des chantiers de déconstruction et de démolition augmente du fait d'un parc d'ouvrages vieillissants.

L'idée d'une substitution des granulats naturels par des granulats recyclés paraît donc intéressante dans le contexte de la construction durable, d'autant plus que le taux de recyclage n'atteint que 50 % en France, essentiellement dans les travaux publics, contrairement à d'autres pays comme le Japon, la Belgique ou le Danemark.

Il est donc apparu nécessaire de lancer le projet national RECYBETON dont le but est la mise au point de formules de bétons durables qui intègrent en leur sein une grande proportion de granulats recyclés.

Cet objectif nécessite toutefois de mener des recherches sur ce sujet qui reste complexe car les granulats recyclés présentent des particularités en comparaison des granulats naturels. Leur qualité et leur homogénéité est souvent moindre car la transformation des déchets de chantier en granulats recyclés nécessite un tri des différents matériaux qui composent la matière première de départ. Les caractéristiques physiques des granulats recyclés sont en général inférieures à celles des granulats naturels : masse volumique, friabilité, résistances mécaniques. En revanche, les granulats recyclés qui intègrent l'ancienne pâte de ciment sont plus poreux et ont une absorption qui est 5 à 10 fois plus forte que celle des granulats naturels.

En complément du projet national RECYBETON, le projet de recherche ANR ECOREB a pour but de favoriser l'emploi de granulats recyclés au sein de nouveaux bétons. En particulier le « work package 1 : eau et matériaux recyclés » de ce projet doit apporter des recommandations relatives au béton recyclé à l'état frais en particulier pour la maîtrise de l'ouvrabilité et du retrait plastique.

Si la bibliographie relative au retrait endogène ou de dessiccation à l'état durci est abondante, les références concernant le retrait plastique des bétons naturels sont déjà plus rares. Lorsqu'il s'agit du retrait plastique des bétons recyclés, la littérature est quasiment inexistante. Ce constat est encore plus vrai si les bétons sont étudiés sous des conditions de dessiccation en présence de vent.

Par ailleurs, les études menées sur des bétons recyclés n'intègrent pas 100% de gravillons recyclés au sein de bétons dont le but est l'emploi sur chantier, ce qui est le cas du projet RECYBETON. Enfin, dans les cas les plus communs, les bétons sont étudiés à eau efficace constante quel que soit le degré de pré-saturation des granulats. Rares sont les études qui ne corrigent pas l'eau d'ajout pour mesurer l'effet du degré de saturation des granulats recyclés sur le nouveau béton recyclé.

Par conséquent, l'objectif de ce travail, à dominante expérimentale, est double. Premièrement il a pour but la meilleure compréhension du comportement des bétons recyclés en comparaison avec les bétons naturels. Deuxièmement, il doit permettre de mesurer l'influence de l'absorption d'eau et de sa cinétique, donc de la saturation des granulats recyclés sur les caractéristiques des nouveaux bétons.

Ce travail de recherche vient donc se positionner à l'interface entre les différents points qui sont pauvres en références : la phase plastique du béton, l'étude sous vent, l'utilisation de gravillons recyclés, la pré-saturation partielle des gravillons recyclés.

Cette recherche va donc être présentée en 5 grands chapitres.

Le chapitre 1 est un état de l'art qui doit permettre de bien appréhender la problématique. En l'absence de référence majeure sur le sujet, le chapitre comporte deux grands volets : l'étude bibliographique relative au retrait plastique et son lien avec la pression capillaire ; l'état de l'art concernant les bétons recyclés ainsi que leurs particularités.

Puis le chapitre 2 met l'accent sur les moyens expérimentaux mis en œuvre. En particulier, une description concernant le banc ventilé est effectuée. Il permet d'étudier des échantillons soumis au vent avec des mesures de perte de masse, de retrait libre, de pressions capillaires et de fissuration. De même, l'instrumentation complète utilisant entre autre, capteurs lasers ou caméras HD est précisée.

Le chapitre 3 est le premier chapitre proposant des résultats. Il permet de mettre en lumière les transferts hydriques en jeu entre les gravillons recyclés et la pâte du béton. La cinétique de ces transferts hydriques dans le béton est abordée et permet de hiérarchiser les phénomènes et leurs importances.

Le chapitre 4 compile les résultats du chapitre 3 et les utilise pour mener à bien l'étude du retrait plastique associé au développement de la dépression capillaire. L'objectif consiste en la compréhension des phénomènes depuis la mise en place dans les moules jusqu'à la fissuration à l'état frais.

Enfin le chapitre 5 compile les résultats des chapitres 3 et 4, et à la lumière de références ou de méthodologies développées au chapitre 1, propose des premières modélisations et projette des pistes de réflexion et de développements futurs.

## CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre décrit le contexte du recyclage de nos jours puis évoque le matériau béton, ses constituants, son mode de fabrication et ses propriétés au jeune âge. Un focus est ensuite fait sur les déformations au très jeune âge et sur les mécanismes qui les provoquent. Enfin, la synthèse bibliographique se termine par un paragraphe relatif aux particularités des bétons recyclés au très jeune âge.

### 1 NECESSITE DU RECYCLAGE

Avec la société de consommation, l'ère du « jetable » fait loi. Au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, depuis la révolution industrielle, l'humanité consomme, gaspille les ressources naturelles et pollue l'environnement avec de nombreux déchets dont les déchets de construction et de démolition, dont le béton, qui représentent 48 % des déchets totaux en UE (Pepe, 2014). Il devient donc essentiel de se préoccuper du devenir du béton lorsqu'il est en fin de vie (Cudeville, 2011) car ce matériau est souvent considéré comme inerte et mis en décharge sans valorisation (DAO, 2012).

Si le principe du recyclage remonte à l'époque des romains (Quebaud, 1996) les premiers essais sur le recyclage des bétons remontent aux années 1970 au Japon et aux Etats Unis et en 1980 pour la France. La valorisation des bétons déconstruits impose un procédé de traitement où il faut les débarrasser de leurs ferrailles, les broyer, les concasser et enfin très souvent les transformer en graves utilisables dans les Travaux Publics (Cudeville, 2011).

Constituant une grande part des déchets de construction et de démolition, le béton déconstruit est un gisement potentiel de granulats pour bétons hydrauliques (PN RECYBETON, 2011) (DAO, 2012). Le coût environnemental de la non valorisation des déchets rend économiquement viable les opérations de recyclage qui permettent d'économiser les ressources naturelles de matériaux granulaires pour espérer maintenir dans le futur un prix raisonnable des granulats pour la construction (Hansen, 1992) (PN RECYBETON, 2011)

Le projet national de Recherche et Développement, RECYBETON vise donc à accroître la réutilisation de tous les produits issus du béton déconstruit tant comme granulats que comme liant hydraulique (PN RECYBETON, 2011).

Les « bétons recyclés » sont des bétons qui incorporent des granulats recyclés. Ceux-ci se caractérisent notamment par des capacités d'absorption d'eau élevées (PN RECYBETON, 2011) modifiant leurs propriétés et la fissuration au très jeune âge du béton (Hansen, 1992).

#### 1.1 Le recyclage, contexte actuel et constat<sup>1</sup>

En France les déchets du BTP représentent 300 millions de tonnes par an, dont 36 % représentent des produits à base de béton pour lesquels on estime que seulement 50 % sont recyclés (Cudeville, 2011).

<sup>1</sup> Le bilan, les chiffres et les données de ce chapitre sont issus du site internet de l'UNPG, <http://www.unpg.fr>

Les chiffres clés de la production française de granulats recyclés<sup>2</sup> peuvent être résumés à 20,3 millions de tonnes (données relatives à 2013), 150 entreprises et 350 plates-formes de recyclage. Cette production est à ramener à la production totale de granulats en France qui atteint 380 millions de tonnes produits en 2013, soit 5,4 % du total<sup>3</sup>.

Si les matériaux recyclés utilisés sur les chantiers ou en transit d'un chantier de démolition à un chantier de travaux publics sont comptabilisés la proportion de matériaux valorisés peut aller jusqu'à 10 à 20 % selon les régions<sup>4</sup>.

Au niveau européen, l'hétérogénéité des sources statistiques rend les comparaisons délicates entre pays car les valeurs annoncées ne traduisent pas forcément la même réalité (Quebaud, 1996). Toutefois, the « German Umweltbundesamt » a publié en 2008 un rapport sur la production et l'utilisation des granulats recyclés en Europe. Il est constaté, (figure 1-1), que les recyclés sont encore loin d'être compétitifs vis-à-vis des granulats naturels. De plus la majeure partie des recyclés sont à destination des chantiers TP et très peu sont à destinés à être utilisés comme granulats pour béton, à l'exception de quelques pays comme le Danemark, les Pays-Bas ou la Belgique (Alaejos et al., 2004) (Zhao, 2014).

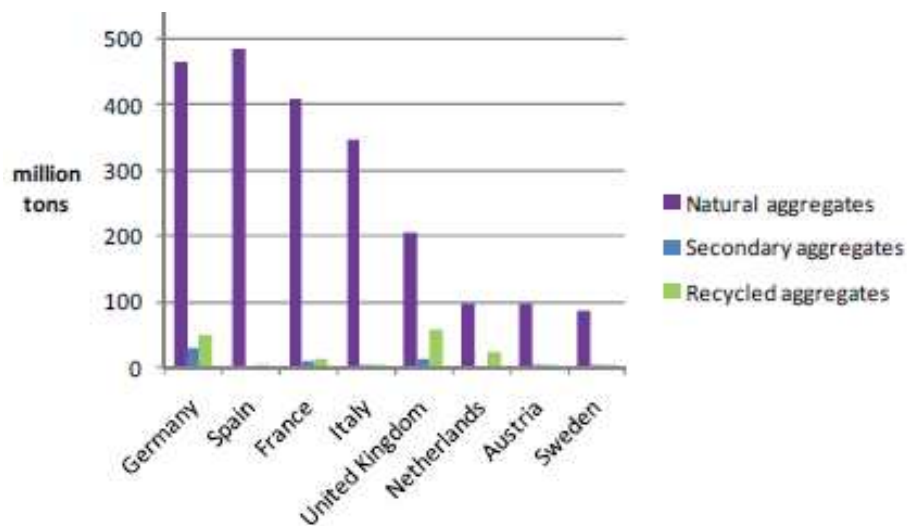


Figure 1- 1 : production de granulats en Europe d'après Böhmer et al (2008) (Pepe, 2014)

En France, il y a des disparités entre régions. En région parisienne, en Rhône Alpes ou dans le Nord, 90 % des sous-couches routières des voiries sont réalisées en matériaux de recyclage. En effet, l'importance de produits de démolition, le manque de place, le coût dissuasif de mise en décharge et le coût des matériaux naturels favorisent le recyclage des granulats qui permet une économie de la ressource naturelle et une réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

<sup>2</sup> Ces données statistiques sont issues de l'enquête statistique réalisée par l'UNICEM sur délégation du ministère de l'Industrie.

<sup>3</sup> Ce chiffre correspond seulement aux granulats retraités par les plates-formes de recyclage des producteurs de granulats.

<sup>4</sup> Ces données proviennent du service de l'observation et des statistiques du Commissariat général au développement durable (publication d'octobre 2010).

Dans un écobilan comparatif, l'avantage revient aux granulats recyclés traités en milieu semi-urbain proche du gisement et des clients. Leur utilisation évite, en effet, d'une part un transport de matériaux de démolition vers les décharges et d'autre part un transport d'approvisionnement du chantier en granulats depuis une carrière. La diminution importante des transports représente des gains financiers importants et un meilleur bilan en émissions de CO<sub>2</sub>.

La condition indispensable au bon fonctionnement du circuit déconstruction-recyclage tient donc à de faibles transports entre les plates-formes de traitement et les lieux de consommation. Il faut donc pouvoir installer de nouveaux centres de recyclage dans les zones urbaines au plus près des chantiers et c'est un frein pour le développement du recyclage.

En 2009, les producteurs de granulats recyclés se sont engagés sur un doublement de la production de granulats recyclés.

## 1.2 La déconstruction des ouvrages et le tri

En Europe, les Eurocodes fixent la durée usuelle d'utilisation du projet de 50 à 100 ans pour les bâtiments et les ouvrages. Lorsqu'ils sont en fin de vie, leur démolition génère de multiples matériaux qu'il est désormais nécessaire de trier avant valorisation.

Cette exigence conduit à repenser l'organisation et les méthodes des chantiers de démolition (Quebaud, 1996) qui passent désormais par une déconstruction réfléchie et un tri des déchets sur chantiers. La planification de ces travaux de déconstruction permet de maîtriser la durée et donc le coût des travaux tout en augmentant la sécurité des personnes et la qualité des matériaux récupérés. Cette phase de planification débute par l'identification de la nature et de la quantité des matériaux potentiellement récupérables<sup>5</sup> (DAO, 2012).

Les méthodes de démolition adaptées ainsi que le tri sélectif sur chantier sont des causes de surcoût et d'allongement des délais de chantier. Ces causes peuvent être minimisées par une conception de l'ouvrage, un choix des matériaux et des dispositions constructives adaptées à la déconstruction future (Quebaud, 1996).

C'est désormais un objectif clairement affiché des Eurocodes qui sont seuls reconnus comme répondant à l'exigence de « sustainability » du règlement (UE) N° 305/2011 du parlement européen et du conseil du 9 mars 2011 sur les produits de construction : dès le design, le concepteur doit prendre en compte et étudier la déconstruction de celui-ci.

Chaque phase du projet doit intégrer la déconstruction finale<sup>6</sup>. Le cycle de vie complet des matériaux de construction est présenté sur la figure 1-2.

---

<sup>5</sup> L'engagement 256 du Grenelle rendra obligatoire la réalisation d'un audit visant à fournir la nature, la quantité et la localisation des matériaux constitutifs des bâtiments et des déchets résiduels non constitutifs des bâtiments de SHOB > 1000 m<sup>2</sup> ou bien des bâtiments agricoles, industriels etc...

<sup>6</sup> Le site internet <http://www.wrap.org.uk> donne des guides pour prendre en compte la déconstruction tout au long des phases du projet.



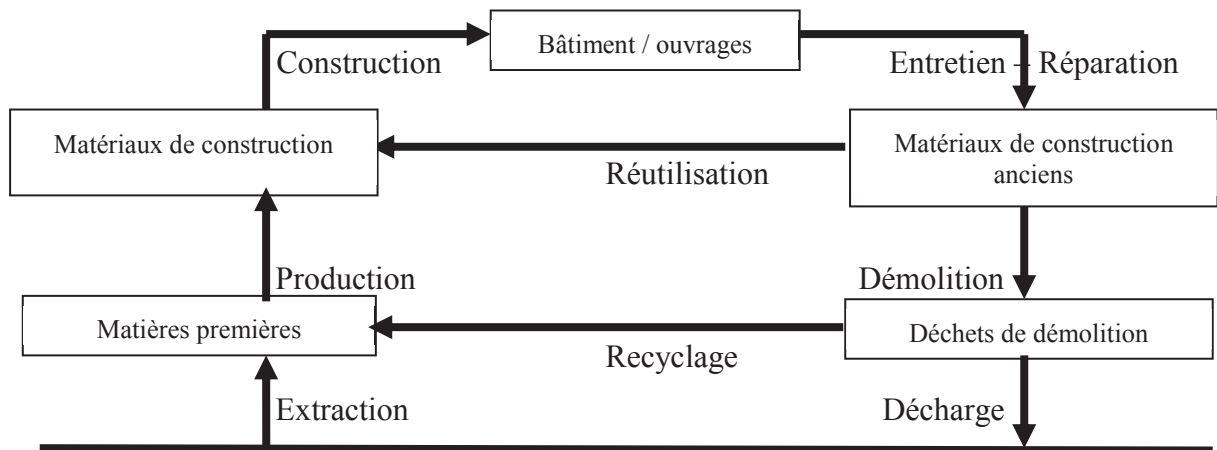


Figure 1- 2 : modèle du cycle de vie d'un ouvrage ou bâtiment d'après Lauritzen 93 (Quebaud, 1996)

Parallèlement, la Directive Européenne 2008/98/CE (PN RECYBETON, 2011), le développement des plans départementaux de gestion des déchets de chantier, et l'importance croissante du critère « environnement » dans l'attribution des marchés de travaux favorisent le tri sur chantiers.

Ces bonnes pratiques permettent d'atteindre une meilleure homogénéité de la qualité des granulats recyclés à intégrer dans le béton, ce qui est favorable à l'obtention de bétons recyclés de qualité (DAO, 2012).

## 2 LE MATERIAU BETON

Ce second point retrace l'évolution du béton depuis le mélange des constituants ayant une consistance plastique jusqu'au matériau solide ayant des propriétés bien spécifiques. Au très jeune âge, les changements volumiques du mélange, qui est un milieu poreux, débutent à l'état plastique avant le début du durcissement et peuvent s'accompagner d'une fissuration précoce.

L'état de l'art est orienté sur la phase plastique du mélange avant le durcissement et sur les matériaux effectivement utilisés dans le cadre du projet national RECYBETON.

### 2.1 Les composants du béton

Le béton est un mélange (figure 1-3) défini par une formulation. Ce béton doit répondre à des exigences de performance telles que la consistance à l'état frais et la résistance mécanique à l'état durci. A partir du choix des constituants, les propriétés attendues sont obtenues grâce à un protocole de fabrication adapté (Charonnat, 2012).

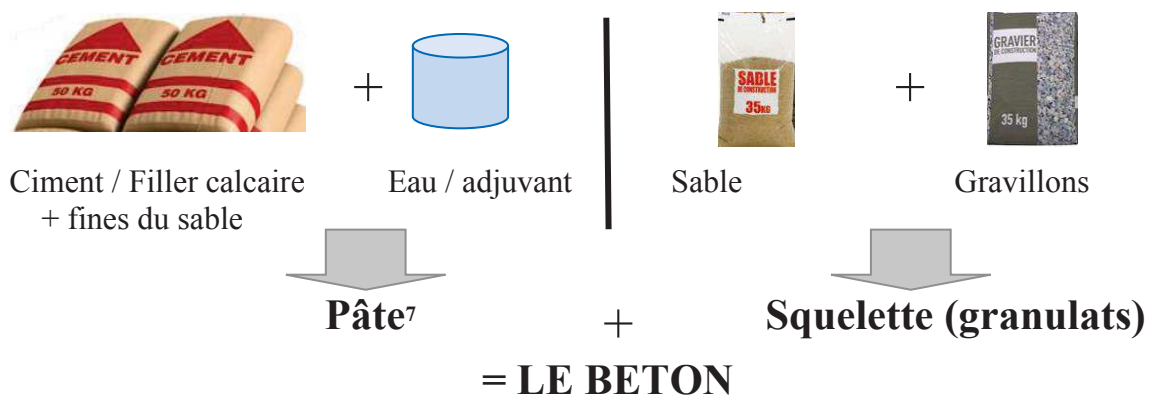


Figure 1- 3: schéma récapitulatif des constituants du béton

#### 2.1.1 Granulats

Les granulats pour béton sont conformes à la norme EN 12-620 / A1 « granulats pour bétons » et sont les matériaux naturels de référence du projet national RECYBETON. Ils sont classés par catégories granulométriques, sables siliceux de Sandrancourt (0-4 mm) et gravillons calcaires de Givet (4/10) et (6.3/20). Le choix des fuseaux granulométriques des différents granulats dépend des objectifs à atteindre en termes d'empilements granulaires du béton (Festa and Dreux, 2007) (De-Larrard François, 1999).

##### 2.1.1.1 Elaboration des granulats recyclés

La fabrication des granulats recyclés est réalisée dans des installations fixes ou mobiles qui comprennent les mêmes grandes phases d'élaboration que pour les granulats naturels avec l'adjonction de pré-traitements spécifiques additionnels, présentés sur la figure 1-4, visant à supprimer les ferrailles ou d'autres types de déchets (bois, plastiques, etc...) (PN RECYBETON, 2011) (Quebaud, 1996) (European Commission DG ENV, 2011).

<sup>7</sup> On appelle pâte l'ensemble liant, eau efficace, air occlus ou entraîné et fines des sables (fraction < 125 µm). (Bernier, 2004).

Des préconisations relatives au stockage sont précisées dans le « japanese proposed standard » (Hansen, 1992) et concernent le stockage des matériaux produits (stockage différencié des sables et des gravillons) et l'état de saturation des granulats qu'il est recommandé de maintenir saturés à surface sèche (arrosage si nécessaire pour maintenir les granulats dans cet état).

Le procédé de production des granulats recyclés se résume conformément à la figure 1-4 :

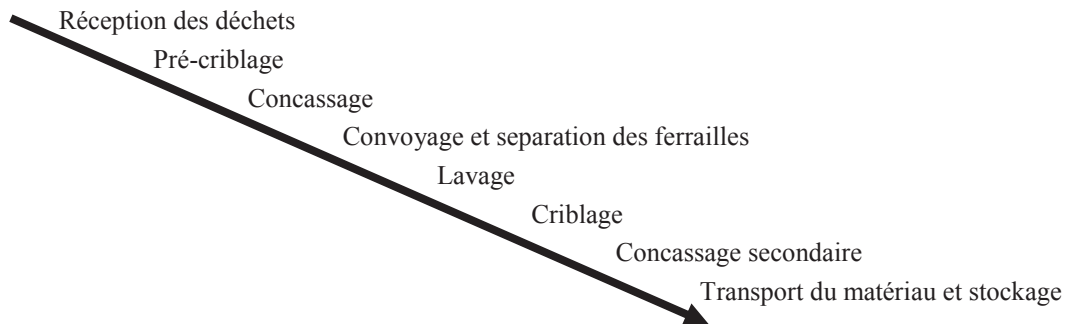


Figure 1- 4 : procédé de fabrication des granulats recyclés (Korre and Durucan, 2009)

### 2.1.1.2 Normalisation

#### 2.1.1.2.1 Normes européennes et françaises applicables

Le référentiel technique des granulats recyclés est spécifié dans le tableau 1-1.

Norme	Titre	Description sommaire
NF EN 933-11	Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, juillet 2009, Partie 11 : essai de classification des constituants de gravillons recyclés.	Description d'une méthode simple d'examen des gravillons recyclés afin d'identifier et d'estimer les proportions relatives des différents constituants.
NF EN 12620 + A1,	Granulats pour béton, juin 2008, § 5.8 : classification des gravillons recyclés.	Spécification des caractéristiques des granulats et des fillers élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés et des mélanges de ces granulats qui sont utilisés dans la fabrication du béton.
NF P 18-545	Granulats, éléments de définition, conformité et codification, septembre 2011, §5.8 et § 10 : granulats recyclés / granulats pour bétons hydrauliques et mortiers.	Définitions et termes relatifs aux granulats issus des normes européennes, critères d'acceptabilité des essais, modalités des contrôles de la production, adéquation avec l'usage des granulats.
NF EN 1744-1	Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - octobre 2010- Partie 1 : analyse chimique, - § 10.2 : granulats recyclés.	Modes opératoires pour l'analyse chimique des granulats.
NF EN 1744-5	Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats - janvier 2007 - Partie 5 : détermination des sels chlorures solubles dans l'acide.	Spécifie un mode opératoire qui permet de doser les chlorures solubles dans l'acide, susceptibles d'être présents dans les granulats.
NF EN 1744-6	Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats - janvier 2007 - Partie 6 : détermination de l'influence d'un extrait de granulat recyclé sur le temps de prise initial du ciment.	Spécification d'un mode opératoire qui permet de déterminer l'influence des constituants solubles dans l'eau contenus dans les granulats recyclés, sur le temps de prise initial du ciment.

Tableau 1- 1 : principales normes applicables en France aux granulats (recyclés en particulier)

### 2.1.1.2.2 *Positionnement des granulats recyclés utilisés*

La norme (NF EN 933-11) précise les constituants des gravillons recyclés au sein de différents tableaux dont quelques-uns sont résumés ci-après, (tableau 1- 2).

Constituants	Description
Rc	Bétons, produits à base de béton, mortier - Eléments de maçonnerie en béton
Ru	Graves non traitées, pierre naturelle - Graves traitées aux liants hydrauliques
Rb	Eléments en terre cuite (briques, tuiles) - Eléments de maçonnerie en silicate de calcium Béton cellulaire non-flottant
Ra	Matériaux bitumineux
Rg	Verres
X	Autre : Cohésif : argile et sols - Divers : métaux ferreux ou non Bois, plastiques et caoutchoucs non flottants - Gypse, plâtre
Fl	Matériaux Flottants en volume

Tableau 1- 2 : constituants des granulats recyclés selon la norme (NF EN 933-11)

Les granulats recyclés du projet RECYBETON sont obtenus par traitement de bétons de déconstruction et sont fournis en deux coupures (4/10) et (10/20). Ils sont classés respectivement Rcu98 et Rcu99 selon la norme 933-11 (Sedran, 2013). Les teneurs maximales en constituants R<sub>b</sub> ; X ; R<sub>g</sub> ; sulfates solubles ; matériaux influant le temps de prise et la résistance du béton sont également spécifiées et conformes à la norme européenne (NF EN 12620+A1, 2008) (§ 5.8).

Selon les normes bétons française (NF EN 206/CN) ou allemande DIN 4226-100, 2000 (Etxeberria larranaga, 2004), les gravillons recyclés du projet national RECYBETON sont de type 1, (agrégats de type, graviers et sables de béton), c'est-à-dire la meilleure qualité.

Ils sont aussi conformes à la meilleure qualité des standards décrits dans les normes belges (DAO, 2012), espagnoles (Sanchez de Juan and Alaejos Gutierrez, 2004), brésiliennes (J.Estefane de Iliveira et al., 2004) ou encore japonaises (Hansen, 1992).

### **2.1.2 Gravillons de béton recyclés, principales caractéristiques**

Les gravillons recyclés diffèrent des granulats naturels car ils sont composés de deux matériaux de natures différentes : le gravillon naturel du béton de première génération et le mortier qui adhère à ces graviers, tel que représenté sur la figure 1-5. Cette composition d'éléments cause la dégradation de leurs caractéristiques : augmentation de l'absorption d'eau, diminution de la densité apparente et de la densité spécifique (densité des grains), diminution de la résistance à l'abrasion (essai MD) et à la fragmentation (essai LA), teneur en sulfates... (Sanchez de Juan and Alaejos Gutierrez, 2004) (Lalesev et al., 2010)<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Ces auteurs présentent une riche analyse bibliographique à laquelle il convient de se référer pour plus de détails. Les tendances et valeurs proposées sont cohérentes avec ce qui a été relevé dans la littérature et qui est présenté dans ce rapport.

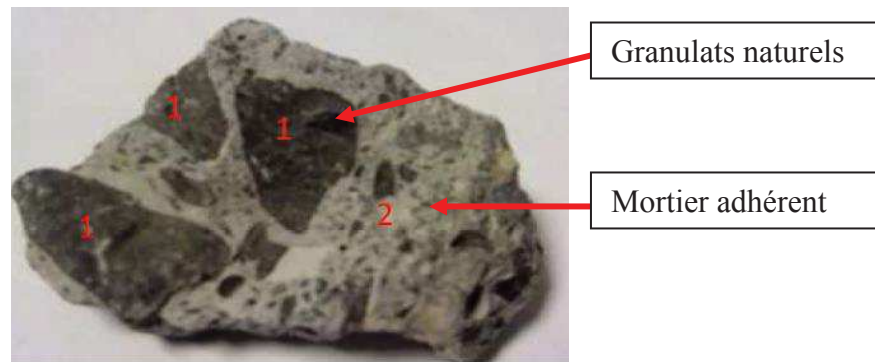


Figure 1- 5 : vue de détail de granulats recyclés (Zhao, 2014)

Le tableau 1-3 met en évidence que l'impact est d'autant plus sensible que les fractions de granulats recyclés sont fines et qu'elles contiennent beaucoup de mortier (Kou, 2006) (Zhao et al., 2013).

	(Hansen, 1992)	(Sanchez de Juan and Alaejos Gutierrez, 2004)
Fraction 16 / 32 mm	25 – 35 %	//
Fraction 8 / 16 mm	40 %	23 – 44 %
Fraction 4 / 8 mm	60 %	33 – 55 %

Tableau 1- 3 : quantités de mortier attaché aux granulats naturels de génération 1.

La fraction de mortier des granulats recyclés impacte les propriétés des bétons recyclés : élasticité, retrait, fissuration de même que la durabilité ou encore résistances mécaniques (Sanchez de Juan and Alaejos Gutierrez, 2004). En effet, la littérature met en évidence que les propriétés des granulats recyclés affectent les caractéristiques du béton recyclé durci (Xiao et al., 2012). Le paragraphe 4 du chapitre 1 développera cet aspect.

#### 2.1.2.1 Masse volumique

La masse volumique<sup>9</sup> des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels du fait de la présence de mortier qui adhère aux granulats originaux, mortier qui a une porosité plus importante (Etxeberria larranaga, 2004) (Brito and Alves, 2010) (DAO, 2012). Pepe (2014) avance le chiffre d'une masse volumique de 7 à 9 % de moins.

La masse volumique des gravillons recyclés varie de 2240 à 2420 kg/m<sup>3</sup> pour la fraction 4/8 mm à 2330 à 2490 kg/m<sup>3</sup> pour la fraction 16/32 mm (Hansen, 1992) (Sanchez de Juan and Alaejos Gutierrez, 2004). Elle diminue avec la granulométrie des gravillons (Hansen, 1992).

#### 2.1.2.2 Absorption d'eau

Du fait de la présence de mortiers et donc d'une porosité plus importante (Pepe, 2014), l'absorption d'eau des granulats recyclés, précisée dans le tableau 1-4 est supérieure à l'absorption des granulats naturels et qui peut aller jusqu'à 2,5 – 3 % pour la classe A selon la norme granulats.

<sup>9</sup> Masse volumique à l'état Surface Saturée Sèche (SSS).

Fractions granulaires des gravillons	Absorption à l'eau	Référence
4/8 et 8/16 mm	5,1 à 11,5 % et 4,2 à 8,8 %	(Etxeberria larranaga, 2004). (Sanchez de Juan and Alaejos Gutierrez, 2004)
4/8 et 16/32 mm	8,7 % et 3,7 %	(Qiao and Chen, 2012)
5/10 et 10/20 mm	6,81 et 5,83 %	(Zhao, 2014)
Tous gravillons	7 % accepté	Norme japonaise

Tableau 1- 4 : absorptions usuelles de granulats recyclés.

L'absorption d'eau des granulats recyclés dépend essentiellement de la qualité et de la quantité du béton initial et influe directement sur le comportement rhéologique des bétons frais (Etxeberria et al., 2007) (Berredjem and Arabi, 2009) (Sánchez de Juan and Alaejos Gutiérrez, 2009) (Pepe, 2014) (Zhao et al., 2015).

Pour maîtriser au mieux cet aléa, il est recommandé de pré-mouiller les granulats avant de les introduire dans le malaxeur. On définit pour cela l'état « saturé surface sèche » (SSS), état dans lequel la porosité intra-granulaire est saturée et il existe une couche d'eau fine en surface des grains, état (d) de la figure 1-6.

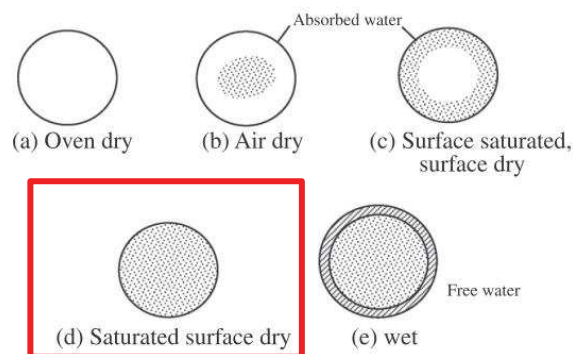


Figure 1- 6 : états d'humidité au sein des granulats <sup>10</sup> (Djerbi Tegguer, 2012).

L'adsorption d'eau des gravillons recyclés est aussi fonction d'autres paramètres :

- la teneur en pâte de ciment autour des granulats naturel du béton parent. Plus celle-ci est importante et plus l'adsorption sera forte (Hansen, 1992) (Sanchez de Juan and Alaejos Gutierrez, 2004) (Djerbi Tegguer, 2012) (Zhao et al., 2013)
- la taille des granulats : plus la granulométrie est faible plus l'adsorption d'eau sera forte (Etxeberria larranaga, 2004) (Sanchez de Juan and Alaejos Gutierrez, 2004) (Zhao et al., 2013)
- la porosité intrinsèque des granulats en fonction de leur nature pétrographique (Djerbi Tegguer, 2012), bien que pour des granulats recyclés, ce critère ne paraît pas prioritaire compte tenu de la quantité de pâte de ciment « initiale » adhérente aux granulats naturels.

<sup>10</sup> Humidité totale : (a) : aucune, (b) et (c) < capacité d'adsorption, (d) égale à la capacité d'adsorption, (e) > capacité d'adsorption

Humidité de surface : (a), (b), (c) : négative {peut adsorber de l'eau}, (d) nulle, (e) positive.

### 2.1.2.3 Friabilité des granulats, essai Los Angeles

Lors de la fabrication d'un béton, le malaxage provoque un phénomène de frottement entre les grains. Si les granulats ne sont pas assez résistants, une quantité plus ou moins importante de fines ou de sables peut être générée et modifier les caractéristiques du béton obtenu (Quebaud, 1996).

Cette friabilité mesurée à l'aide de l'essai Los Angeles<sup>11</sup> est utilisée pour déterminer la résistance aux chocs et à la fragmentation d'un échantillon de granulat. Le coefficient Los Angeles (noté LA) obtenu représente le pourcentage de l'échantillon initial passant au tamis de 1.6 mm après fragmentation dans un cylindre en présence de boulets d'acier. Plus le pourcentage LA est bas, plus l'échantillon est résistant à la fragmentation. La norme NF P 18 545 donne trois catégories de granulats en fonction du résultat à l'essai Los Angeles : LA<sub>30</sub>, LA<sub>40</sub>, LA<sub>50</sub>.

L'essai LA appliqué à des granulats recyclés, donne 35 à 42 % de perte à l'essai, (Sanchez de Juan et al 2004). Pour Quebaud (1996) les valeurs expérimentales obtenues sur des graviers et sables recyclés, respectivement 31,8  $\pm$  3,8 et 17,5  $\pm$  3 respectent les seuils de la norme. Les granulats recyclés sont donc utilisables en granulats à béton.

Toutefois, le résultat de l'essai dépend de la résistance des granulats eux-mêmes mais également la résistance du béton parent (Etxeberria larranaga, 2004). Si les indices LA sont corrects, (inférieurs à 40), la teneur en mortier sera limitée (44 %) et les valeurs corrélées de masse volumique (2160 Kg/m<sup>3</sup>) et d'adsorption d'eau (8%) seront acceptables (Sanchez de Juan et al 2004).

### 2.1.2.4 Caractéristiques physico-chimiques

Les granulats recyclés ont une teneur en sulfates supérieure aux granulats naturels du fait de la présence de mortier attaché aux granulats « parents » (Sanchez de Juan et al 2004). Les bétons recyclés sont donc moins résistants vis-à-vis des sulfates (Li, 2008). Les valeurs seuils<sup>12</sup> sont données par les normes (NF P 18-454) et (NF EN 12620+A1, 2008) pour les granulats naturels et recyclés.

La norme béton (NF EN 206/CN) limite à 0,4 % de la masse de ciment la quantité de chlorures des bétons destinés à recevoir des armatures en acier de béton armé.

Enfin, pour prévenir tout risque de réaction alcali-silice qui conduit à un gonflement, une fissuration et une rupture du béton, la norme (NF EN 12620+A1, 2008) précise qu'il est nécessaire que le béton d'origine présent dans les granulats recyclés ne contienne pas de granulats réactifs. Dans le cas général de granulats recyclés, il conviendra de considérer le matériau comme potentiellement réactif, à moins que la preuve de sa non réactivité n'ait été faite.

## **2.1.3 Ciment**

Les ciments courants bénéficient d'un double marquage CE + NF<sup>13</sup>. La norme de référence des ciments courants est la norme européenne (NF EN 1997-1:2001) « ciment – partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ».

---

<sup>11</sup> A réaliser selon la norme NF P 18-573.

<sup>12</sup> Pour les catégories A, B, C de granulats.

<sup>13</sup> CE : produit conforme aux réglementations européennes en matière de santé, de sécurité et de respect de l'environnement.

Les ciments y sont subdivisés en cinq types selon la nature et la composition des constituants. Les ciments Portland composés CEM II/A-L 42,5 (Sedran, 2013) sont composés d'un mélange de clinker, de gypse (sulfate de calcium) et d'autres composés minéraux tels que les fillers calcaires (Bernier, 2004) (Nonat, 2008). La valeur 42,5 est la « classe de résistance » définie par la valeur de la résistance à la compression mesurée sur mortier à 28 jours ( $R_{c28} \in [42,5 ; 52,5]$ ) et exprimée en MPa. Le tableau 1-5 synthétise les spécifications de la norme pour un ciment CEM II/A 42,5 N.

Dénomination		Clinker % (C)	Autres constituants % (A)
CEM II	Ciment Portland composé	$65\% \leq C \leq 95\%$	$5\% \leq C \leq 35\%$ : laitier de haut fourneau, fumée de silices ( $\leq 10\%$ , pouzzolanes naturelles, cendres volantes, schistes calcinés, fillers calcaires

Tableau 1- 5 : ciments courants CEM II (NF EN 1997-1:2001)

Dénomination de la phase	Formule brute	Notation cimentaire <sup>14</sup>	% massique des ≠ phases dans le clinker
Alite	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	$\text{C}_3\text{S}$	50 – 70 %
Bélite	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	$\text{C}_2\text{S}$	5 – 25 %
Aluminate	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$\text{C}_3\text{A}$	2 – 12 %
Ferrite	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	$\text{C}_4\text{AF}$	0 – 15 %

Tableau 1- 6 : composition minéralogique moyenne du clinker, (Festa and Dreux, 2007)

Le tableau 1-6 souligne l'importance de l'Alite comme phase dominante du clinker (Taylor, 1997) (Bresson, 2006), mais les ciments peuvent contenir d'autres composés tels que les fumées de silices, les cendres volantes, les schistes calcinées, les pouzzolanes naturelles ou encore les laitiers de haut fourneau dont les propriétés sont détaillées par (Rafaï, 2008) et (Abdo, 2012). Les composés minéraux additionnels peuvent aussi être des fillers calcaires qui sont issus du broyage de roches calcaires comportant une teneur en carbonate de calcium supérieure à 75 % (Abdo, 2012). Les ciments avec ajouts (CEM II) en contiennent jusqu'à 35 % (NF EN 1997-1:2001). Ces fillers calcaires modifient la nature et le volume des hydrates formés même à faible pourcentage (5-10%) (Lothenbach et al., 2008).

### 2.1.4 Adjuvant

Les adjuvants sont incorporés au béton pour modifier les propriétés du matériau frais ou durci. Par exemple, les superplastifiants-réducteurs d'eau permettent d'obtenir un affaissement cible sans jouer sur la quantité d'eau du mélange (Bernier, 2004). Ils contiennent en général environ 30 % d'extraits secs (De-Larrard François, 1999).

## 2.2 La formulation

Dans les bétons, le dosage de l'eau est un paramètre clef (Festa et al 2007) qui conditionne l'hydratation du ciment, l'ouvrabilité du béton à l'état frais et l'obtention des résistances à la compression à l'état durci à 28 jours ( $f_{c28}$ ) (Bernier, 2004).

NF : garante de spécifications complémentaires relatives à la composition, les performances et les contrôles.

<sup>14</sup>  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$  : notation cimentière et correspondance (Bresson, 2006) C = CaO=Chaux / S = SiO<sub>2</sub>=Silice / H = H<sub>2</sub>O = Eau / A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = Alumine / F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = Hématite / \$ = SO<sub>3</sub> = anhydride sulfurique /  $\underline{\text{C}}$  = CO<sub>2</sub> = dioxyde de carbone.



Il existe plusieurs méthodes de formulation dont les méthodes de Bolomey, de Féret, de Dreux-Gorisse ou de Féret modifiée par l'EMP<sup>15</sup> (De-Larrard François, 1999). Ces méthodes explicitent  $f_{c28}$  en fonction de la quantité d'eau efficace ou totale (Festa and Dreux, 2007), exprimée en volume ( $V_e$ ), en masse ( $E_{eff}$ <sup>16</sup>) ou au travers du rapport massique eau/ciment ( $E_{eff}/C$ ) (Bernier, 2004) (Yamine, 2007).

Le dosage minimal  $E_{eff}/C$ <sup>17</sup> à prévoir correspond à la quantité d'eau qui va juste remplir le volume de vides de l'empilement granulaire (De-Larrard François, 1999). Pour un E/C donné, le béton qui aura un empilement granulaire le plus compact (optimum granulaire) présentera la meilleure ouvrabilité à l'état frais (Yamine, 2007).

Les propriétés mécaniques du béton et les propriétés de transfert (porosité, perméabilité) sont dépendantes du rapport E/C (Salgues, 2013). Une augmentation de la quantité d'eau au-delà du dosage minimal va contrôler l'ouvrabilité du béton frais, va augmenter la porosité du béton durci et va donc influencer sur sa durabilité (De-Larrard François, 1999) (Bernier, 2004).

L'eau supplémentaire à  $E_{eff}$  va aussi servir à saturer les granulats (Festa and Dreux, 2007). Ceux-ci ont une absorption nominale qui peut aller de 1 à 2 % pour des granulats naturels et de 5 à 10 % pour des gravillons recyclés voire 10-15 % pour des sables recyclés (Etxeberria larranaga, 2004) (Douara et al., 2009) (Zhao et al., 2013) (Qiao and Chen, 2012). Dans la formulation, il conviendra donc de prendre en compte la teneur en eau initiale des gravillons pour doser au plus juste l'eau complémentaire nécessaire à leur saturation correspondant à l'absorption nominale (Bernier, 2004) (Festa and Dreux, 2007).

Les relations entre les quantités d'eau à prévoir est donnée ci-après (Cortas et al., 2010),

$$E_{eff} = E_{aj} - E_{abs} + E_{superplastifiant} \quad \text{Eq (1)}$$

Si les gravillons sont sursaturés on peut aussi écrire :

$$\begin{aligned} E_{aj} &= E_{eff} + E_{abs} - E_{superplastifiant} - w M_{sec} \\ &= E_{eff} + E_{abs} - E_{superplastifiant} - \frac{w}{1+w} M_{sat} \end{aligned} \quad \text{Eq (2)}$$

Avec  $E_{aj}$ ,  $E_{eff}$ ,  $E_{abs}$  : eau d'ajout introduite dans le malaxeur, eau efficace définie par le rapport  $E_{eff}/C$ , eau absorbée par les gravillons ;  $M_{sec}$ ,  $M_{sat}$  : masse des gravillons à l'état sec et sursaturé ;  $w$  : teneur en eau des gravillons à l'état sursaturé.

### 2.3 Le processus d'hydratation du ciment :

L'hydratation des ciments est un processus complexe mettant en jeu des phénomènes physiques et chimiques à l'échelle microscopique qui obéissent aux lois générales de la thermodynamique et de la cinétique (Nonat, 2008). Ces réactions chimiques couplées interviennent en série, en parallèle ou dans le cadre de combinaisons plus complexes (dissolutions, diffusion des composants, nucléation, précipitation des hydrates...) (Bullard et al., 2011).

<sup>15</sup> EMP : épaisseur maximale de pâte (De-Larrard François, 1999).

<sup>16</sup> La désignation « eau efficace » ( $E_w$ ) s'applique à la partie de l'eau totale, dans un  $m^3$  de béton, disponible pour l'hydratation du ciment. C'est aussi l'eau totale diminuée de celle absorbée par les granulats. (Bernier, 2004).

<sup>17</sup> Pour les bétons durcis, l'application du modèle d'hydratation de Powers fait apparaître des valeurs E/C de l'ordre de 0,42 (Powers and Bromnyard, 1946), (Jensen and Hansen, 2001a).

Les paragraphes qui suivent décrivent succinctement les principaux phénomènes en jeu lors de l'hydratation des ciments en considérant que les mécanismes d'hydratation des principales phases qui se superposent restent relativement indépendants (Bresson, 2006) (Nonat, 2008) (Bullard et al., 2011).

### 2.3.1 L'hydratation des silicates et des aluminates

Les silicates sont l'alite ou silicates tricalciques ( $C_3S$ ) et la bélite ou silicates bicalciques ( $C_2S$ ). Le  $C_3S$  est majoritaire, (tableau 1-6), et est donc à l'origine de la plus grande quantité de portlandite et de C-S-H formés (Bresson, 2006) (Bullard et al., 2011). Les aluminates sont amenés par les aluminates tricalciques ( $C_3A$ ) ainsi que la ferrite ou le ferroaluminate tétracalcique ( $C_4AF$ ) qui conduisent à la précipitation des mêmes composés hydratés (Nonat, 2008). La phase ( $C_3A$ ) qui réagit très vite au contact de l'eau affecte sensiblement le processus d'hydratation. La précipitation des composés hydratés est influencée par la présence de sulfate de calcium (gypse) dans le clinker qui contrôle donc la vitesse d'hydratation des aluminates (Nonat, 2008) (Bullard et al., 2011). En présence de fillers calcaires, l'hydratation des aluminates conduit à la formation de monocarbonates de calcium hydratés, au lieu des monosulfates de calcium hydratés, et d'ettringite qui restent stables dans le temps (Lothenbach et al., 2008).

### 2.3.2 La cinétique d'hydratation

L'interaction entre les silicates et les aluminates est complexe à définir. Toutefois, la cinétique d'hydratation reste globalement celle du  $C_3S$ , avec la présence de pics de dégagement de chaleur complémentaires qui correspondent à la dissolution des  $C_3A$ , à l'hydratation des aluminates et à la formation de l'ettringite et des AFm (Bullard et al., 2011).

La cinétique d'hydratation, (figure 1-7), peut être décrite en 4 périodes qu'on observe au calorimètre : réaction initiale, période dormante, accélération, décélération :

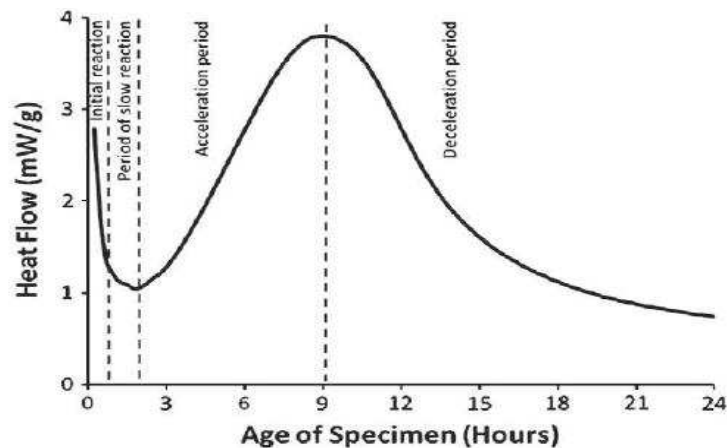


Figure 1- 7 : taux d'hydratation de l'alite =  $f(t)$  donné par calorimétrie isotherme (Bullard et al., 2011)

Les quatre périodes en jeu peuvent être décrites comme suit :

- période 1 : réactions initiales, (10 mn). Dès la mise en contact de l'eau, dans le malaxeur, les grains de ciment anhydres réagissent et se dissolvent. Cette période est caractérisée par un pic calorimétrique important (Pertué, 2008) (Bullard et al., 2011)

- période 2 : période dormante (2 à 3 heures). Sous l'effet du passage en solution des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$ , le pH de la solution augmente et la dissolution des constituants anhydres ralentit, le dégagement de chaleur est alors faible (Pertué, 2008) (Bullard et al., 2011). Durant cette période, le béton est dans un état plastique et les transformations physiques conduisent à un raidissement de la pâte (Garcia Boivin, 1999) (Neville, 2000)

période 3 : période d'accélération. Au-delà d'une concentration critique en ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$ , il y a précipitation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , puis apparition des mécanismes de nucléation et précipitation de différentes phases comme les C-S-H. Cette forte activité chimique est la cause de l'exothermie de la réaction d'hydratation. Les hydrates se lient et donnent à la pâte un squelette rigide ; c'est la prise du béton, moment où le béton passe d'un état plastique à un état solide (Garcia Boivin, 1999) (Pertué, 2008) (Bullard et al., 2011)
- période 4 : période de décélération. Le manque de réactifs, suite à consommation par la réaction d'hydratation, ou le manque de place suite au développement des hydrates, ou encore le manque d'eau amène une décélération des réactions chimiques et une diminution de chaleur dégagée (Bullard et al., 2011).

## 2.4 De la fabrication à la prise

### 2.4.1 La fabrication du béton

Il est recommandé de sursaturer, à l'état SSS + 1%, les gravillons avant de les introduire dans le malaxeur (Sedran, 2013). Or, cette pré-saturation influe sur l'évolution de la pression capillaire dans le béton frais (Bernier, 2006), sur les résistances et le retrait (Cortas et al., 2010), sur les caractéristiques du béton au jeune âge (ouvrabilité, ressuage) comme sur les caractéristiques du béton durci (Poon et al., 2004), (Tam et al., 2005).

Pour des bétons à base de gravillons recyclés, la pré-saturation des granulats recyclés et / ou l'ajout d'eau dans le malaxeur pour absorption des gravillons représentent des données primordiales pour les caractéristiques du béton à l'état frais (ouvrabilité du béton) comme à l'état durci (résistances mécaniques) (Poon et al., 2004) (Mefteh et al., 2013) (Silva et al., 2015). Les conclusions sont identiques pour des mortiers (Nguyen, 2013) (Zhao et al., 2015).

Tam et al. (2005) mettent en avant un protocole de malaxage différent, (figure 1-8), le two steps mixing approach (TSMA), avec intégration de l'eau totale en deux temps et par moitié de manière à favoriser les caractéristiques de la zone d'interface entre pâte hydratée et gravillons (usuellement nommée, interfacial transition zone « ITZ ») et par conséquent les caractéristiques mécaniques des bétons.



Figure 1- 8: TSMA two steps mixing approach (Tam et al., 2005) ; 4 mn 30 de malaxage au total

La méthode TSMA qui joue sur le mode de fabrication permet donc d'améliorer la résistance mécanique du béton en assurant une meilleure adhérence pâte/gravillons recyclés ce qui minimise les transferts d'eau gravillons/pâte et renforce l'ITZ (Tam et al., 2005). Les conclusions sont identiques pour des mortiers (Nguyen, 2013).

Cortas (2012) a étudié l'influence du degré de saturation de trois gravillons (siliceux compacts, calcaires tendres, légers) avec trois niveaux de saturation préalables à la fabrication. Les résultats obtenus mettent en évidence que la variation de la teneur en eau des gravillons peut avoir le même effet qu'une modification du rapport  $E_{eff}/C$ . La maîtrise de l'eau est particulièrement difficile pour des mortiers comprenant des granulats à fort pouvoir absorbant (Nguyen et al., 2014).

L'eau d'ajout ( $E_{eff}/C$  constant) et la cinétique d'absorption des gravillons impactent fortement le comportement du béton à l'état frais, que ce soit la rhéologie, le ressuage ou encore le retrait plastique.

Le procédé de saturation donc de fabrication des granulats modifiera les caractéristiques du béton plastique (Cortas, 2012). Dans les installations industrielles, la teneur en eau des gravillons doit être mesurée en continu sur le stock de manière à corriger à l'absorption nominale par l'eau d'ajout (Charonnat, 2012).

#### 2.4.2 L'ouvrabilité du béton frais

La formulation des bétons du projet national RECYBETON prévoit une rhéologie mesurée à l'affaissement au cône d'Abram (A) de l'ordre de 20 cm (Sedran, 2013). Pour de tels bétons,  $A > 10$  (De-Larrard François, 1999), la rhéologie suit une loi de Bingham, « modèle fluide à seuil » (Roussel and Coussot, 2006) (Torrenti, 2012) conforme à la figure 1-9.

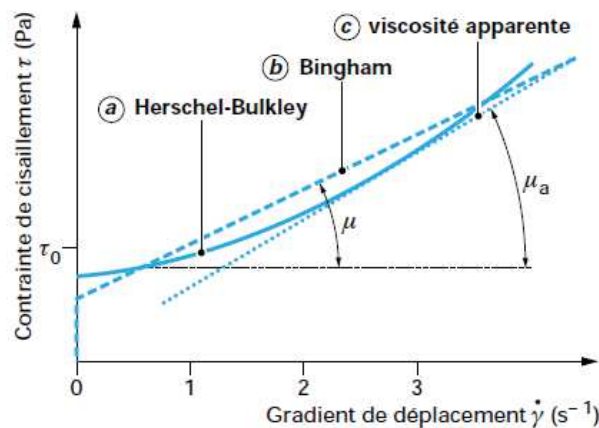


Figure 1- 9 : modèles rhéologiques dont le modèle de Bingham (b), (Bernier, 2004)

Les deux paramètres de cette loi, seuil de cisaillement  $\tau_0$  (Pa) et viscosité plastique  $\mu_a$  (Pa.s) se déterminent à l'aide de rhéomètre à béton (Torrenti, 2012). Toutefois parmi tous les essais existants décrits par Roussel et Coussot, 2006, on utilise principalement le cône d'Abrams qui est un essai simple dont l'affaissement mesuré (A) est directement relié au seuil de cisaillement, selon la formulation Eq(3) proposée par De Larrard François, 1999.

$$A = 300 - 0,347 \frac{\tau_0 - 212}{\rho} \quad \text{Eq (3)}$$

La valeur critique du seuil de cisaillement (ordonnée à l'origine sur la figure 1-9) peut être calculée comme l'équilibre au glissement d'un volume de béton frais sur un plan incliné. La viscosité plastique qui est la pente de la droite contrôle la maniabilité du béton frais, (De-Larrard François, 1999). Pour des bétons courants, le seuil  $\tau_0$  prend usuellement des valeurs de 800 à 1500 Pa et  $\mu_a$  des valeurs comprises entre 100 et 200 Pa.s (De-Larrard François, 1999). Pour des bétons dont A est compris entre 150 et 200 mm, Bernier (2004) propose une valeur de  $\tau_0$  de 900 à 1240 Pa tandis que  $\mu_a$  est inférieur à 200 Pa.s.

La valeur de  $\mu_a$  est donnée par l'équation (4) ci-dessous (Bernier, 2004). La première fraction de l'équation est relative à la pâte de ciment. La deuxième fraction est relative à l'empilement granulaire sable et graviers, (Bernier, 2004).

$$\mu_a = \frac{\mu_0}{\left(1 - \frac{\omega_c}{\alpha_c}\right)^{1,08}} \frac{1}{\left(1 - \frac{V_g}{V_g^*}\right)} \quad \text{Eq (4)}$$

pour un béton avec superplastifiant :  $\mu_0 = 36,2$  Pa.s, la compacité du ciment  $\alpha_c = 0.6311$ ,  $\omega_c = V_c / (V_c + V_e + V_a)$ ,  $V_g$  : volume de granulats par m<sup>3</sup> de béton,  $V_{g^*}$  volume de granulats par m<sup>3</sup> de granulats secs.

La norme (NF EN 206/CN) définit des classes de consistance en fonction de la valeur mesurée de l'affaissement A, (tableau 1-7). Les valeurs mesurées sont répétables à  $\pm 30$  mm (De-Larrard François, 1999).

Classe de consistance	Consistance	Affaissement au cône (mm)
S1	Ferme	$10 < A \leq 40$
S2	Plastique	$50 \leq A \leq 90$
S3	Très plastique	$100 \leq A \leq 150$
S4	Fluide	$160 \leq A \leq 210$

Tableau 1- 7 : classes de consistance selon NF-EN 206-1

L'ouvrabilité du béton va évoluer entre la sortie du malaxeur et la mise en œuvre dans les coffrages car le mélange qui est un matériau intermédiaire entre un fluide et un empilement humide (De-Larrard François, 1999), va flocculer. Sous cet effet, il va donc se raidir et le seuil de cisaillement va augmenter. La vibration utilisée à la mise en œuvre va casser les floccs formés (Torrenti, 2012) et ramener la valeur du seuil de cisaillement à sa valeur initiale.

Ce comportement thixotrope du béton (Torrenti, 2012), est influencé par la quantité de pâte (Festa and Dreux, 2007) qui pilote l'affaissement et la viscosité par effet de desserrement du squelette diminuant le frottement inter-granulaire (Bernier, 2004).

Par ailleurs, à quantité de pâte donnée, la notion de compacité optimale du squelette granulaire va coïncider avec un optimum de maniabilité (Bernier, 2004) (Festa and Dreux, 2007). Or la consolidation du béton est en général imparfaite et il en résulte la présence d'air occlus dans le mélange qui atteint en général des valeurs de 0,5 à 2,5 % (De-Larrard François, 1999) (Bernier, 2004).

Différents paramètres influent sur l'ouvrabilité et sa mesure au cône :

- les caractéristiques des granulats c'est-à-dire la continuité de la granulométrie, le diamètre nominal, la forme des gros granulats, la pétrographie et la nature des granulats (roulés ou concassés) provoquent un effet sur la compacité de l'empilement et la consistance du mélange (M.Aissoun, 2011) (Hafid, 2012). L'ouvrabilité est meilleure avec une granulométrie continue et des grains sphériques
- le rapport granulats/sable (G/S) influence également l'ouvrabilité du béton. A rapport E/C constant et adjuvantation constante, une augmentation du rapport G/S par rapport à l'optimum granulaire se traduit par une baisse de la fluidité et de la stabilité à la ségrégation (Yamine, 2007)
- enfin, le rapport (E/C) influe aussi sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Une augmentation du rapport E/C induira une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique (M.Aissoun, 2011). En termes de rhéologie, l'eau agit comme un lubrifiant entre les grains du squelette et la valeur du rapport E/C a un effet prépondérant sur la valeur du seuil de cisaillement initial (Hu, 2010). Pour un béton non adjuvanté, l'obtention d'une rhéologie satisfaisante nécessite un besoin en eau important et égal au double de la quantité strictement nécessaire à l'hydratation du ciment (Yamine, 2007).

En ce qui concerne l'étude de l'ouvrabilité de bétons recyclés au cours du temps, on peut faire référence aux travaux de (Mefteh et al., 2013) et de (Poon et al., 2004). Globalement, ces auteurs mettent en évidence, une diminution de l'affaissement au cône en fonction du temps due à l'absorption d'eau par les gravillons modifiant le rapport E/C et donc l'ouvrabilité du mélange. Ils précisent aussi que la cinétique d'absorption est très rapide durant les premières minutes de contact entre graviers recyclés et eau même en présence de pâte.

L'effet des granulats recyclés sur les propriétés au jeune âge du béton recyclé, ouvrabilité en particulier sera plus amplement développée au chapitre 4 relatif aux bétons recyclés.

### **2.4.3 Les déformations du béton**

Les déformations du béton sont observées en continu depuis la mise en œuvre du béton frais jusqu'au durcissement de la pâte à long terme (Garcia Boivin, 1999) (Barcelo, 2001). A l'état plastique, pendant les premières heures de vie du mélange, en phase dormante, le béton frais, subit les déformations qui peuvent causer la fissuration. Ces déformations volumiques, représentées sur la figure 1-10, se manifestent simultanément (Radocea, 1992) et les composantes verticales et horizontales sont nommées respectivement tassement et retrait (Kronlof et al., 1995) (Holt, 2001).

Blakey, Beresfort et Mattison (1958) avancent que le tassement du béton frais est la cause de cette fissuration. Klieger, Powers, Learch, Wittmann (1957) pensent que le retrait est la cause de la fissuration si le flux d'évaporation à la surface du béton est supérieur au débit ascendant d'eau de ressuage qui accompagne le tassement du squelette.

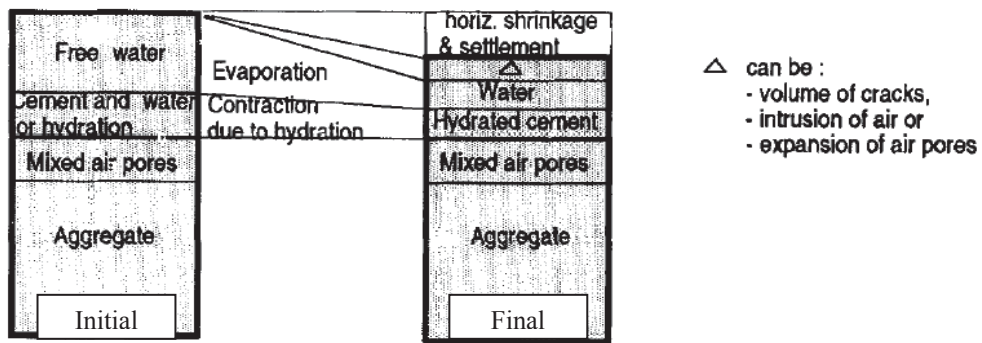


Figure 1- 10 : changements volumiques du béton au jeune âge (Kronlof et al., 1995)

**2.4.3.1 La consolidation et le ressuage**

Avant prise, le béton est le siège d’une consolidation du squelette granulaire et d’un ressuage ascendant de l’eau (Radocea, 1990) (Josserand, 2002). Le phénomène de ressuage diminue la qualité du béton en partie haute (Powers, 1968) ce qui conduit à minorer l’adhérence acier-béton en partie supérieure (Eurocode 2).

Plus rarement, sur chantier, on peut voir une fissuration précoce du béton due à un tassement différentiel excessif du béton frais au droit des armatures en acier (Acker et al., 2008). Un ressuage trop important peut aussi entraîner la ségrégation du béton (Torrenti, 2012).

Les facteurs aggravants sont multiples : élément de grande hauteur, durée de vibration importante, prise tardive, formulation inadaptée rendant la suspension instable mais une formulation correcte du béton permet de maîtriser ces phénomènes (De-Larrard François, 1999).

**2.4.3.2 Déformations de retrait dues à la dessiccation**

Les déformations de retrait sont dues à une consommation d’eau, soit interne par auto-dessiccation sous l’effet de la réaction d’hydratation du béton, soit externe par dessiccation du béton exposé aux conditions extérieures (Holt and Leivo, 2004) (Pons and Torrenti, 2008).

Dans le même temps, la figure 1-11 met en évidence deux périodes de manifestation du retrait, soit le jeune âge (< 24 heures), soit le long terme (> 24 heures).

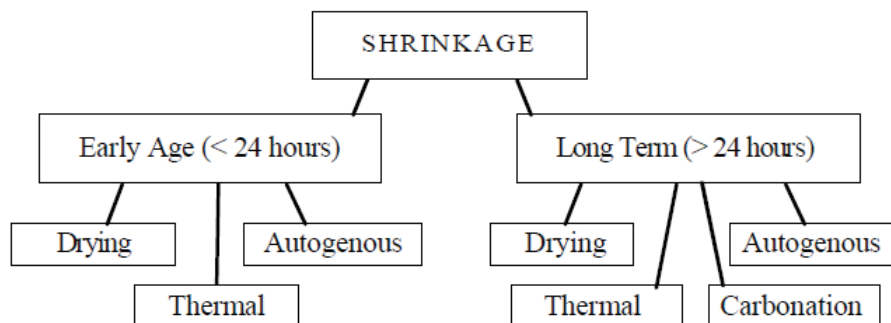


Figure 1- 11 : retraits du béton, types et périodes d’apparition, (Holt, 2001)

### 2.4.3.2.1 *Le retrait d'auto-dessiccation*

L'auto-dessiccation est la conséquence physique des mécanismes chimiques d'hydratation qui génèrent une consommation d'eau au fur et à mesure de la formation des hydrates qui se développent (Barcelo, 2001) (Bisschop, 2002) (Pertué, 2008) (Bouasker et al., 2008).

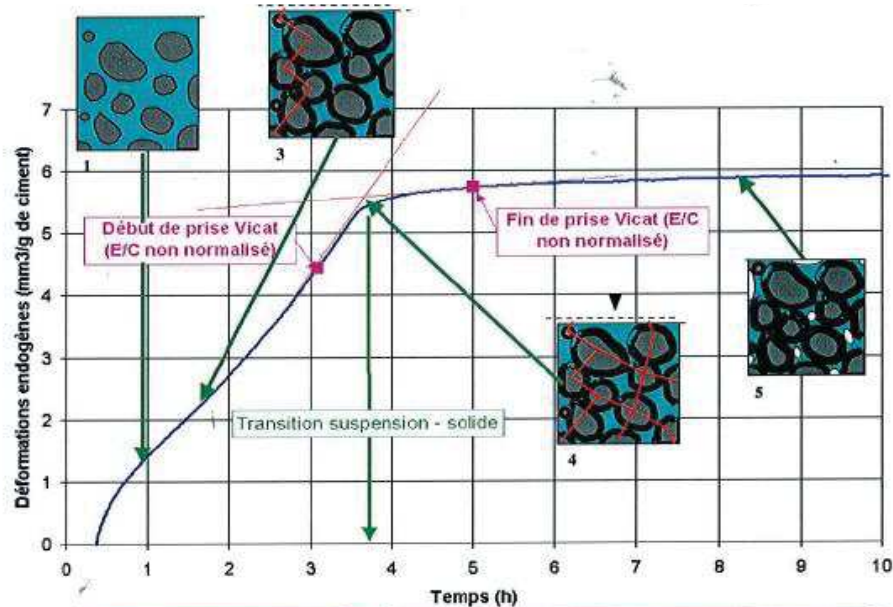


Figure 1- 12 : schématisation du retrait endogène (Barcelo, 2001)

Barcelo (2001), (Barcelo et al., 2011) décrivent en 5 phases, (figure 1-12), la transition entre le matériau liquide de départ puis solide après prise.

Phases 1 et 2 : les grains sont en suspension dans la solution liquide. L'hydratation débute et le matériau subit les variations de volume qui lui sont imposées. Le retrait endogène est égal au retrait chimique (Bresson, 2006), comme le montre la figure 1-13.

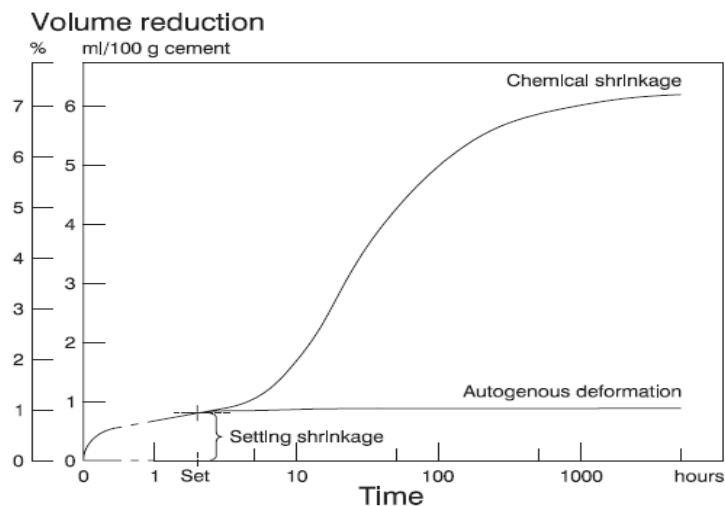


Figure 1- 13 : retrait chimique et retrait endogène (Bisschop, 2002) (Jensen and Hansen, 2001b)



Phase 3 : les hydrates se développent et un squelette solide apparaît. C'est le seuil de percolation qui représente le premier chemin solide continu traversant le matériau (Garcia Boivin, 1999) (Barcelo, 2001). La réaction d'hydratation continue de se développer et impose une contraction au matériau à laquelle le squelette nouvellement formé va commencer à s'opposer (Bresson, 2006). Il se forme donc de petits volumes gazeux constituant la porosité (Barcelo, 2001).

Phase 4 : le passage à la phase 4 correspond à un changement d'état de la pâte qui adopte un comportement solide. Le matériau a acquis un comportement de solide poreux et peut s'opposer aux déformations imposées. La rupture de pente de la courbe des déformations est brutale. C'est le point de démarrage du retrait d'auto-dessiccation (Barcelo, 2001).

Phase 5 : Le squelette s'oppose aux variations de volumes dues à l'hydratation et subit une compression (Monge, 2007). Un volume de gaz significatif apparaît au sein des capillaires, (Bresson, 2006) (Pertué, 2008) dans lesquels l'humidité interne diminue et la tension capillaire se développe (Pons and Torrenti, 2008). Les produits d'hydratation se développent lentement et remplissent les vides petit à petit en consommant l'eau disponible.

#### 2.4.3.2.2 *Retrait de dessiccation*

Au cours du durcissement, la cinétique du départ d'eau est lente et dépend des conditions d'ambiance extérieures (humidité relative, température), de vent et de la porosité connectée du béton (Monge, 2007) (Pons and Torrenti, 2008). A titre d'exemple, une éprouvette en béton de diamètre 16 cm mettra environ 10 ans pour être en équilibre avec l'atmosphère extérieure (Acker and Ulm, 2001) (Pons and Torrenti, 2008). Le retrait au cours de cette période est alors appelé retrait de dessiccation.

Les principales forces pilotant le retrait agissent par variation de la dépression capillaire selon les équations de Kelvin et de Laplace pour  $HR \in [70-80 ; 100 \%$ ], par variation de la pression de disjonction pour  $HR \in [40 ; 70-80\%]$  et par variation d'énergie superficielles du solide pour  $HR < 40 \%$  (Baroghel-Bouny, 1994).

Pour le béton frais, à l'état plastique et avant durcissement, le retrait se produit si le taux d'évaporation de l'eau par séchage à la surface du béton est supérieur à la quantité d'eau qui remonte dans le béton par ressuage (Radocea, 1992) (Acker et al., 2008) (Newlands et al., 2008). Sous l'effet du séchage, le départ d'eau induit des ménisques au sein de la porosité et donc une pression capillaire dans la phase liquide (Powers, 1968) (Wittmann, 1976) (Radocea, 1990). Cette tension de la phase liquide crée des forces internes entre les particules solides conduisant à une formation qu'on appelle retrait plastique (Acker et al., 2008) (Newlands et al., 2008).

Des valeurs non maîtrisées de retrait plastique peuvent conduire à la fissuration du béton comme représentée (figure 1-14), ce qui est préjudiciable à sa durabilité.



Figure 1- 14 : fissuration de la face supérieure d'un tablier de pont (Torrenti, 2012).

### 2.4.3.3 Retrait thermique

Le retrait thermique est un point sensible pour des structures massives où la chaleur d'hydratation va être importante (Acker and Ulm, 2001), si des conditions limites gênent les déformations et pour des structures subissant un traitement thermique ou un refroidissement rapide (Acker et al., 2008). C'est le développement d'un gradient de température ( $\Delta T / \Delta x$ ) entre l'intérieur de la structure plus chaude et la peau extérieure du béton plus froide qui génère des contraintes de traction pouvant induire une fissuration structurelle (Acker et al., 2008).

Toutefois cette logique qui est applicable pour des structures durcies doivent être revues lorsque le béton est à l'état frais au moment où il est un mélange liquide de constituants et où le coefficient de dilatation est beaucoup plus élevé que celui du matériau durci (Laplante et al 1994) (Loukili et al., 2000).

Sarkis et al. (2002) Laplante et al. (1994) Loukili et al. (200) ont déterminé des valeurs du coefficient de dilatation thermique de bétons ordinaires ou de mortiers à l'état plastique. Ils synthétisent par ailleurs les principaux résultats d'autres auteurs tels que B, Lofqvist, JJ, Beaudoin, C, Macinnis, C, Mamillan, V, Weigler, S, Karl ou encore M, Emborg.

Sarkis et al (2002) propose l'équation suivante pour le coefficient de dilatation du béton frais :

$$\alpha = (-2,49 \ln(t) + 21) \cdot 10^{-6} \text{ m. m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \quad \text{Eq (5)}$$

B, Lofqvist et M, Emborg cités et appuyés par (Sarkis et al., 2002) mettent en avant une variation dimensionnelle et un coefficient de dilatation différents à la montée ou à la descente en température représenté sur la figure 1-15(a) (Laplante et al 1994). On appellera coefficient thermique de dilatation, le coefficient à la montée en température et coefficient thermique de retrait, le coefficient à la descente en température.

Loukili et al. (2000) propose la courbe 1-15(b) pour le calcul du coefficient de dilatation (TDC) du mortier frais.

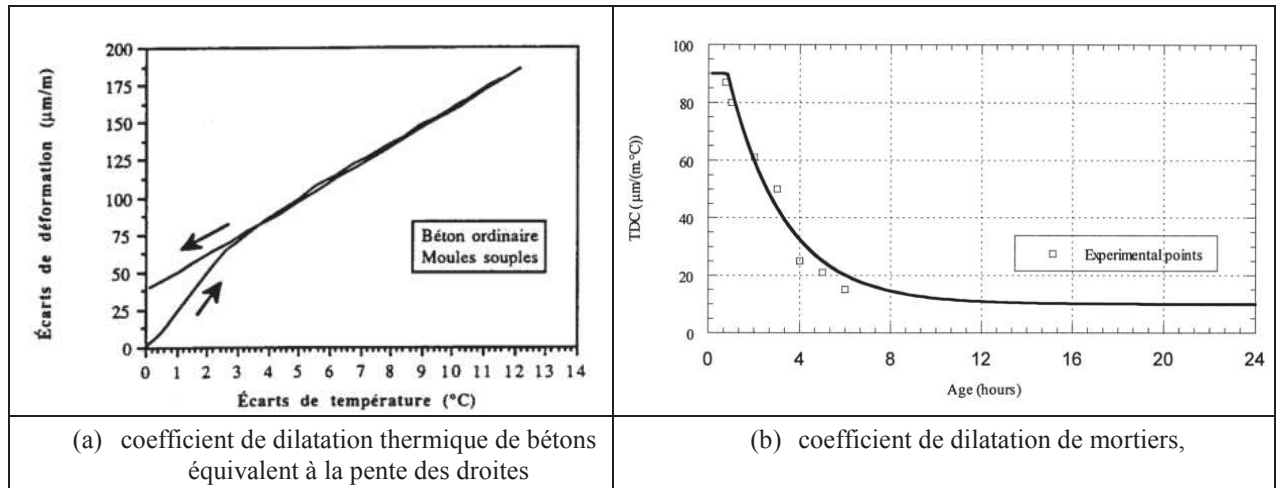


Figure 1- 15 : coefficients de dilatation de bétons (Laplante et al 1994) et mortiers (Loukili et al., 2000)

Le tableau 1-8 récapitule les valeurs proposées par les auteurs précédemment cités. Ces valeurs sont des valeurs déterminées en conditions endogènes, parfois adiabatiques, souvent au sein de coffrages souples et sans séchage.

Auteur	Valeur du coefficient de dilatation ( $\mu\text{m} / \text{m} / ^\circ\text{C}$ )	Commentaires
V, Weigler, S, Karl	20	Valeur du béton à l'état frais ; E/C = 0.55
C, Mamillan	30	Valeur sur béton à 30 mn
(Loukili et al., 2000)	90 35	Valeur sur mortier, conditions quasi adiabatiques durant la première heure Valeur à 4 h lue sur la courbe proposée
(Sarkis et al., 2002)	19	Valeur sur mortier lue à 3 h,
B, Lofqvist M, Emborg	12 7	Coefficient de dilatation Coefficient de retrait
(Laplante et al 1994)	44.5 25 (valeur lue sur la fig 1-15a) 13 (valeur lue sur la fig 1-15a)	Valeur calculée pour le mélange à l'état frais Coefficient de dilatation Coefficient de retrait Conditions endogènes, pas de séchage

Tableau 1- 8 : valeurs de coefficients de dilatation de mortiers ou béton à l'état plastique

#### 2.4.4 Bilan des déformations en jeu

Les différents types de déformations du béton au jeune âge, ont été chronologiquement listées et rapidement décrites. Pendant la période dormante, avant prise, à l'état plastique, les déformations majeures que les bétons à étudier vont subir sont les suivantes :

- la consolidation associée au ressuage
- le retrait plastique
- et le retrait thermique.

Le paragraphe 3 détaillera l'étude de ces déformations ainsi que le risque de fissuration induit.

### 3 ETUDE DES DEFORMATIONS DU BETON AU TRES JEUNE AGE, PHASE PLASTIQUE

Ce paragraphe a pour objectif la compréhension du matériau poreux, « béton à très jeune âge ». Premièrement, après une description de la phase liquide présente dans le béton, le paragraphe aborde les grandes lois qui vont régir le transport d'eau et l'effet du séchage. Deuxièmement, l'étude porte sur l'étude des déformations verticales et horizontales du béton frais. Elle se termine enfin par le parallèle qui est possible d'effectuer entre béton frais et certains sols fins cohérents.

#### 3.1 Le béton, matériau poreux

Représenté sur la figure 1-16, à l'état frais, le béton se compose d'un squelette solide (granulats, ciment, et fines) et d'une porosité occupée par l'eau et l'air entraîné. Ce matériau polyphasique (Kovler and Roussel, 2011) fait intervenir des grandeurs récapitulées dans le tableau 1-9.

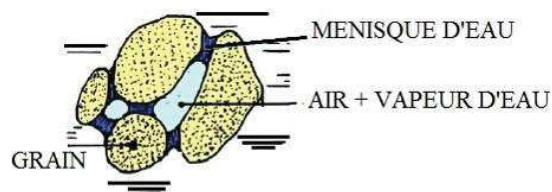


Figure 1- 16 : description schématique du béton à l'état frais

Dans la pâte fraîche, l'espace poreux est occupé par l'eau qui est assimilable à un ensemble de capillaires continus (Powers, 1968), puis au cours de l'hydratation, l'eau des capillaires devient discontinue puisque la part solide augmente (Powers et al., 1959). La structure poreuse de la pâte de ciment hydraté est ensuite constituée de pores d'hydrates et de pores capillaires qui jouent un rôle prépondérant dans les transferts d'espèces chimiques pour la durabilité des bétons (Ollivier and Torrenti, 2008).

V	volume apparent ; $V = V_s + V_v$	M	Masse totale $M = M_s + M_w + M_a$
$V_s$	volume de la matrice solide	$M_s$	Masse de la matrice solide
$V_v$	volume des vides : $V_v = V_w + V_a$	$M_w$	Masse d'eau
$V_w$	volume d'eau	$M_a$	Masse d'air (négligeable)
$V_a$	volume d'air		
$\gamma$	Masse volumique apparente : $\gamma = M / V$	W	Teneur en eau : $w = M_w / M_s$
$\gamma_s$	Masse volumique du squelette : $\gamma_s = M_s / V_s$	$S_r$	Dégré de saturation : $V_w / V_v$
$\gamma_w$	Masse volumique de l'eau : $\gamma_w = M_w / V_w$	N	Porosité : $n = V_v / V$
		e	indice des vides : $e = V_v / V_s$

Tableau 1- 9 : principales grandeurs relatives à un milieu poreux tel que le béton frais

Comme évoqué au chapitre 2.4.3.2, à l'état plastique, le béton est une suspension qui raidit, qui a sa propre rhéologie et qui peut être soumis à des déformations au très jeune âge telles que le ressuage et la consolidation ou bien le retrait de dessiccation fortement influencé par le séchage.

### 3.2 L'eau présente dans le béton frais

A l'état plastique, l'eau présente dans le béton est essentiellement sous deux formes, représentées sur la figure 1-17, l'eau adsorbée aux grains du squelette et l'eau libre qui occupe les espaces inter-granulaires.

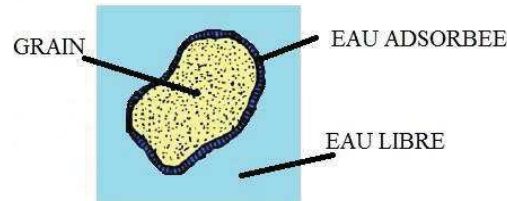


Figure 1- 17 : eau libre et absorbée dans le béton frais

En conditions de dessiccation et d'auto-dessiccation l'eau peut prendre 2 formes, liquide ou de vapeur d'eau qui avec l'air occupe l'espace poreux non occupé par l'eau liquide (Chemkhi, 2008) en fonction des régimes capillaires qui seront détaillés et classés au 3.2.1.1.

Pour le béton durci, le modèle de Powers (Powers and Bromnyard, 1946) permet de classer l'eau liquide présente en trois catégories, l'eau capillaire non consommée par la réaction d'hydratation qui remplit les pores inter-granulaires (Chemkhi, 2008), l'eau du gel liée et adsorbée physiquement aux parois des grains, l'eau chimiquement liée non évaporable qui fait partie intégrante des gels d'hydrates (Jensen and Hansen, 2001a).

#### 3.2.1.1 Courbes caractéristiques

Pour une température donnée, l'état hydrique d'un matériau peut être scindé en plusieurs domaines illustrés figure 1-18 (Salager, 2006) (Leonard, 2002) (Aregba et al., 1990).

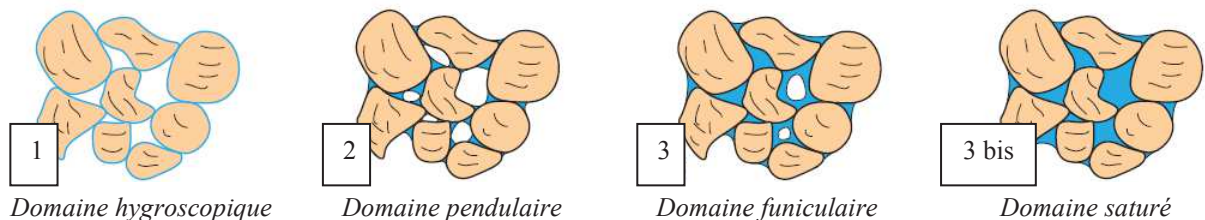


Figure 1- 18 : représentation schématisque des états hydriques d'un milieu poreux (Salager, 2006)

1. le domaine hygroscopique correspond à une phase liquide discontinue ou de l'eau est adsorbée autour des grains. La phase gazeuse est continue. Les échanges se font par changement de phase et diffusion
2. le domaine pendulaire voit toujours une phase liquide discontinue mais il existe aussi de l'eau libre (ou capillaire) qui forme des ponts liquides entre les grains. Les transferts se font par changement de phase et diffusion mais aussi par transport d'eau liquide
3. le domaine funiculaire correspond à une phase liquide continue et une phase gazeuse existant en bulles occluses (air occlus). Les transferts d'eau se font par transport d'eau liquide. Le cas 3-bis est un cas particulier, appelé « état saturé » où l'hygroscopicité est maximale et où l'eau occupe toute la porosité. La phase gazeuse a complètement disparue (Aregba et al., 1990).

La caractérisation de l'état hydrique d'un milieu poreux est représentée par des courbes caractéristiques que sont les isothermes de sorption-désorption dans le domaine hygroscopique et par des courbes de rétention d'eau dans les domaines funiculaires et pendulaires (Salager, 2006) (Leonard, 2002).

L'isotherme de sorption, tel que représentée sur la figure 1-19, donne la teneur en eau ( $w$ ) d'équilibre du solide en fonction de l'humidité relative de l'environnement. Chaque point est un état d'équilibre. La cinétique des transferts hydriques n'est pas mesurée.

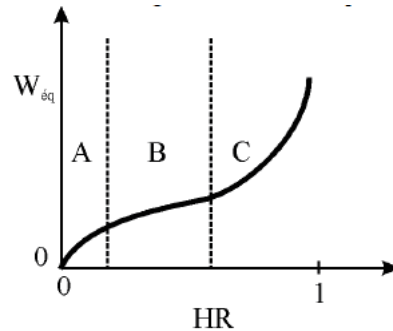


Figure 1- 19 : isotherme de l'eau (type II selon Brunauer et al. (1940) ; forme en S, (Leonard, 2002)

La courbe de rétention d'eau, telle que représentée sur la figure 1-20, exprime, pour une température donnée  $T$ , la teneur en eau ( $w$ ) en fonction de la dépression de succion ou pression capillaire de la phase liquide

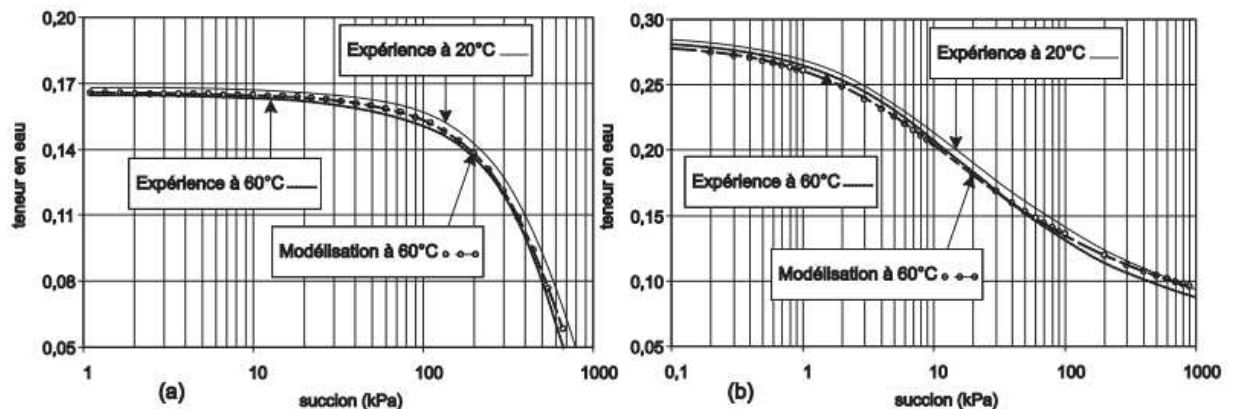


Figure 1- 20 : courbes de rétention d'eau (expérimental et modélisation) pour une céramique (a) et un sable limoneux argileux (b) (Salager, 2006)

Dans le cas de l'étude du béton à l'état plastique qui dure quelques heures, le matériau qui est initialement saturé va rester dans le domaine funiculaire (Mbemba, 2010) même sous l'effet du séchage dont la cinétique et le flux sont représentés sur la figure 1-26.

### 3.2.2 Les grandes lois relatives aux fluides dans l'espace poreux

#### 3.2.2.1 Le phénomène de capillarité, la loi de Jurin

Pour un tube dont le bas est immergé dans un liquide, la loi de Jurin, Eq(6), exprime la hauteur d'ascension ( $H_c$ ) en fonction du rayon du tube ( $r$ ), de l'angle de mouillage ( $\theta$ ), et de la tension superficielle ( $\sigma$ ) de l'eau au droit du ménisque qui s'est formé à l'interface air – eau (figure 1-22) (Barcelo, 2001).

$$H_c = \frac{2 \sigma \cos \theta}{\rho \cdot g r} \quad \text{Eq (6)}$$

g est l'accélération de la pesanteur, ρ est la densité de l'eau et θ est l'angle de raccordement de l'eau sur le matériau.

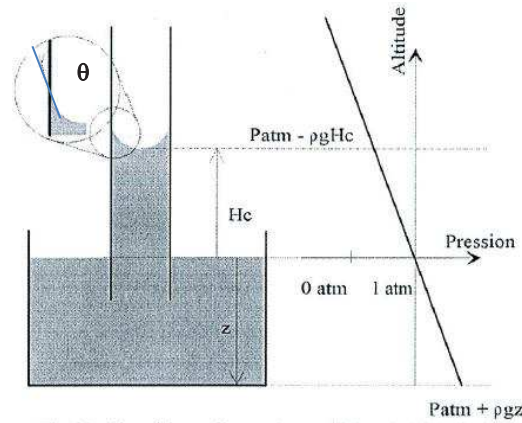


Figure 1- 21 : l'expérience d'ascension capillaire : loi de Jurin (Barcelo, 2001).

### 3.2.2.2 La pression capillaire, la loi de Laplace

Au sein du réseau poreux, entre les grains, il existe des pores, (figure 1-22), au sein desquels se développent des ménisques de formes différentes faisant interface entre les phases liquide et gazeuse (tableau 1-10).

La différence de pression entre deux milieux liquide/gaz crée un ménisque à l'interface des deux milieux. La pression dans le fluide non mouillant ( $P_g$ ) est supérieure à celle qui règne dans le fluide mouillant ( $P_l$ ). Cette différence de pressions, Eq(7) est appelée pression capillaire et notée  $P_c$  :

$$P_c = P_g - P_l \quad \text{Eq (7)}$$

La loi de Laplace, Eq(8), caractérise cette pression capillaire, égale et opposée au potentiel capillaire  $\Psi$ . Cette pression est une tension (Barcelo, 2001) (Dañan, 2012).

$$P_c = -\Psi = \frac{\sigma}{\frac{1}{R_c}} = \frac{\sigma}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad \text{Eq (8)}$$

La courbure  $1/R_c$  en un point d'une surface gauche est définie comme la somme algébrique des courbures des intersections de l'interface avec deux plans orthogonaux contenant la normale.  $1/R_c = 1/R_1 + 1/R_2$  (Dañan, 2012).  $R_1$  et  $R_2$  rayons de courbure principaux de la courbure gauche de rayon  $R_c$ , (figure 1-22).

Deux écritures particulières de l'équation de Laplace sont proposées dans le tableau 1-10 pour des ménisques sphériques et cylindriques.

ménisque sphérique	ménisque sphérique, pore cylindrique
rayon R courbure est 2/R	rayon $R = r / \cos(\theta)$ ; r rayon du pore
$P_c = P_g - P_l = -\Psi = 2 \sigma / R$	$P_c = P_g - P_l = -\Psi = 2 \sigma \cos(\theta) / r$

Tableau 1- 10 : différentes expressions de la tension capillaire pour 2 géométries de pores.

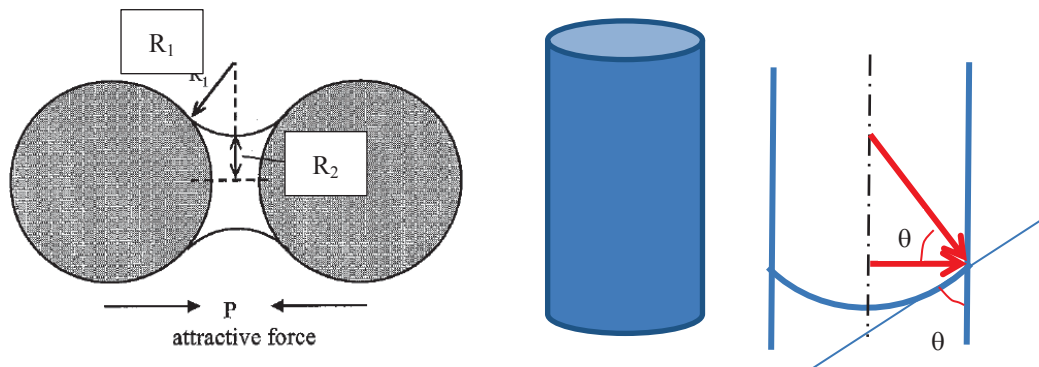


Figure 1- 22 : représentation d'un pore capillaire entre deux particules sphériques (Wittmann, 1976) ou bien au sein d'un pore cylindrique (effet de  $\theta$  et  $r$ )

L'angle de mouillage de l'eau sur des matériaux minéraux,  $\theta$ , a une valeur proche de zéro et  $\sigma$  est la tension interfaciale air-eau à 20 degrés et vaut 0,072 N/m (Slowik et al., 2008) (Ollivier and Torrenti, 2008).

### 3.2.2.3 Equilibre thermodynamique local. Loi de Kelvin

Pour la vapeur d'eau, on définit l'humidité relative HR comme le rapport entre la pression de vapeur ( $P_v$ ), et la pression de vapeur saturante ( $P_{vs}$ ). La loi de Kelvin, Eq(9) exprime l'égalité des potentiels thermodynamiques dans chacune des phases ce qui donne la relation entre la pression capillaire et l'humidité relative (Daïan, 2012).

$$P_c = -\Psi = \frac{\rho R T}{M} \ln (HR) = \frac{\rho R T}{M} \ln \left( \frac{P_v}{P_{vs}} \right) \quad \text{Eq (9)}$$

La figure 1-23 illustre, pour l'eau à 25 ° C, l'effet de la courbure de l'interface, caractérisée par le diamètre du pore cylindrique sur la pression capillaire (Daïan, 2012).

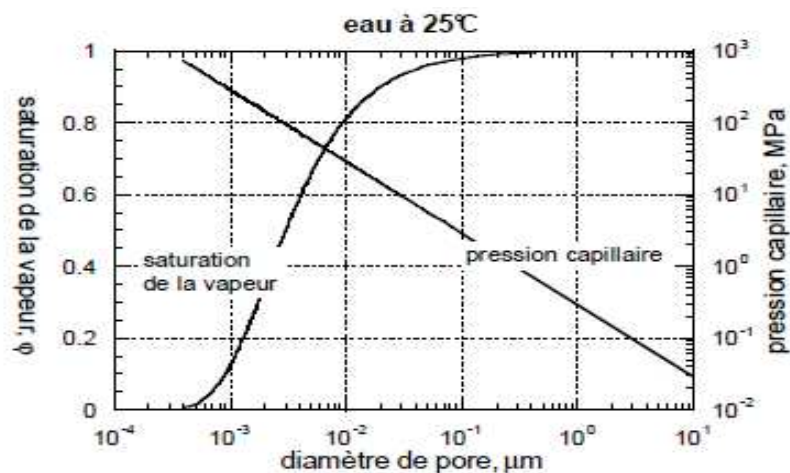


Figure 1- 23 : effet de la courbure d'interface  $R_c$  sur la pression capillaire (Loi de Laplace) et sur le taux de saturation de la vapeur (loi de Kelvin) (Daïan, 2012)

<sup>18</sup> R est la constante des gaz parfaits (8.314 J.mol<sup>-1</sup> .K<sup>-1</sup>),  $\rho$  est la masse volumique de l'eau (1000 Kg/m<sup>3</sup>) et M la masse molaire de l'eau (0.018 Kg.mol<sup>-1</sup>).



### 3.2.3 Le transport de l'eau dans les bétons

Pour les bétons, deux grandeurs physiques permettent de caractériser des mécanismes de transport :

- la perméabilité qui décrit un écoulement se produisant sous gradient de pression
- la diffusion qui traduit un transport à l'échelle moléculaire sous gradient de concentration (Ollivier and Torrenti, 2008).

#### 3.2.3.1 La perméabilité, loi de Darcy.

La filtration d'un liquide à travers un milieu poreux, caractérisé par sa perméabilité  $K$ , peut être expliqué comme l'écoulement d'un fluide visqueux incompressible au travers de la matrice solide et supposée indéformable du milieu poreux. La loi de Darcy caractérise cet écoulement (Daïan, 2012).

Macroscopiquement, cette loi permet notamment de mesurer et de modéliser le débit d'eau pouvant s'écouler à travers un sol ou un échantillon de matériau poreux, de section  $A$  et de longueur  $L$ .

Elle s'écrit sous sa forme globale :

$$\frac{Q}{A} = K i = K \frac{\Delta H}{L} \quad \text{Eq (10)}$$

avec :

- $Q$  : débit volumique ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) et  $A$  : surface de la section étudiée ( $\text{m}^2$ )
- $K$  : le coefficient de perméabilité du milieu poreux ( $\text{m.s}^{-1}$ ) ;  $i$  : gradient hydraulique
- $\Delta H$  : différence de hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon
- $L$  : longueur de l'échantillon dans le sens de l'écoulement.

Au niveau local, la formulation de la loi de Darcy prend la forme de la loi de Darcy généralisée, équation Eq(1), qui relie la vitesse relative du fluide avec les potentiels d'écoulement en prenant en compte les propriétés du fluide et celles de la structure poreuse (Daïan, 2012) :

$$\vec{u} = -\frac{k}{\mu} (\vec{\nabla} p - \rho \vec{g}) \quad \text{Eq (11)}$$

Où  $\vec{u}$  est le vecteur flux volumique de fluide ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $p$  est le gradient de pression (Pa),  $\rho$  est la masse volumique du fluide ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $\mu$  est la viscosité dynamique (Pa.s),  $\vec{g}$  est l'accélération de la pesanteur ( $\text{m.s}^{-2}$ ),  $k$  est la perméabilité intrinsèque ( $\text{m}^2$ ).

A l'état durci, les perméabilités des bétons étant très faibles, elles sont mesurées à l'aide de gaz. En France, l'essai de référence est l'essai au gaz AFREM-AFPC réalisé à l'aide du perméamètre Cembureau à charge constante, (Ollivier and Torrenti, 2008).

A l'état frais, la perméabilité est un paramètre clef pour comprendre le comportement hydro-mécanique des bétons car la consolidation et le ressuage dépendent fortement de la perméabilité du mélange (Josserand, 2002) et car l'homogénéité du matériaux est directement liée à la capacité de transport de l'eau au sein de la matrice solide poreuse (Picandet et al., 2011).

Les essais menés par mesure directe sur pâtes de ciment mettent en évidence un essorage de la pâte et la formation d'un « cake » de ciment en bas de la cellule de mesure (Amziane, 2005).

Les techniques de mesure de la perméabilité des bétons à l'état frais sont issues de la mécanique des sols. Elles utilisent deux modèles et deux appareillages distincts, soit un perméamètre à charge fixe, (figure 1-24) soit un oedomètre ou bien un appareillage hybride tel l'oedomètre-perméamètre mis au point par (Josserand et al., 2002) dans le cadre de l'étude du ressuage des bétons.

L'utilisation du perméamètre fait appel à la loi de Darcy pour mesurer  $K$ . L'emploi de la cellule oedométrique permet d'avoir une relation entre  $K$  et la compacité en se basant sur la théorie de la consolidation (El Houssain et al., 2007) (Josserand, 2002) (Picandet et al., 2011) (Amziane, 2005).

Les conditions de l'essai présentées figure 1-24 pour des pâtes de ciment sont jugées correctes pour des charges hydrauliques de 0,1 à 0,3 bars (Amziane, 2005), à partir de 30 mn environ (fin de la consolidation) et pour un volume d'eau collecté maximum de 350 cm<sup>3</sup> (El Houssain et al., 2007).

Les résultats obtenus sur des pâtes de ciment montrent que la perméabilité  $K$  augmente avec  $E/C$  (El Houssain et al., 2007), et que la détermination de  $K$  était peu sensible à la variation du gradient (Picandet et al., 2011). Il a également été constaté que l'hydratation ne modifiait pas notablement la perméabilité du matériau durant les premières heures où le béton est plastique (Picandet et al., 2011). Il est aussi montré que les perméabilités de mortiers augmentent quand la compacité du mélange diminue (Josserand et al., 2002).

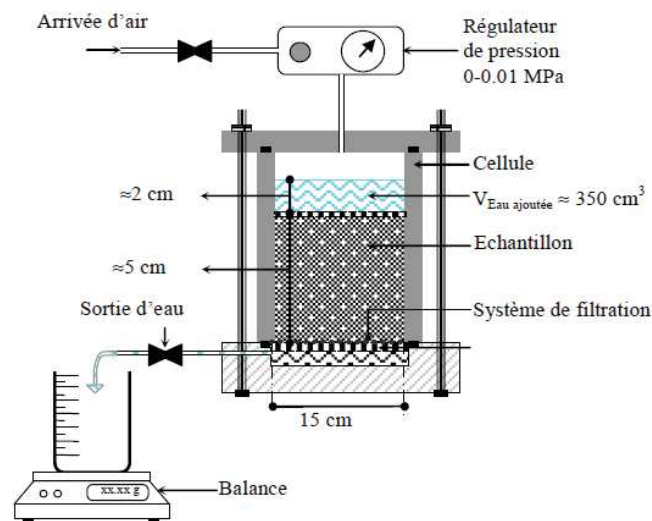


Figure 1- 24 : principe de l'essai de mesure de perméabilité par perméamètre à charge fixe, (El Houssain et al., 2007)

Josserand (2002) et Picandet et al. (2011) ont également modélisé les courbes de perméabilité en fonction de l'indice des vides ( $e$ ) selon les modèles de perméabilités d'empilements granulaires de Kozeny Carman ou de Taylor dont les paramètres  $C$  et  $C_k$  doivent être évalués empiriquement.

Pour des pâtes de ciment dont E/C varie de 0,3 à 0,4, les valeurs de K mesurées en début d'essai vont de  $1$  à  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s pour se stabiliser dans le temps à des valeurs comprises entre  $0,4$  à  $2 \cdot 10^{-7}$  m/s, (El Houssain et al., 2007). Pour des pâtes de ciment, Picandet et al. (2011) obtiennent des valeurs de perméabilités de l'ordre de  $3,8 \cdot 10^{-8}$  à  $1,7 \cdot 10^{-7}$ .

Des valeurs de l'ordre de  $1$  à  $5 \cdot 10^{-7}$  sont obtenues pour des pâtes de ciment de rapport E/C variant de 0,3 à 0,5 par Amziane, (2005). Josserand (2002) obtient des valeurs de perméabilité de l'ordre de  $10 \cdot 10^{-8}$  à  $40 \cdot 10^{-8}$  m/s pour les mortiers, bétons et coulis comme représenté sur la figure 1-25. Pour des mortiers, Josserand (2002) obtient des perméabilités de l'ordre de  $1$  à  $20 \cdot 10^{-8}$  en fonction de la formulation testée.

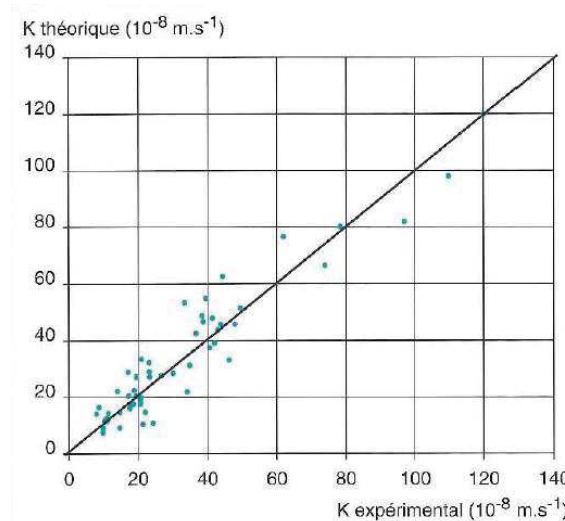


Figure 1- 25 : perméabilité théoriques et expérimentales de mortiers et bétons, 53 formulations (Josserand et al., 2002)

### 3.2.3.2 Diffusion dans les bétons. Lois de Fick.

La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet d'un gradient de concentration entre deux points du milieu. Ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré depuis la zone de plus forte concentration vers la zone de plus faible concentration jusqu'à l'équilibre des concentrations. Les transports par diffusion peuvent concerner les phases liquides comme gazeuses (Ollivier and Torrenti, 2008).

Première loi de Fick : le flux du constituant dans la direction  $x$  ( $J_{e,x}$ ) est fonction du gradient de concentration ( $\partial c / \partial x$ ) via un coefficient de diffusion effectif  $D_e$  ( $m^2/s$ ) :

$$J_{e,x} = -D_e \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{Eq (12)}$$

Deuxième loi de Fick : La continuité et la conservation du flux entre deux abscisses  $x$  et  $x + dx$ , permet d'écrire :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{Eq (13)}$$

où  $D_a$  est le coefficient de diffusion apparent du matériau, (Ollivier and Torrenti, 2008).

### 3.3 Le séchage du béton

Le béton à l'état frais est riche en eau contrairement à l'air extérieur qui est environ à 50 % d'humidité relative ambiante à l'intérieur des bâtiments. Ce gradient induit un transfert d'eau de l'intérieur du matériau vers la surface où il est arraché par le fluide séchant (Belhamri and Remache, 2008) (Ollivier and Torrenti, 2008). Le séchage consiste donc à voir l'eau du matériau se vaporiser pour diffuser vers un environnement où l'hygrométrie est plus basse (Baroghel-Bouny, 1994).

Le mode de séchage le plus représentatif est le séchage convectif où l'air cède sa chaleur au produit et reçoit l'humidité extraite de celui-ci sous forme gazeuse (Leonard, 2002), (Belhamri and Remache, 2008). Ce changement de phase entraîne un transfert 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.

Le séchage du béton dépend de son réseau poreux. Pour des tailles de pores micrométriques, à l'état frais du béton, l'écoulement des fluides dans le milieu poreux peut être décrit par la loi de Darcy généralisée<sup>19</sup> (Baroghel-Bouny, 1994) (Chemkhi, 2008). A partir d'un certain stade de séchage, le gradient de concentration en vapeur d'eau génère une diffusion qui obéit à la loi de Fick<sup>20</sup>, plus adaptée au béton durci (Chemkhi, 2008).

#### 3.3.1 Séchage des matériaux cimentaires

Selon la valeur d'HR, le séchage du béton va faire appel à différents mécanismes physiques pour les transferts d'eau au sein de l'éprouvette (Baroghel-Bouny, 1994).

Aux hautes humidités relatives (états funiculaire ou saturé) : le séchage ne rompt pas la continuité de la phase liquide contenue dans les pores capillaires qui sont remplis d'eau liquide. Sous l'effet d'une différence de pression, un écoulement capillaire régi par la loi de Darcy, tend à entraîner l'eau de l'intérieur vers l'extérieur de l'échantillon. Cet écoulement s'accompagne d'un mécanisme de retrait par variation de la dépression capillaire qui est basé sur les équations de Kelvin et de Laplace.

Aux humidités relatives inférieures (états pendulaire et hygroscopique) : Si HR décroît, la continuité de la phase liquide n'est plus assurée, seuls les pores de faible diamètre possèdent encore de l'eau à l'état liquide. L'eau est présente sous forme liquide et gazeuse au sein du réseau poreux, et est soumise à des processus d'évaporation puis de transport diffusif de l'eau vers l'extérieur. Si HR est faible, seule l'eau adsorbée à la surface des pores et la vapeur d'eau est encore présente et peut faire l'objet de transport diffusif.

#### 3.3.2 Cinétique du séchage

Les cinétiques de séchage présentent généralement une allure qui peut être décomposée en quatre périodes, conformément à la figure 1-26. Au fur et à mesure du séchage des ménisques d'eau, (figure 1-27), vont d'abord se créer en surface puis pénétrer au sein du réseau poreux (Scherer, 1990). Ils vont influencer sur la cinétique du séchage suivant la périodicité suivante : (Laurindo and Prat, 1995) (Goyeneche, 2001).

<sup>19</sup> Dans le cas de matériaux à faible perméabilité, les effets gravitaires peuvent être négligés.

<sup>20</sup> Dans le cas de matériaux poreux possédant des pores très fins, de diamètre faible devant le libre parcours moyen des molécules de vapeur d'eau, cette diffusion devient du type Knudsen (la diffusivité décroît avec le rayon des pores selon du type  $D_v = D_{vo} / (1 + \lambda / 2 r_p)$ ). (Baroghel-Bouny, 1994).

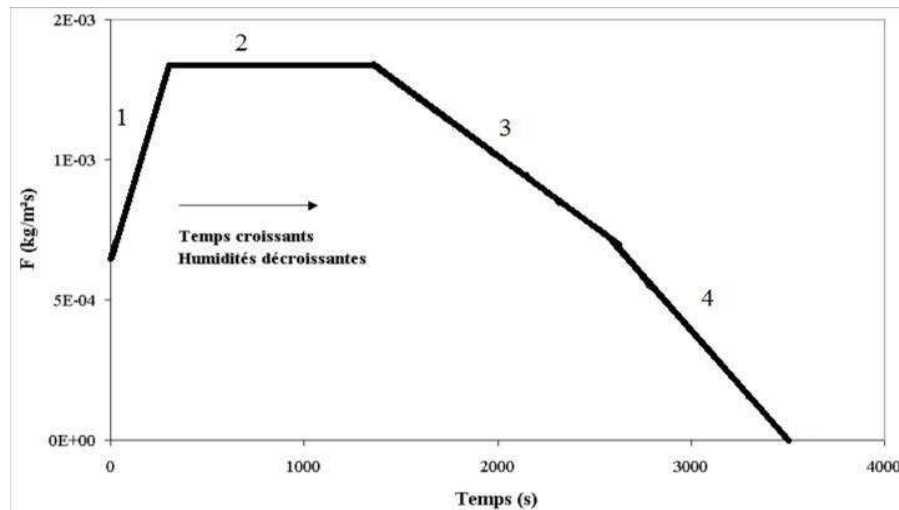


Figure 1-26 : courbe idéalisée de flux de séchage de boues de station d'épuration d'après (Leonard, 2002)

1. période initiale : mise en température du produit (Belhamri and Remache, 2008)
2. période où l'eau libre s'évapore à flux constant. Le transport de l'eau libre dans le matériau permet à la surface soumise à évaporation de rester saturée. Le retrait volumique du matériau est égale à l'eau évaporée. L'évaporation est proche de celle d'un plan d'eau (Scherer, 1990) (Leonard, 2002)
3. première période de ralentissement : en surface le matériau se désature et les ménisques pénètrent à l'intérieur du milieu poreux. Le taux d'évaporation diminue. Le séchage depuis la surface continue mais une part de l'évaporation s'effectue depuis les pores en état pendulaire par transport diffusif de vapeur (Scherer, 1990) (Leonard, 2002)
4. deuxième période de ralentissement : Le front de séchage pénètre dans le matériau qui devient hygroscopique. Le taux d'évaporation diminue. Le transport est une diffusion gazeuse (Scherer, 1990) (Leonard, 2002) (Chemkhi, 2008).

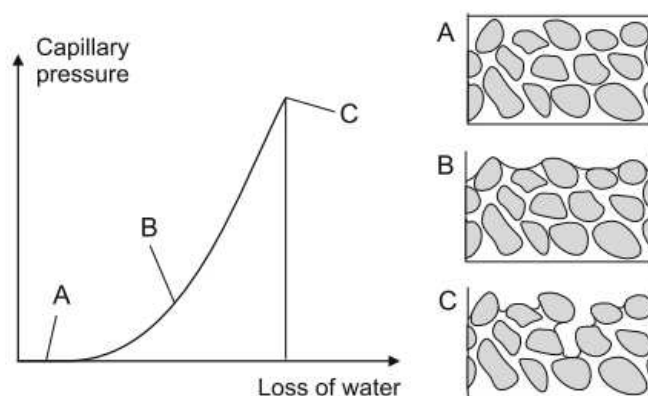


Figure 1-27 : effets capillaires sur du béton frais soumis à la dessiccation formation de ménisques, périodes 1 à 3 ci-dessus (Slowik et al., 2009)

### 3.4 Les déformations verticales : consolidation et ressuage

#### 3.4.1 Définition et conséquences

Au très jeune âge, le béton frais a la consistance d'une pâte fraîche composée de particules en suspension (grains de ciment, sable et gravier) dans une solution aqueuse (figure 1-28.a). Sous l'effet de la gravité, les particules solides sont soumises à un tassement alors que le fluide subit un flux ascendant et remonte vers la surface (figure 1-28.b). Il en résulte une fine pellicule d'eau qui couvre toute la surface du béton, c'est le ressuage (figure 1-28.c) (Powers, 1968) (Radocea, 1990) (Acker et al., 2008) (Josserand, 2002).

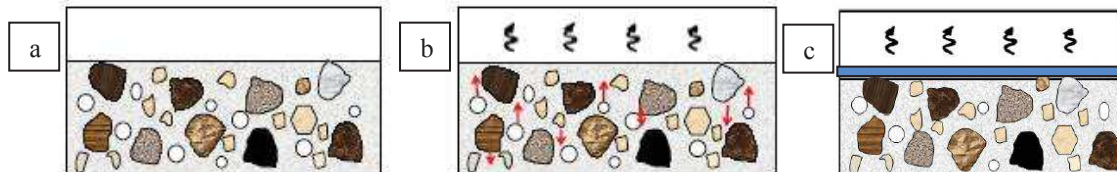


Figure 1- 28 : (a) état initial – (b) tassement et ressuage – (c) eau ressuée (Mbemba, 2010)

Le principal intérêt du ressuage est qu'il assure une cure à l'eau de la pièce de béton ce qui permet d'éviter toute dessiccation précoce (Holt, 2001) (Josserand, 2002).

#### 3.4.2 Mécanismes en jeu

Le retrait volumique se traduit verticalement par une composante linéique appelée « tassement plastique ou consolidation<sup>21</sup> (Holt, 2001).

La consolidation des particules solides vers le bas, et le ressuage du liquide vers le haut, sont couplés. La forte concentration des particules solides implique des interactions intergranulaires qui perturbent la sédimentation des grains et interdit une sédimentation libre selon les lois de Stokes (Radocea, 1991). Le ressuage de l'eau sera lié à la perméabilité du matériau qui est décrite par la relation de Kozeny-Carman (Josserand et al., 2006). Selon (Powers, 1968), la perméabilité et le ratio de ressuage varient dans le même sens.

Toorman (1996) propose un modèle physique de consolidation/ressuage basé sur les équations de conservation de masse de la phase solide et d'équilibre des forces des particules en suspension. La percolation de l'eau est décrite par la loi de Darcy (Josserand, 2002) (Mbemba et al., 2013). Le débit d'eau ainsi chassée vers le haut va être en compétition avec le flux d'évaporation à la surface du béton (Powers, 1968) (Josserand, 2002).

#### 3.4.3 Mesures de la consolidation et du ressuage

De la mesure du ressuage, on obtiendra deux paramètres caractéristiques qui évoluent de façon identique au rapport E/C (Mbemba et al., 2013) :

- la vitesse initiale de ressuage (bleeding rate) notée  $V_{IR}^{22}$  qui est fonction du débit d'eau ressuée dont la plupart des auteurs montrent qu'il est constant au début puis décroît lentement jusqu'à s'annuler (Powers, 1968) (Josserand, 2002)

<sup>21</sup> Consolidation et ressuage : tassement du squelette granulaire du béton + apparition d'une pellicule d'eau à la surface du béton. (Acker et al., 2008), à ne pas confondre avec la ségrégation, phénomène au cours duquel les grains ont un mouvement relatif entre eux (Neville, 2000).

<sup>22</sup> Le « bleeding rate » est le volume d'eau ressuée donné en cm<sup>3</sup> par unité de surface supérieure (cm<sup>2</sup>) et par seconde.

- l'amplitude du ressuage  $\Delta H_\infty$  (bleeding capacity<sup>23</sup>) estimée pour un temps infini et exprimée en pourcentage de la hauteur initiale (Josserand, 2002).

La caractérisation expérimentale du ressuage pose un problème car les résultats obtenus sont largement fonction des méthodes de mesure qui sont basées soit sur la quantification de l'eau ressuée soit sur la mesure de la consolidation des grains (Powers, 1968) (Josserand, 2002).

Radocea (1990) critique ces méthodes qui font appel à des constantes empiriques et qui ne tiennent pas compte de l'évolution du gradient hydraulique durant le processus de consolidation. Radocea (1991) propose donc d'étudier et de mesurer le ressuage au travers de la mesure de la pression capillaire qui évolue et se dissipe au fil du temps et de l'évolution du processus de consolidation-ressuage.

Cette étude du ressuage au travers de l'étude des pressions capillaires est reprise par (Mbemba et al., 2013) qui s'appuie sur les cinétiques de séchage proposées par (Scherer, 1990) :

1. sortie du malaxeur : le béton est en équilibre thermodynamique et hydrique avec le milieu, l'évaporation affecte d'abord la pellicule d'eau ressuée en surface du béton.
2. période de séchage à flux constant : des ménisques existent à la surface du matériau, la pression capillaire se développe et favorise la consolidation du squelette solide. L'eau est transportée vers la surface (loi de Darcy) pour y être évaporée (séchage convectif).

Au fur et à mesure que le phénomène progresse, le rayon des ménisques décroît et la pression dans le liquide augmente (loi de Laplace) ce qui favorise la consolidation. Progressivement, le squelette solide devient de plus en plus raide et la courbe de consolidation décroît jusqu'à s'arrêter.

La figure 1-29 montre la corrélation entre l'évolution du tassement de consolidation et la pression capillaire au sein du matériau poreux.

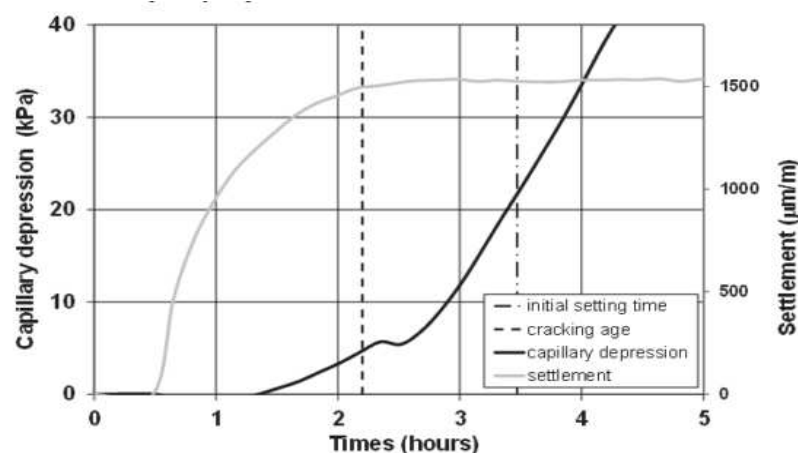


Figure 1- 29 : consolidation, pression capillaire, fissuration béton avec  $E/C = 0,45$  (Mbemba et al., 2013)

<sup>23</sup> Le « bleeding capacity » est un volume total d'eau ressuée qui est parfois exprimé en % du volume total initial du béton

### 3.5 Les déformations horizontales : retrait plastique

#### 3.5.1 Définition et conséquences

Le séchage du béton frais, avant prise, conduit à la contraction volumique du matériau ou retrait volumique (Baroghel-Bouny, 1994) (Acker et al., 2008). Ce retrait du béton à l'état de suspension plastique peut refléter une simple proportionnalité entre la masse d'eau évaporée et la réduction du volume du matériau. Si le retrait volumique est en plus accompagné d'une distorsion du squelette solide, il y a alors déformation de retrait (Aregba et al., 1990).

Le retrait volumique induit par le séchage se traduit horizontalement par une composante linéique qu'on appelle le « retrait plastique » (Holt, 2001) (Turcry, 2004) et qui rend compte de la déformation totale du béton (Wittmann, 1976) (Turcry et al 2006).

La réaction d'hydratation du ciment conduit la suspension « béton plastique » à devenir peu à peu un solide poreux. Ces transformations impactent les propriétés du béton au très jeune âge et donc le ressuage et le retrait plastique (Newlands et al., 2008) (Stefan, 2009) (Kovler et al 2011). Toutefois, le degré d'hydratation reste très faible durant les premières deux ou trois heures (Wittmann, 1976) (Radocea, 1990) donc le retrait dû au séchage reste prépondérant, (Turcry and Loukili, 2006) (Cortas, 2012).

En termes de contraintes dans le matériau, en début de séchage la teneur en eau en surface est inférieure à la teneur en eau au cœur du matériau. Le matériau en surface se contracte et se retrouve sous contraintes de traction qui peut conduire à une fissuration (Chemkhi, 2008).

La phase plastique s'achève quand le matériaux acquiert un comportement de solide poreux et peut s'opposer aux déformations imposées (Cortas, 2012) (Barcelo, 2001).

#### 3.5.2 Mécanismes en jeu

Le retrait plastique est la résultante d'un transfert de masse depuis la surface du béton vers l'environnement extérieur par évaporation (séchage convectif) et d'un transport d'eau depuis l'intérieur de la pièce vers la surface (ressuage). Il se produit dès que la surface de la pièce n'est plus recouverte d'eau (Acker et al., 2008) c'est-à-dire lorsque le taux d'évaporation induit par le séchage en surface devient supérieur au débit d'eau de ressuage du béton (Wittmann, 1976).

Il en résulte un gradient du taux d'humidité relative, entre l'intérieur du béton ( $\approx 100\%$ ) et la surface du béton en équilibre avec le milieu extérieur ( $\approx 50\%$ ). L'application des équations de Kelvin – Laplace à ce gradient d'humidité permet d'obtenir le gradient de dépression capillaire au sein du réseau de ménisques près de la surface (Radocea, 1992). Cette pression capillaire négative a tendance à mettre le matériau en traction (Mbemba, 2010) (Holt et al 2004).



La connexion entre le retrait plastique et la pression capillaire ( $p_c$ ) a été illustrée expérimentalement par (Wittmann, 1976) et (Radocea, 1992). Les résultats obtenus mettent en évidence différentes périodes (figure 1-30) :

- A-B : période d'évaporation de l'eau ressuée
- B : la surface devient sèche.  $t_{\text{apparition}} = f(\text{débit de ressuage} / \text{flux d'évaporation})$
- B-C : formation de ménisques en surface,  $p_c$  augmente lentement dans le mélange
- C-D : après quelques heures, Le retrait plastique suit l'évolution de  $p_c$  qui atteint son maximum (pression d'entrée d'air au droit du capteur)
- D : le pic de pression est atteint, le système devient instable,  $p_c$  chute brutalement, l'eau est redistribuée au sein des pores du matériau poreux. Wittmann a identifié cette pression comme correspondant à une occupation partielle des pores par l'eau et l'air.

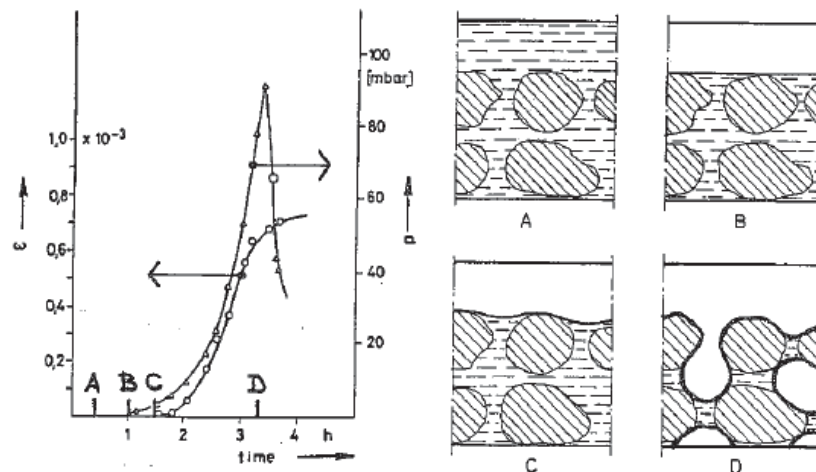


Figure 1- 30 : évolution de la pression interstitielle et du retrait plastique d'un béton frais en fonction du temps (Wittmann, 1976) (Radocea, 1990).

Les résultats de Wittmann sont acceptés par tous en ce qui concerne les mécanismes en jeu. En revanche, la corrélation entre pression capillaire et retrait plastique sont discutés par certains auteurs de même que l'existence même du pic de pression capillaire (Cabrera et al., 1992) (Newlands et al., 2008).

Pour ces auteurs, le développement des pressions capillaires et du retrait plastique se font alternativement, sans chute brutale et finale des pressions. Pour (Radocea, 1994), cette approche est trop simpliste pour prendre en compte un modèle complet relatif au retrait plastique.

D'autres auteurs tels que Radocea, 1992, Kronlof et al., 1995, Holt et al., 2004, Turcry et al., 2006 et Mbemba, 2010 ont réalisés des essais expérimentaux qui mesurent en parallèle les courbes de tassement, de retrait plastique, d'évaporation et de pression capillaire comme le montre la figure 1-31.

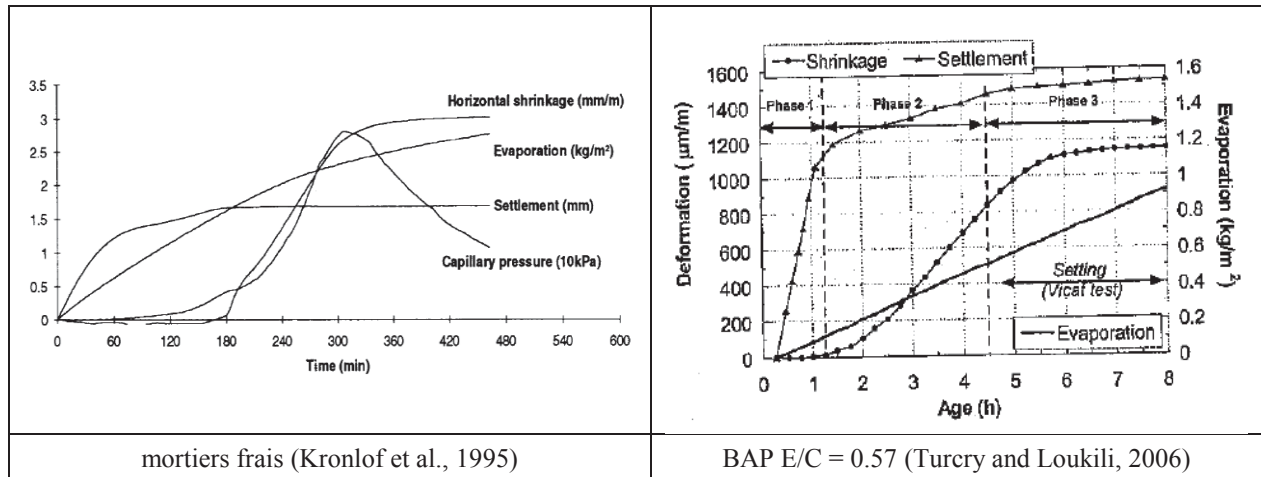


Figure 1- 31 : mesures du tassement, du retrait plastique, de l'évaporation et de la pression capillaire

Ces courbes mettent en lumière trois périodes :

- phase 1, (de l'ordre d'une heure) : le tassement est important, il résulte essentiellement de la consolidation. La densification du mélange qui apparaît s'accompagne du ressuage de l'eau vers le haut. Durant cette période aucun retrait significatif n'est observé
- phase 2, (jusqu'à la prise initiale) : la contraction volumique se transforme lentement en retrait horizontal. Les pressions capillaires se développent de même que le retrait plastique. Durant cette phase, l'échantillon est sous l'effet de la dessiccation due à l'évaporation et à l'hydratation
- phase 3, (à partir de la prise initiale) : du fait de la prise, et de l'augmentation de la raideur du système poreux, la déformation volumique diminue de même que le retrait plastique.

Le taux d'évaporation est constant sur la durée des deux premières phases. L'étude des pressions capillaires est développée dans le paragraphe à suivre.

### 3.5.3 Mesures du retrait plastique

Les études expérimentales du retrait plastique font appel à une mesure linéaire des déplacements dans la direction horizontale d'un échantillon de béton placé dans un moule prismatique. Ces mesures sont généralement accompagnées des mesures de tassement, de l'évolution de la pression capillaire et du suivi du temps de prise (Turcry, 2004) (Radocea, 1992) (Slowik et al., 2008).

Le chapitre 2 développera les moyens de mesure du retrait plastique libre et gêné.

### 3.5.4 Du retrait plastique à la fissuration

A l'état plastique, le béton n'a pas les caractéristiques mécaniques suffisantes pour s'opposer aux déformations et contraintes qui lui sont imposées par le fluide. Il a une capacité de déformation qui est la déformation maximale qu'il peut supporter en traction (Turcry, 2004) (Radocea, 1992).

La fissuration à l'état frais est atteinte lorsque le retrait empêché dépasse la capacité de déformation comme représenté sur la figure 1-32. Byfors et Kasai, cités par (Mbemba, 2010) et (Holt et al 2004) ont montré que le béton présente les plus faibles allongements admissibles quelques heures après la mise en place.

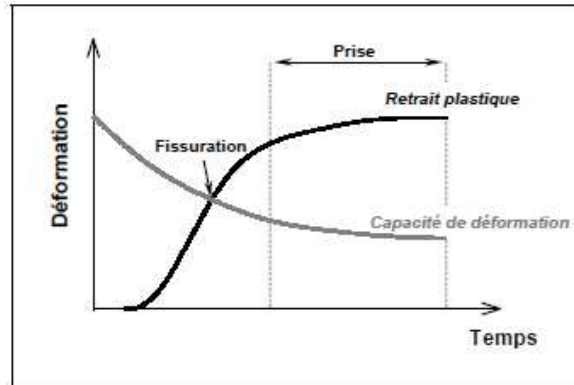


Figure 1- 32 : schématisation de la fissuration du béton plastique en termes de retrait et de capacités de déformations, (Turcry, 2004)

Toutefois, ce raisonnement est généralement applicable entre 6 et 10 h (Zeitschrift et al., 1968) (Roziere et al., 2015) quand le béton a commencé à se rigidifier.

Roziere et al, (2015) montre Figure 1-33 que dans la phase plastique pour un béton âgé de 2 à 3 h, les capacités de déformation sont très grandes alors que le module du matériaux est de l'ordre de 2 à 10 kPa, ce qui se traduit par une contrainte admissible proche de zéro.

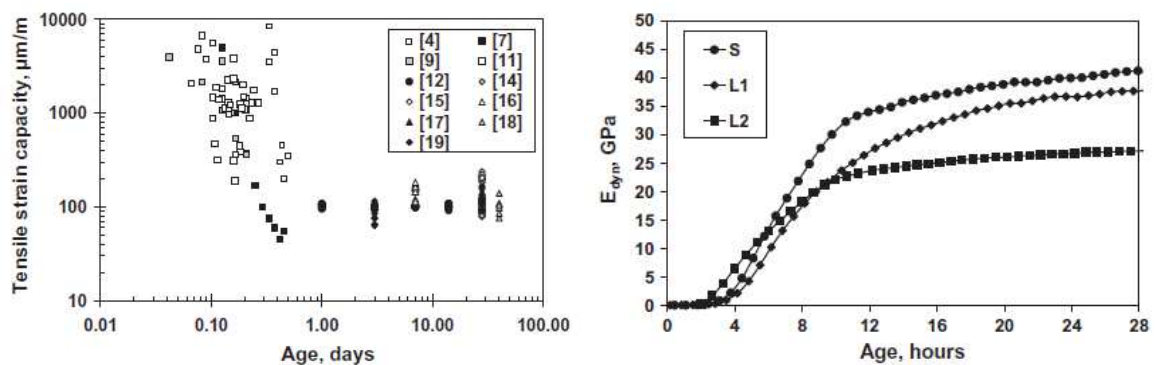


Figure 1- 33 : Capacités de déformations de différents bétons issus de la bibliographie (à gauche) Mesures du module dynamique du béton au jeune âge (à droite) (Roziere et al., 2015)

Par conséquent, à très jeune âge, le critère limitant est la contrainte admissible très faible du matériau. Toutefois, ce raisonnement qui est applicable aux matériaux durcis est-il légitime pour le béton à l'état plastique avant prise qui relève plus d'une suspension (Hammer, 2007) ?

Ainsi, pour d'autres auteurs, l'apparition de la fissuration en surface est liée à l'entrée d'air dans le système poreux du matériau (Wittmann, 1976) (Slowik et al., 2008) (Slowik et al., 2009) (Mbemba, 2010).

Lorsque la pression capillaire maximale mesurée au capteur est atteinte, les ménisques n'occupent plus tout l'espace entre les particules solides ; le système devient instable et l'air pénètre alors au sein du matériau poreux au droit des plus gros pores qui ne sont plus saturés et qui deviennent des points faibles du système (Wittmann, 1976).

La pression capillaire continue d'augmenter dans le fluide et le retrait plastique atteint son maximum. Les forces de contraction sont bien plus faibles dans la zone où l'air est présent par rapport aux zones adjacentes où le fluide est présent. Il s'ensuit une concentration locale des déformations d'allongement et donc une fissuration (Slowik et al., 2008) (Slowik et al., 2009) observable sur la figure 1-34.

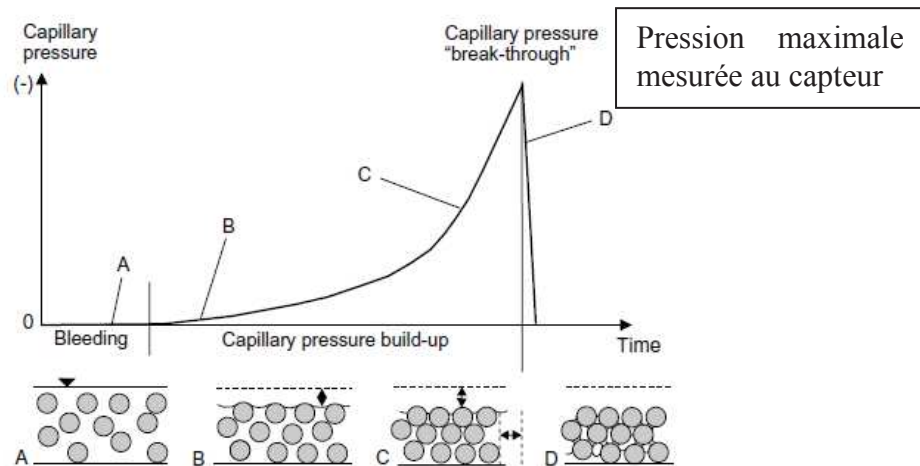


Figure 1- 34 : Illustration du développement des pressions capillaires, (Slowik et al., 2008).

Slowik et al. (2008) démontrent par mesures de conductivités et de résistances électriques que le moment où l'air pénètre dans le réseau poreux des pâtes de ciment ou des bétons peut ne pas coïncider exactement avec la pression capillaire maximale mesurable au capteur.

Il est aussi possible de corréler le retrait plastique et la fissuration qui en résulte avec l'étude des gradients de pressions capillaires entre la surface soumise à dessiccation et le cœur du matériau poreux. La fissuration est obtenue lorsque le gradient de pressions est maximal (Mbemba et al., 2013).

En effet, lorsque le tassement de consolidation atteint son palier, l'équation proposée par (Scherer, 1990) met en relation ( $\sigma_x$ ) la contrainte dans la matrice solide du matériaux poreux et ( $p_c - \bar{p}_c$ ) le gradient de pression capillaire entre la surface et le cœur du matériau poreux, (Mbemba et al., 2013).

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} (p_c - \bar{p}_c) - \varphi p_c \quad \text{Eq (14)}$$

$\nu$  est le coefficient de poisson,  $p_c$  (Pa) la pression capillaire mesurée à la surface du milieu poreux ;  $\bar{p}_c$  (Pa) la pression capillaire moyenne dans le fluide et  $\varphi$  la fraction volumique du fluide.

Mbemba et al (2013) ont mesuré la pression capillaire à plusieurs hauteurs au sein du milieu poreux et démontrent expérimentalement l'existence d'un gradient de pressions, illustré figure 1-35. Ces résultats sont par ailleurs cohérents avec l'application du modèle développé par (Scherer, 1990).

Sous l'effet d'un fort taux d'évaporation, la pression capillaire en surface est forte, comme le gradient de pressions. Les contraintes de traction qui en résultent dans le matériau mènent à la fissuration.

Mbemba et al (2013) montrent également que pour des bétons à faibles E/C (0,35 et 0,45), la faible perméabilité favorise des gradients de pression importants qui favorisent la fissuration par retrait plastique.

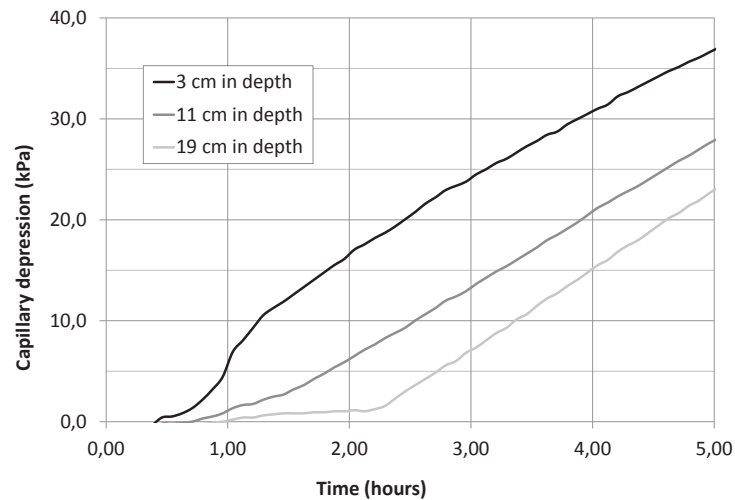


Figure 1- 35 : gradient de pressions capillaires pour un échantillon soumis au vent (5 m/s) et pour  $E/C = 0,4$ , ciment CEM I 52,5 à  $350 \text{ kg/m}^3$  (Mbemba et al., 2013).

Scherer (1990) met en parallèle les deux approches ci-dessus :

- Macroscopiquement la prise en compte du gradient de pression capillaire conduit à des déformations différentielles sur la hauteur de l'échantillon qui ont tendance à mettre en tension la partie la plus proche de la surface d'échanges hydriques et qui conduit à sa fissuration ;
- Microscopiquement, l'apparition de ménisques au sein des plus gros pores du matériau conduit à une tension différentielle au niveau local dans le matériau. Il s'ensuit une fissuration comme illustré sur la figure 1-36.

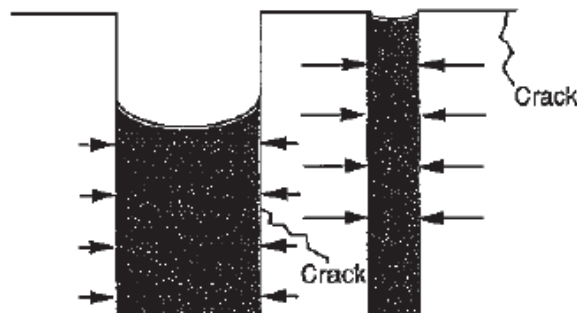


Figure 1- 36 : Fissuration locale du fait du développement différentiel de la pression capillaire au sein de pores de diamètres différents (Scherer, 1990)

### 3.5.5 Facteurs influençant le retrait plastique et la fissuration

Les nombreux facteurs qui influencent la fissuration de retrait plastique et l'évolution de la pression capillaire sont listés par (Uno, 1998) (Bernier, 2006) (Mbemba, 2010) (Cortas, 2012).

### 3.5.5.1 Conditions climatiques et taux d'évaporation

Le retrait plastique dépend des conditions climatiques (température, vent, degré d'hygrométrie relative) qui modifient la vitesse de dessiccation au niveau des surfaces, essentiellement non coffrées, de l'ouvrage (ACI 308R01, 2001) (Newlands et al., 2008) (Acker et al., 2008).

L'ACI Manual of Concrete Practice propose un abaque, (figure 1-37), basé sur des données thermodynamiques empiriques (Uno, 1998). Il permet d'estimer le taux d'évaporation surfacique de l'eau en surface du béton en fonction de la température de l'air, de l'humidité relative de l'air, de la vitesse du vent et de la température du béton en surface. Au-delà de 1 Kg/ m<sup>2</sup>/h, la cure est indispensable. En deçà, elle reste quand même conseillée, (ACI305R-91, 1999).

Le vent qui influe fortement sur le taux d'évaporation est un paramètre majeur pour le développement de la pression capillaire et du retrait plastique (Wittmann, 1976) (Radocea, 1994) (ACI305R-91, 1999) (Holt et al 2004) (Mbemba et al., 2013).

Plus la vitesse du vent est grande, plus le séchage convectif est fort, et plus le flux d'évaporation de l'eau en surface augmente. En conséquence, la pression capillaire se développent plus vite et plus fort de même que le retrait plastique (Wittmann, 1976) (Uno, 1998) (Holt et al 2004) (Mbemba, 2010).

Quel que soit le rapport E/C, Turcry et al., 2006 et Mbemba et al., 2013 ajoutent que l'effet du vent accentue l'amplitude et le taux de variation des pressions capillaires comme du retrait plastique. Le séchage plus fort dû au vent contribue également à un développement anticipé de la pression capillaire comme du retrait plastique du béton au très jeune âge (Turcry et al 2006)

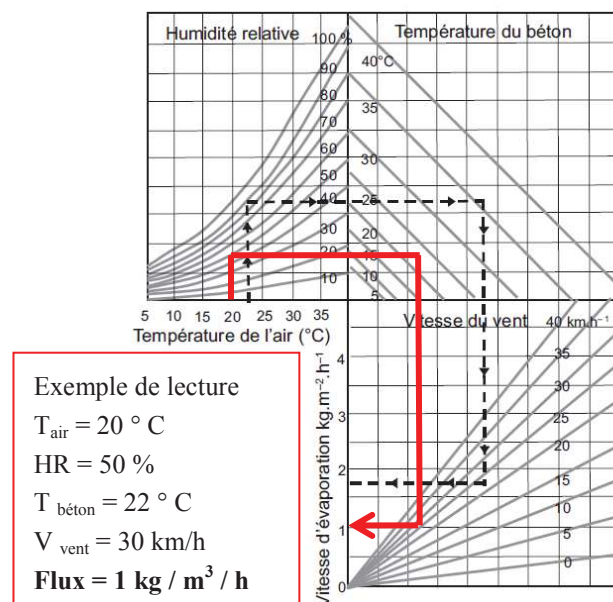


Figure 1- 37 : abaque permettant d'estimer la perte en eau du béton jeune sans protection à partir de données climatiques ambiantes (ACI305R-91, 1999)

### 3.5.5.2 Rapport E/C du mélange

Le rapport E/C, influe sur la consolidation, le développement de la pression capillaire et le retrait plastique des bétons (Bernier, 2006) (Mbemba, 2010) (Cortas, 2012) (Mbemba et al., 2013).

Pour (Uno, 1998) et (Mbemba et al., 2013), le développement de la pression capillaire augmentera inversement au rapport E/C. Powers, (1968) a développé une équation donnant la pression capillaire en fonction du rapport E/C :

$$P = 1,0 \cdot 10^{-3} \frac{\gamma S}{w/c} \quad \text{Eq (15)}$$

où  $\gamma$  : masse spécifique du ciment ; S : tension de surface de l'eau.

L'application de cette formule permet de constater que pour S et  $\gamma$  constants, plus E/C est faible, plus P augmente (Newlands et al., 2008).

Pour (Wittmann, 1976) (Newlands et al., 2008) (Mbemba, 2010) le rapport E/C influe sur le retrait plastique. Pour des rapports E/C faibles, les particules sont faiblement espacées car il y a peu d'eau et, malgré les fortes pressions capillaires développées, le retrait plastique reste faible. Pour des rapports E/C forts, le retrait plastique est faible car la pression capillaire qui apparaît est faible. Il existe donc une plage de E/C autour de 0,55, (Wittmann, 1976) qui conduirait à un retrait plastique maximal.

Mbemba, 2010 confirme que des conditions sévères de séchage, présence de vent et absence de cure, ont un fort impact sur les bétons à rapport E/C élevé, (figure 1-38).

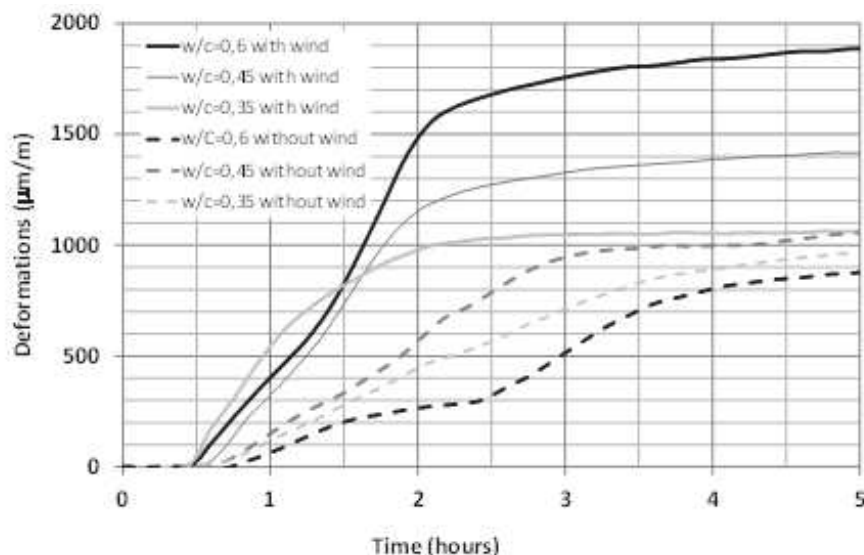


Figure 1- 38 : développement des déformations longitudinales de retrait plastique pour trois bétons de rapport E/C différents avec et sans vent,. (Mbemba et al., 2013).

### 3.5.5.3 Etat de saturation des granulats

L'effet de la saturation initiale de granulats à fort pouvoir absorbant a été démontré pour les granulats légers par exemple. De tels granulats conditionnent le besoin en eau des bétons à faible E/C et à fort retrait endogène (BHP en particulier). Le béton est dépendant de la teneur en eau initiale de ces granulats à fort pouvoir absorbant (Kohno et al., 1999) (Cusson et al 2006) (Castro et al., 2011) (De-la-Varga et al., 2012) (Cortas et al., 2014).

Les gravillons recyclés se caractérisent également par une absorption d'eau plus grande que pour les gravillons naturels. Il est démontré que la teneur en eau initiale des gravillons recyclés, (état sec à état SSS) avant introduction dans le malaxeur allait impacter les caractéristiques du béton à l'état frais (affaissement), durci (résistances) et les caractéristiques microstructurales (zone interfaciale) (Poon et al., 2004) (Tam et al., 2005) (Mefteh et al., 2013).

Les gravillons introduits à l'état sec dans le béton représentent une source de consommation d'eau supplémentaire qui conduit à un retrait par séchage interne dû à leur absorption d'eau. Ce retrait s'additionne au retrait de dessiccation et au retrait endogène (Golias et al., 2012).

Les études relatives à l'influence de la teneur en eau des granulats sur le retrait plastique sont rares. Cortas et al (2010) a étudié l'effet de granulats calcaires ou légers sur le retrait plastique et sur le développement de la pression capillaire. Il conclue que la saturation initiale des granulats influe autant qu'une variation du rapport  $E_{eff} / C$  de la pâte. Des conclusions similaires sont obtenues pour des mortiers comportant des sables recyclés (Nguyen, 2013) (Zhao et al., 2015).

En effet, la quantité d'eau présente au sein des gravillons, leur cinétique d'absorption et les transferts hydriques pâte-gravillons vont impacter l'eau mobilisable pour la pâte et l'eau de ressuage. Ce bilan de l'eau dans le béton frais aura des répercussions sur le développement des pressions capillaires et sur la valeur maximale atteinte par le retrait plastique comme vu auparavant.

Par exemple, pour des granulats calcaires un retrait maximal est observé lorsque les gravillons calcaires sont introduits dans le malaxeur à 50 % de pré-saturation initiale alors que pour des gravillons schisteux le retrait est maximal si les granulats sont introduits à 100 % de pré-saturation initiale. Des conclusions semblables peuvent être proposées pour les courbes de pression capillaire (Cortas, 2012).

#### **3.5.5.4 Finesse du ciment**

La finesse du ciment est un paramètre qui influe sur la sensibilité du béton vis-à-vis du retrait plastique. Plus le ciment est fin, plus le béton est réactif et plus il sera sensible au retrait plastique (Slowik et al., 2008).

### **3.6 Le béton au très jeune âge, milieu granulaire humide**

Ce paragraphe dresse un bilan de modèles utilisés pour les sols fins et transposables au béton à l'état plastique.

Le béton frais est un matériau vieillissant, c'est-à-dire que des effets physico-chimiques comme les réactions chimiques dans le mélange, l'évolution de la compacité de l'empilement granulaire sous l'effet des phénomènes de consolidation-ressuage et la thixotropie, conduisent à une rigidification du squelette granulaire (Josserand, 2002).

Des parallèles entre le béton et les sols ont été utilisés par différents auteurs tels que (Slowik et al., 2008) (Mbemba, 2010) (Acker et al., 2008) pour qui les phénomènes en jeu dans l'étude du retrait plastique du béton conduisant à la fissuration sont similaires à ceux observés au sein des sols fins cohésifs. Slowik et al (2008) précisent que la notion de pression d'entrée d'air dans le béton frais est à considérer comme pour les sols fins cohérents.



Dans les sols, les contraintes augmentent sous l'effet du développement de la pression capillaire. La fissuration apparaît lorsque les contraintes atteignent la contrainte admissible de traction du matériau (Peron et al., 2009). La fissuration résulte donc soit de conditions limites bloquantes soit d'un gradient de teneur en eau qui apparaît lorsque que le matériau commence à se désaturer (Peron et al., 2009). Une valeur particulière de la pression capillaire, appelée pression d'entrée d'air correspond à un défaut local dans le matériau (Scherer, 1990) (Slowik et al., 2008) (Devillers et al 2009) et correspond à un période à risque pour la fissuration.

Pour des matériaux incompressibles, (figure 1-37), la détermination de la pression d'entrée d'air passe par la linéarisation par morceaux de la courbe donnant la teneur en eau (ou le degré de saturation) en fonction de la pression capillaire (Fredlund et al 1994). Cette pression capillaire est liée à la taille des pores et à la teneur en eau initiale du matériau (Devillers et al 2009). Pour des sols compressibles, il faut également prendre en compte la courbe de retrait du sol donnant l'indice des vides  $e$  en fonction de la teneur en eau (Fredlund et al. 1994).

Slowick, 2008 détermine la pression d'entrée d'air dans des matériaux cimentaires en mesurant la conductivité électrique du matériau et son évolution. L'entrée d'air correspond à une chute brutale des valeurs mesurées. De leur côté, Mehlhorn et al., 2009 ont étudié un modèle numérique afin de déterminer la taille des pores d'un sol modèle à grains sphériques.

Enfin, pour des sols cohérents, Fredlund et al. (1994) ont proposé un modèle empirique et ont mis en évidence l'importance de la taille des pores dans la détermination de la pression d'entrée d'air. Ce modèle permet de déterminer la pression d'entrée d'air en exploitant la courbe caractéristique de désorption du sol, courbe en coordonnées semi-logarithmique. La pression d'entrée correspond à l'intersection des deux premières droites qui linéarisent chacune une partie de la courbe caractéristique, figure 1-39.

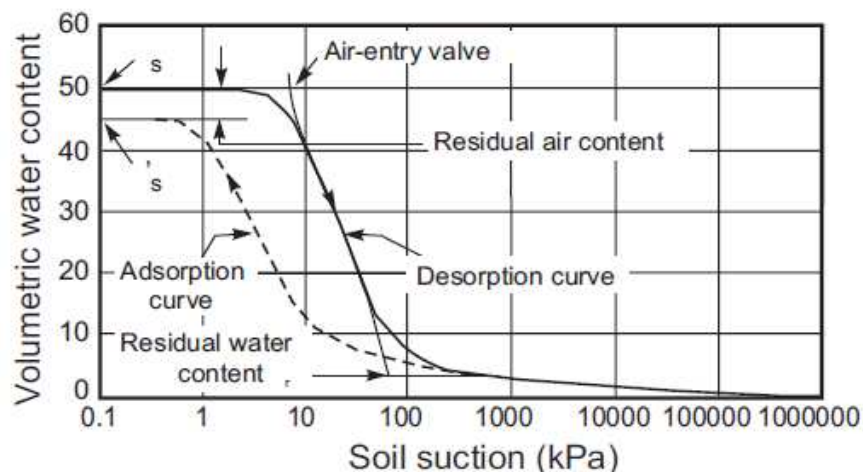


Figure 1- 39 : courbe caractéristique sol-eau d'un sol silteux (Fredlund et al 1994).

## 4 LES BETONS A BASE DE GRANULATS RECYCLES

Les bétons recyclés ont pour particularité l'intégration de granulats issus de la démolition d'ouvrages en béton et du recyclage des matériaux qui en sont issus en tant que granulats à béton. Cette spécificité conduit à décrire le référentiel normatif spécifique des granulats et des bétons recyclés puis à passer en revue l'impact des gravillons recyclés sur les caractéristiques des bétons produits à l'état durci et à l'état frais. Enfin, le chapitre se termine en abordant l'effet de cure interne des gravillons recyclés.

### 4.1 Le référentiel normatif des bétons recyclés

Le référentiel normatif des bétons en France et en Europe est donné par la norme (NF EN 206/CN) qui limite l'usage des recyclés aux gravillons et à un taux maximum de substitution de 30 % (Alaejos et al., 2004). De nombreuses autres normes en Europe, en Asie ou aux Etats Unis fixent un taux maximum de substitution de 20 à 35 % pour des bétons dont les caractéristiques mécaniques à obtenir restent modestes 25-40 MPa en compression à 28 jours (Pepe, 2014).

La norme fournit un tableau à double entrée « classes d'exposition » et « type de gravillons » qui précise les pourcentages massiques de substitutions par des gravillons recyclés (tableau 1-11).

Type de granulats recyclés	Classes d'exposition			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XD1, XS1	Autres classes d'exposition
Gravillons de type 1	60 %	30 %	20 %	0 %
Gravillons de type 2	40 %	15 %	0 %	0 %
Gravillons de type 3	30 %	5 %	0 %	0 %
Sable	30 %	0 %	0 %	0 %

Tableau 1- 11 : taux de substitution par des granulats recyclés, (NF EN 206/CN), tableau NA.5 § 5.1.3

La norme précise également que les gravillons recyclés de type 2 et 3 ainsi que les sables recyclés ne peuvent être utilisés pour des bétons de résistance supérieure à C25/30.

Le tableau 1-11 établit que pour des bétons de structures, dans des conditions d'agressivité favorables (XC1, XC2), un taux de substitution maximum de gravillons de 30 % est admis.

### 4.2 Propriétés des bétons recyclés durcis

D'une manière générale, de nombreux auteurs ont démontré que l'insertion de granulats recyclés, en jouant sur le taux de substitution de 0 à 100 % ou bien sur la qualité des recyclés, va modifier les propriétés des bétons recyclés à l'état frais et à l'état durci. En effet, les performances du béton recyclé dépendent de la qualité et de la quantité de pâte ancienne (Belin et al., 2013), (Butler et al., 2014) ; les modifications portent sur les caractéristiques du béton obtenu à l'état frais (affaissement), à l'état durci (masses volumiques, résistance mécanique) ou encore les caractéristiques microstructurales (Yang et al., 2008) (Domingo et al., 2009) (Chakradhara Rao et al., 2010) (Brito et al 2010) (Malešev et al., 2010) (Kou et al., 2011).

### 4.2.1 Microstructure, zones interfaciales des bétons recyclés

Pour un béton ordinaire, la zone d'interface entre pâte hydratée et gravillon est un point particulier du béton car cette interface doit assurer un transfert correct des contraintes de la pâte au gravillon (Otsuki et al., 2003). Cette interphase (ITZ) de quelques microns est dû à une effet paroi du grain et est le lieu de plusieurs phénomènes locaux de transport d'eau et d'hydrates (Nguyen, 2013).

Pour un béton recyclé, la présence de gravillons poreux avec de fortes capacités d'absorption, génère des capacités d'échange d'eau gravillons-pâte plus importante ce qui influe sur les conditions de formation de l'ITZ (Nguyen et al., 2014).

D'autre part, la présence d'ancienne pâte dans les gravillons recyclés, cause la présence de deux interphases, la première qui est à l'interface entre les granulats d'origine et le mortier « parent » et la deuxième qui est l'interface entre le mortier d'origine du gravillon recyclé et la nouvelle pâte, (figure 1-40) (Otsuki et al., 2003) (Ryu, 2002).

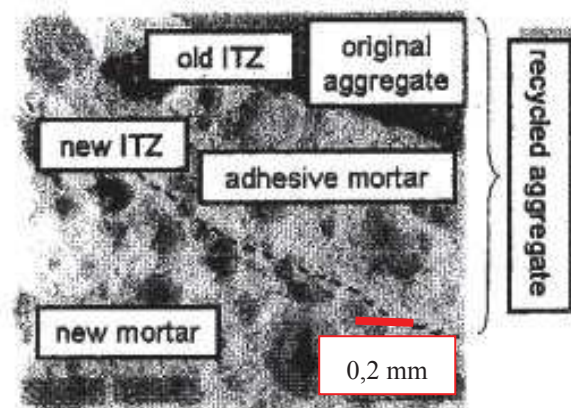


Figure 1- 40 : section de béton recyclé et zones interfaciales (ITZ) (Otsuki et al., 2003).

C'est à ce niveau qu'un point faible des bétons recyclés est identifié (Xiao et al., 2012)<sup>24</sup>, (Ryu, 2002) (Otsuki et al., 2003). L'ancienne et la nouvelle pâte ont des rapport  $E_{eff}/C$  différents et donc des résistances mécaniques différentes. La résistance de cet ensemble ancienne-nouvelle pâte sera obtenu en considérant la pâte aux caractéristiques mécaniques les plus faibles (Ryu, 2002) (Otsuki et al., 2003).

Les caractéristiques microstructurales du béton recyclé sont également fonction des méthodes de malaxage et du mode de saturation des granulats recyclés (Tam et al., 2005) (Zhao et al., 2013).

Zhao et al (2013) montrent pour des mortiers, (figure 1-41), que le taux de saturation initial des granulats induit un transfert hydrique local gravillons pâte. Il s'ensuit une augmentation (gravillons SSS) ou une réduction (gravillons secs) locale du rapport E/C et par conséquent des caractéristiques mécaniques locales de l'interface.

<sup>24</sup> qui citent (Rasheeduzzafar Khan A et ASTM, 1984)

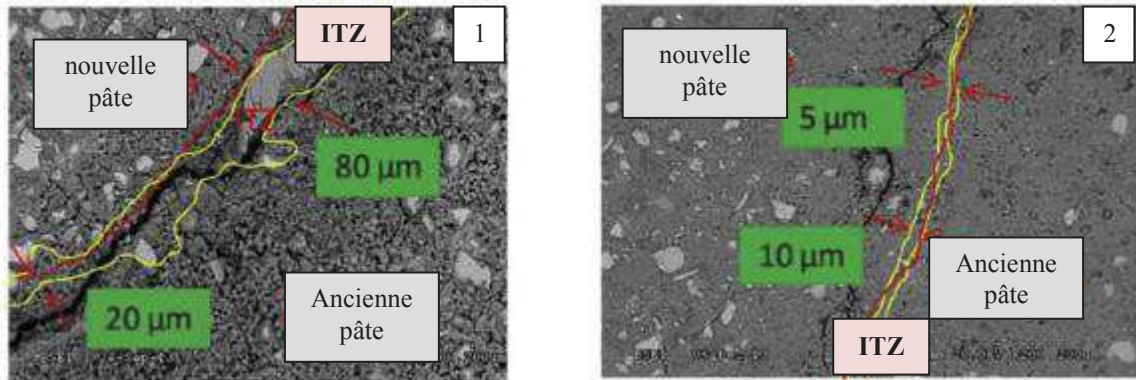


Figure 1- 41 : caractéristiques d'ITZ pour des mortiers réalisés à base de sables recyclés  
 1 : sables pré saturés à l'état SSS ; 2 : sables introduits secs dans le malaxeur (Zhao et al., 2013).

Chakradhara Rao et al (2010) montrent que les résistances à la compression du béton recyclé sont meilleures du fait de la plus grande absorption d'eau et de la meilleure rugosité de surface des granulats recyclés.

Brito & Alves (2010) mettent en avant de meilleures résistances à l'abrasion du béton recyclé comme la conséquence d'une meilleure ITZ gravillons recyclés/nouveau mortier.

#### 4.2.2 Propriétés mécaniques des bétons recyclés

Dans la littérature, de nombreux bétons recyclés ont été étudiés. Une synthèse est donnée dans le tableau 1-12 dont l'analyse met en évidence l'influence du taux de substitution et de la qualité des granulats recyclés sur les paramètres mécaniques du béton recyclé.

Les résistances mécaniques décroissent quand le taux de remplacement par des granulats recyclés augmente : 100 % de gravillons recyclés amènent 10 à 25 % de réductions des résistances (Sanchez de Juan and Alaejos Gutierrez, 2004) (Li, 2008) (Brito and Alves, 2010) (Xiao et al., 2012).

Si le taux de remplacement par des granulats recyclés reste en dessous de 20 à 30 %, (Poon and Chan, 2006) (Li, 2008) (Xiao et al., 2012), les résistances mécaniques évoluent peu par rapport au béton témoin (Sanchez de Juan et al 2004).

Toutefois, il est possible d'atteindre de bonnes valeurs de résistance à la compression (Li, 2008), voire d'obtenir un béton recyclé de meilleures caractéristiques que le béton « parent », (Chakradhara Rao et al., 2010). Il faut jouer sur le rapport E/C du béton recyclé, (Hansen, 1992), utiliser un superplastifiant, augmenter la quantité de ciment, (Xiao et al., 2012), et modifier le mode de fabrication (saturation des gravillons recyclés, eau d'ajout, malaxage) (Tam et al., 2005) (Domingo et al., 2009).

Ref.	Pourcentage de substitution (%) Gravillons (G) Sable (S)				Adjuvant ou addition	Résistance du béton recyclé / béton témoin		Module E du BR/BT	Facteurs constants
	(G) recyclé	(G) naturel	(S) recyclé	(S) naturel		f <sub>cj</sub>	f <sub>tj</sub>		
Bernier G., 1983	100	0	0	100	-	1,0	0,93	1,0	dosage de ciment / ouvrabilité / granulométrie / béton > 25MPa
Ravindraradjah R.S. et al, 1987	100	0	0	100	-	0,9	-	-	dosage de ciment / teneur en eau
Hansen T.C., 1992	100	0	0	100	-	0,8 à 0,9	-	0,7 à 0,85	dosage de ciment / ouvrabilité
C.S. Poon et al (2002, 2004, 2007)	100	0	0	100	-	0,75 à 0,86	-	-	Eau totale constante – gravillons SSS, secs ou à 50 % SSS
Sánchez de Juan M. et al, 2004	20-50	80-50	0	100	S u p e r  p l a s t i f i a n t	0,97	0,98		dosage de ciment / teneur en eau
Sánchez de Juan M. et al, 2004	100	0	0	100		0,87	0,90		dosage de ciment / teneur en eau
Sánchez de Juan M. et al, 2004	25-50	75-50	0	100		0,95	-	-	dosage de ciment / teneur en eau
Sánchez de Juan M. et al, 2004	100	0	0	100		0,84	-	-	dosage de ciment / teneur en eau
Yang et al (2008)	100	0	0	100		0,9	0,86	0,92	E/C constant (pas de correction d'eau) – gravillons SSS, secs ou à 50 % SSS
González B. et al, 2004	50	50	0	100	6,2% de ciment	1,0	-	-	dosage de ciment / ratio E/C
González- Fonteboa B. et al, 2008	50	50	0	100	8% fumée de silice	0,96	1,0	-	Ouvrabilité / ratio E/C / grade de béton visé 30MPa
Kou Shi-Cong et al (2011)	100	0	0	100	aucun	0,78 à 0,81			E/C constant ou affaissement au cône constant – granulats SSS

Tableau 1- 12 : quelques caractéristiques mécaniques de bétons recyclés  
(DAO, 2012) (Zhao, 2014) (Pepe, 2014).

La résistance en traction simple, en flexion ou au cisaillement évolue sensiblement avec le taux de substitution par des granulats recyclés, avec une baisse de 10 à 30 % pour 100 % de gravillons recyclés dans le béton (Sanchez de Juan et al 2004) (Xiao et al., 2012).

De la même manière que précédemment, la littérature met en évidence une baisse sensible du module de Young du béton avec l'augmentation de la quantité de gravillons recyclés. Cette propriété est due à la rigidité plus faible des granulats recyclés du fait de la présence de mortier « parent » adhérent (Brito et al 2010). Cette baisse peut atteindre 35, 40 ou 45 % (Sanchez de Juan et al 2004) (Poon and Chan, 2006) (Li, 2008) (Chakradhara Rao et al., 2010).

#### 4.2.3 La durabilité des bétons recyclés

En termes de pénétration des chlorures et de carbonatation, les performances des bétons recyclés sont inférieures aux bétons témoins à base de gravillons naturels. Plus le taux de recyclés augmente plus les caractéristiques se dégradent (Otsuki et al., 2003) (Xiao et al., 2012) (Brito et al 2010) (Chakradhara Rao et al., 2010) (Bravo et al., 2015). Par ailleurs, les bétons recyclés ont des performances inférieures en terme de résistances aux sulfates (Hasaba et al., 1981).

#### 4.2.4 Le retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation augmente avec le taux de substitution par des gravillons recyclés (Hansen et al 1985) (Domingo et al., 2009) (Pepe, 2014) (Silva et al., 2015). Les recommandations RILEM préconisent de prendre en compte une majoration de 50 % du retrait pour 100 % de gravillons recyclés. Silva et al (2015) proposent des coefficients de majoration en fonction du pourcentage de recyclés et allant jusqu'à 1,8 pour 100 % de gravillons recyclés.

Pour de faibles pourcentages de substitution, (< 20%), comme l'illustre la figure 1-42, le retrait reste proche de celui du béton témoin. La fissuration de retrait reste également comparable à celle du béton témoin (Hansen and Boegh, 1985).

Le retrait du béton recyclé peut être réduit si le rapport E/C est réduit ou bien quand des cendres volantes ou des adjuvants tels que des superplastifiants sont intégrés à la formulation (Sanchez de Juan et al 2004), (Domingo et al., 2009), (Xiao et al., 2012).

L'utilisation des fines recyclées est souvent limitée car les effets sont bien plus prononcés (Tegguer et al 2011). La nature des gravillons utilisés et leur rigidité en particulier peut également influencer sur les valeurs de retrait des bétons (Fujiwara, 2008) (Silva et al., 2015).

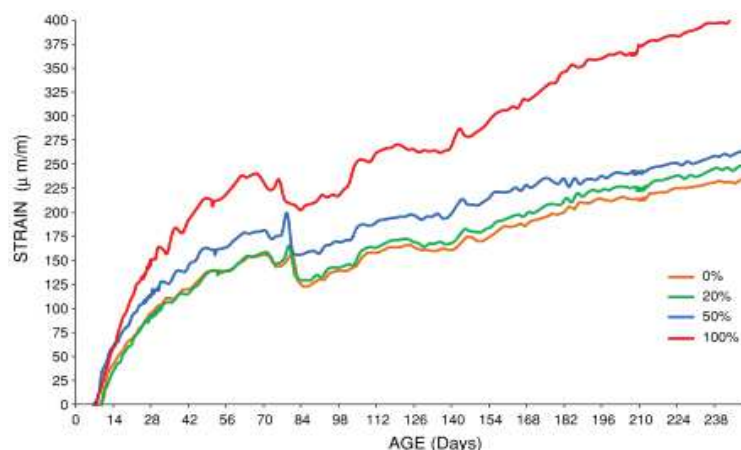


Figure 1- 42 : retrait de dessiccation de bétons recyclés (0 / 20 / 50 / 100 % de gravillons recyclés) en fonction du temps (Domingo et al., 2009)

### 4.2.5 Synthèse

L'utilisation des granulats recyclés peut avoir des effets variables sur les propriétés physiques et mécaniques du béton durci (tableau 1-13).

Changements attendus en comparaison avec des mélanges similaires produits à partir de granulats naturels		
Propriétés	Gravillons recyclés seulement	Sables et gravillons recyclés
Résistance à la compression	0 – 24 % en moins	15 – 40 % en moins
Résistance à la traction	0 – 10 % en moins	10 – 20 % en moins
Module d'élasticité	10 – 33 % en moins	25 – 40 % en moins
Retrait de dessiccation	20 – 50 % en plus	70 – 100 % en plus
Fluage	30 – 60 % en plus	30 – 60 % en plus
Densité	0 – 10 % en moins	5 – 15 % en moins

Tableau 1- 13 : effet des granulats recyclés sur les propriétés du béton durci (ACI555R-01, 2001)

La pâte de ciment présente dans les gravillons recyclés est la principale raison des modifications de propriétés. Elle pilote le comportement des bétons recyclés (Lalesev et al., 2010). Pour des taux de substitution en gravillons recyclés jusqu'à 100 %, Lalesev et al (2010)<sup>25</sup> observent une augmentation du retrait de dessiccation (jusqu'à + 50 %), du fluage, de l'adsorption d'eau (jusqu'à + 50 %) ainsi qu'une baisse des résistances (jusqu'à - 25 % en compression, et - 10 % en traction ou flexion), des modules d'élasticité (jusqu'à - 45 %) et des résistances au gel (faible).

### 4.3 Propriétés des bétons recyclés au jeune âge

L'utilisation de granulats recyclés peut altérer les propriétés et le comportement macroscopique du béton frais. L'ampleur des effets qui est récapitulée dans le tableau 1-14 varie essentiellement avec la qualité et la quantité de granulats recyclés dans le béton (ACI555R-01, 2001).

Changements attendus en comparaison avec des mélanges similaires produits à partir de granulats naturels		
Propriétés	Gravillons recyclés seulement	Sables et gravillons recyclés
Ouvrabilité	Similaire à légèrement inférieure	Légèrement à significativement inférieure
Etats de surfaces, finitions	Similaire à plus difficile	Plus difficile
Ressuage	Légèrement moins	Moins
Demande en eau	Plus grande	Beaucoup plus
Air interne	Légèrement plus	Légèrement plus

Tableau 1- 14 : effet des granulats recyclés sur les propriétés du béton frais et son comportement (ACI555R-01, 2001)

<sup>25</sup> Ces auteurs ont effectué une riche analyse bibliographique à laquelle il convient de se référer pour plus de détails. Les tendances et valeurs qu'ils proposent sont cohérentes avec la bibliographie produite dans ce rapport.

### 4.3.1 Ouvrabilité

A volume de pâte constant, l'ouvrabilité des bétons recyclés est conditionnée par deux paramètres clefs :

- l'angularité et la rugosité des recyclés plus grande que les naturels ce qui réduit la plasticité et l'ouvrabilité du béton frais (Yrjanson, 1989) (Qiao et al 2012).
- l'eau présente dans la pâte du béton qui est le paramètre majeur de contrôle de l'ouvrabilité et qui va être liée à la forte absorption des gravillons recyclés (Pepe, 2014).

En ce qui concerne l'étude du suivi de l'ouvrabilité de bétons recyclés au cours du temps on peut faire référence aux travaux de Poon et al., 2004 et de Mefteh et al., 2013. Le tableau 1-15 met en parallèle quelques données expérimentales.

	(Mefteh et al., 2013)	(Poon et al., 2004)
Granulats recyclés	0 / 5 mm - 10 / 20 mm	10 mm - 20 mm
3 états	Secs, SSS, pré humidifiés (état SSS)	Secs, SSS, état ambiant (50 % état SSS)
E/C	0,54 (189 Kg d'eau efficace). eau d'ajout constante	0,57 (205 Kg d'eau efficace) eau efficace (ou totale) constante
Taux de substitution par des graviers recyclés	0 / 20 / 40 / 60 / 80 / 100 %	0 / 20 / 50 / 100 %
Mesures de l'affaissement au cône	0, 15, 30, 45, 60 mn	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105...165 mn

Tableau 1- 15 : récapitulatif des données expérimentales

Les résultats obtenus pour des taux de substitution de 100 % des gravillons sont récapitulés sur la figure 1-43 :

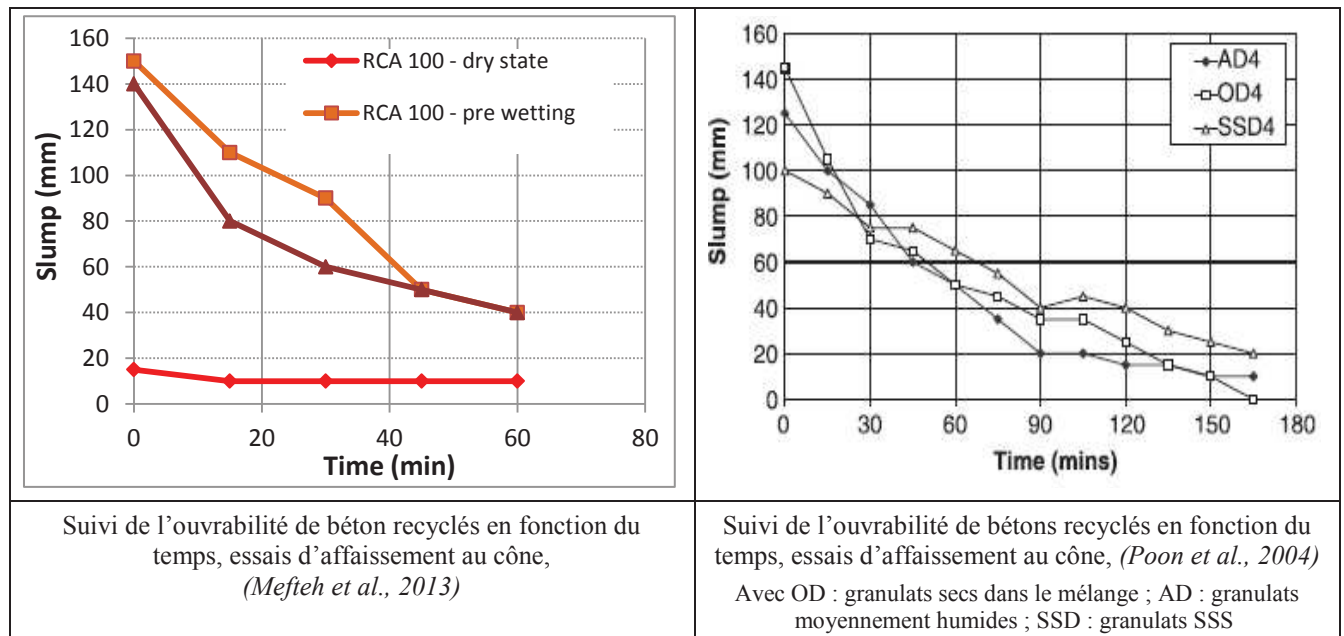


Figure 1- 43 : évolution des affaissements au cours du temps



Les conclusions relatives aux valeurs d'affaissement à l'état initial ne font pas l'objet d'un consensus. En effet, Mefteh et al., 2013 mettent en évidence une augmentation de l'affaissement lorsque la saturation des granulats est croissante : plus les gravillons sont secs, plus ils ont pris de l'eau à la pâte pour se saturer et plus l'affaissement est faible. Ces constats sont confirmés par les résultats de (Yong et al 2009) récapitulés au sein du tableau 1-16.

Echantillons	Affaissement au cône (mm)
Béton témoin ; gravillons roulés 100% naturels	55
Béton recyclé ; gravillons : 50 % naturels + 50 % recyclés secs dans le malaxeur	10
Béton recyclé ; gravillons : 100 % recyclés secs dans le malaxeur	0
Béton recyclé ; gravillons : 100 % recyclés SSS dans le malaxeur	55

*Tableau 1- 16 : influence de la saturation initiale des gravillons recyclés sur l'ouvrabilité des bétons, (Yong et al 2009)*

Poon et al (2004) ont corrigé l'eau d'ajout afin de rester à eau efficace constante et afin de compenser l'absorption des granulats à 24 h. Il existe donc un excès d'eau dans le béton qui se traduit par des valeurs d'affaissement supérieures pour les gravillons dont la saturation initiale est la plus faible. Des conclusions similaires sont faites pour les mortiers (Zhao et al., 2015).

Pour des granulats calcaires saturés à différents taux de saturation préalables, Cortas (2012) cite (A.M Alhozaimy) qui a travaillé à  $E_{\text{eff}}/C$  constant et (C.Khoun / W. Chi) qui ont travaillé à eau d'ajout constante et qui ont faits les mêmes constats contradictoires que (Mefteh et al., 2013) et (Poon et al., 2004).

Le choix de travailler à eau d'ajout ou à eau efficace constante a une forte influence sur l'affaissement du béton et sur les conclusions qui en résultent.

Dans les deux cas d'essais des valeurs de pré-saturation intermédiaires proches de 50% de l'absorption nominale des gravillons sont jugées comme intéressantes à étudier (Mefteh et al., 2013) (Poon et al., 2004) (Yong et al 2009).

La teneur en eau initiale des granulats recyclés est une donnée primordiale concernant l'ouvrabilité du béton (Yong et al 2009) (Corinaldesi et al 2010). Les résultats obtenus mettent en lumière l'influence de l'absorption des gravillons recyclés sur le rapport  $E_{\text{eff}}/C$  et sur l'ouvrabilité du béton.

Si à l'état initial, les gravillons ne sont pas à l'état « SSS », à  $E/C$  constant, le béton recyclé nécessite une quantité d'eau supplémentaire (5 à 15 %) pour l'obtention d'une ouvrabilité plastique similaire au béton de granulats naturels (Mukai et al 1979) (Hansen, 1992) (Poon et al 2006) (Etxeberria et al., 2007).

Cette absorption d'eau des recyclés dans la pâte implique une perte d'ouvrabilité et une baisse du rapport  $E_{\text{eff}}/C$  (Kou, 2006) (Yong et al 2009) (Xiao et al., 2012). Il est donc conseillé de pré-mouiller les granulats avant malaxage (Haejin, 2009) (Yong et al 2009). La pré-saturation des granulats recyclés a un effet favorable sur l'ouvrabilité.

La conservation d'une ouvrabilité constante sans augmenter l'eau totale peut aussi être obtenus par l'adjuvantation du béton à l'aide de superplastifiant (Chakradhara Rao et al., 2010) (Corinaldesi et al 2010).

L'air occlus contenu dans le béton recyclé est souvent supérieur de 0,5 à 1 % par rapport à un béton témoin de granulats naturels (ACI555R-01, 2001) (Haejin, 2009).

#### 4.3.2 Ressuage et consolidation du béton frais

Le ressuage de bétons recyclés a été étudié par (Poon et al., 2006) (Kou, 2006) (Yang et al., 2008) dont les conditions d'essais sont rappelées dans le tableau 1-17.

	Particularités des tests	Résultats
Poon et al (2006)	E/C = 0,45 ou 0,55 Granulats recyclés air dried + complément d'eau dans le malaxeur (SSS) mesures du ressuage à 0, 30, 60, 120 mn	Capacité de ressuage total (bleeding capacity) Débit surfacique de ressuage f(temps) (bleeding rate)
Kou (2006)		
Yang et al (2008)	E/C constant par formule de béton Granulats recyclés de types 1 et type 3 selon normes coréennes (2 à 6 % d'absorption) granulats recyclés SSS	Quantité d'eau ressuée au cours du temps

Tableau 1- 17 : mesures de ressuage effectuées sur des bétons recyclés avec 100 % de gravillons recyclés

Pour Yang et al., (2008), la capacité de ressuage va diminuer avec la capacité d'absorption des granulats recyclés utilisés et avec le taux de substitution, c'est-à-dire avec la capacité totale d'absorption des granulats recyclés.

Pour Poon et al., (2006), d'une part les capacités de ressuage total de même que le débit de ressuage sont croissants avec le taux de substitution de gravillons recyclés. D'autre part, le moment où les mesures de ressuage sont faites influe aussi largement sur les résultats, tel que le présente la figure 1-44. Plus le ressuage est mesuré tard, plus la capacité de ressuage total et le débit de ressuage diminuent.

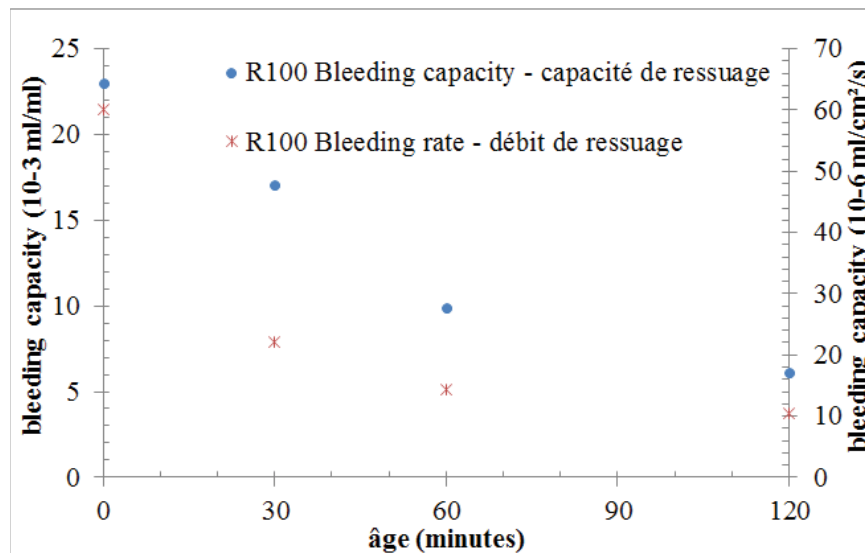


Figure 1- 44 : évolution du ressuage en fonction du temps de réalisation de la mesure, (Poon et al., 2006)

Le ressuage dépend donc essentiellement du rapport E/C (Mukai and Koizumi, 1979) (Kou, 2006) de la quantité et de la qualité (donc des capacités d'absorption) des gravillons recyclés (Poon et al., 2006) (Yang et al., 2008) de la quantité d'eau de saturation des gravillons recyclés éventuellement introduite comme eau d'ajout dans le malaxeur (Kou, 2006).

Yang et al., (2008) concluent que le ressuage démarre plus tard pour les bétons recyclés et d'autant plus tard que les gravillons ont de forts taux d'absorption d'eau.

Kou et al., (2006) et Poon et al., (2006) montrent que le temps de ressuage sera plus long si le démarrage des essais de ressuage se décale dans le temps, + 50 % de temps (110 mn) pour un décalage du point de démarrage de 30 mn.

### **4.3.3 Retrait plastique**

La littérature propose de nombreuses études du retrait de dessiccation à long terme. Néanmoins, les études relatives au retrait de dessiccation de bétons recyclés à l'état plastique sont rares. Par exemple, Silva et al (2015) ont réalisé une synthèse très large des études relatives au retrait des bétons recyclés mais elle concerne le retrait total du béton à l'état durci.

Corinaldesi et al (2010)<sup>26</sup> montrent que les granulats poreux permettent de réduire le retrait du béton par effet de cure interne due à la porosité plus élevée des gravillons recyclés. Ces constats sont relatifs à un béton durci (valeur à 90 jours) et sont contradictoires avec toute la bibliographie citée au 4.2.4 du présent rapport.

Au jeune âge, Corinaldesi et al (2010) ont étudié le retrait gêné à l'aide des modes opératoires d'essais allemands développés par la « Technical Academy Aachen ». Cet essai permet de mesurer l'effet de la dessiccation (par lampes halogènes) sur le béton jeune (< 24 heures) par la comptabilisation des fissures présentes. Ils constatent que les bétons recyclés se comportent mieux à la fissuration au jeune âge que les bétons témoins adjuvantés ou non avec des agents anti-retrait. Ils concluent également à l'existence du potentiel de cure interne des gravillons recyclés et à l'inefficacité des agents anti-retrait sur les bétons recyclés.

## **4.4 Cure des bétons recyclés, notion de cure interne**

### **4.4.1 Cure des bétons recyclés**

Fonseca et al. (2011) ont étudié les effets de différents procédés de cure<sup>27</sup> sur des bétons recyclés dont la quantité de graviers recyclés est de 20, 50 ou 100 %. Les auteurs ont mesuré les effets des procédés de cure sur les résistances en traction et en compression, sur le module d'élasticité et sur la résistance à l'abrasion. Ils concluent que les bétons recyclés présentent une sensibilité équivalente aux conditions de cures que les bétons classiques.

---

<sup>26</sup> (Corinaldesi and Moriconi, 2010) citent Benz and Snyder, 1999, Bentur et al, 2001, Zhutovsky et al, 2004, Lura et Bisschop, 2004).

<sup>27</sup> Procédés de cures en laboratoire, en extérieur, en chambre humide ou par immersion.

#### **4.4.2 Etude de la cure interne, bétons légers**

La technique de cure interne consiste à utiliser des granulats légers saturés comme réservoirs d'eau pour fournir de l'eau à la pâte de ciment au moment de l'hydratation. Cette technique est utilisée pour des bétons à faibles E/C (0,3) et durant la phase durcissante (Toma, 1999) (Cusson et al., 2006) (Henkensiefken et al., 2009) (De-la-Varga et al., 2012).

A l'inverse, l'utilisation de granulats poreux secs dans le béton représente une source de consommation d'eau supplémentaire ceci en plus du retrait de dessiccation et du retrait endogène (Golias et al., 2012).

Les études menées par tous les auteurs ci-dessus mettent en évidence l'impact de la quantité de granulats légers et de leur capacité d'absorption d'eau sur l'humidité interne, le retrait endogène et la fissuration.

Les capacités d'adsorption et de désorption de différents granulats légers du commerce (argiles, schistes, ardoises) influent sur le retrait endogène des bétons et dépendent essentiellement de la nature des granulats, de leur cinétique d'absorption et de leur perméabilité (Kohno et al., 1999) (Castro et al., 2011).

#### **4.4.3 Etude de la cure interne sur les bétons recyclés**

Du fait de leur porosité plus forte et de leur grande capacité d'absorption, les granulats recyclés peuvent créer un potentiel de cure interne dans les mortiers au sein desquels ils sont incorporés (Haejin, 2009). C'est confirmé par (Corinaldesi et al 2010) qui ont étudié le retrait de dessiccation de bétons recyclés (50 % de gravillons recyclés) et qui montrent que les bétons recyclés durcis présentent un retrait moins développé que les bétons de référence en invoquant un effet de cure interne.

Haejin (2009) a mené une étude comparative sur les capacités de cure interne de différents granulats recyclés en comparaison de granulats légers dans des mortiers<sup>28</sup>. Cet auteur conclut que :

- la capacité d'adsorption du granulat est un paramètre clef pour un matériau qui offre un potentiel de cure interne
- la capacité de désorption du granulat est le second paramètre fort dans le processus de cure interne. Elle précise la quantité d'eau contenue dans les granulats pouvant être restituée à la pâte pendant la dessiccation. L'étude menée par (Haejin, 2009) montre que les granulats recyclés sont moins performants que les granulats légers ; pour une humidité relative supérieure à 93 %, les granulats recyclés redonnent 60 à 80 % de l'eau absorbée alors que les granulats légers en restituent 90 %.

---

<sup>28</sup> Les granulats étudiés ont une granulométrie comprise entre 0,15 et 4,75 mm, une densité de 2,15 à 2,23, des capacités d'adsorption de 12 à 16 % (23,8 % pour les granulats légers) et provenaient de béton de résistance à la compression 7, 21 et 34 MPa.

## 5 CONCLUSION DU CHAPITRE 1

Les recherches existantes sur le retrait des bétons quand le matériau est un milieu poreux durci sont très nombreuses. En effet, il existe une abondante littérature relative au retrait endogène. En revanche, en ce qui concerne le retrait plastique, et si de surcroît le béton frais est étudié sous l'effet de la dessiccation due au vent, la bibliographie devient rare. Enfin, si le béton est un béton recyclé, les références sont quasiment inexistantes.

La synthèse bibliographique est donc articulée en plusieurs chapitres qui abordent des aspects complémentaires qui seront autant d'outils pour l'exploitation ultérieure des résultats.

Dans un premier temps, l'étude du matériau béton de la fabrication à la prise permet de mettre en perspective les phénomènes qui se produisent dès la formulation jusqu'à la fin de la phase plastique. Les paragraphes relatifs à la formulation, à l'ouvrabilité du béton frais et aux déformations à l'état plastique, donnent une vision macroscopique et hiérarchisée du matériau qui est le premier niveau d'appréciation des phénomènes en jeu.

Puis, l'approfondissement de l'étude des déformations du béton durant sa phase plastique s'appuie sur les travaux les plus récents relatifs aux bétons naturels. Sur le plan physique, les variations dimensionnelles sont à étudier dans les trois dimensions et font intervenir deux phénomènes essentiels : la consolidation et le retrait plastique dont les mécanismes sont étudiés. La réalisation des essais sous vent favorise le risque de fissuration précoce et accélère la cinétique des expériences. Par conséquent, le séchage convectif et ses effets sont aussi abordés.

En complément, au §3.6, une étude du parallèle entre le béton frais et les sols fins cohésifs est développée. Elle autorise l'utilisation d'un modèle original qui sera exploité.

Enfin, ce chapitre aborde les particularités des granulats recyclés ainsi que les caractéristiques des bétons recyclés durcis ou à l'état frais. La partie relative au retrait plastique des bétons recyclés est très limitée car peu de travaux existent sur ce sujet. La synthèse bibliographique se termine par une étude de quelques références relatives à la cure interne des gravillons recyclés et à ses effets sur les bétons recyclés.

Ce travail de recherche vient donc se positionner à l'interface entre les différents chapitres de la bibliographie : la phase plastique du béton et l'utilisation de gravillons recyclés.

La première particularité réside dans l'utilisation de formulations issues du projet national RECYBETON qui sont donc des formulations de bétons réalistes qui devraient pouvoir être utilisés sur chantier. Les formulations sélectionnées pour ce travail comprennent 100 % de gravillons recyclés et pas de sable recyclé.

La deuxième particularité est de réaliser cette étude sous vent sévère de 8 m/s pour que cet environnement agressif augmente le risque de fissuration et exacerbe les phénomènes physiques existant au sein du béton. Aucune cure n'est prévue sur aucun béton testé.

La troisième particularité est relative aux paramètres variables qui sont choisis en relation avec les gravillons recyclés et en particulier leur degré de pré saturation initial. L'absorption est un facteur secondaire de la formulation des bétons lorsque les granulats sont naturels car elle est bien connue. En revanche, lorsque les gravillons ont de fortes capacités d'absorption, ce qui est le cas des gravillons recyclés, ce facteur devient primordial et difficile à maîtriser.

L'intérêt et l'originalité de cette recherche vient du fait qu'elle combine toutes ces particularités sur un sujet peu traité dans la littérature jusqu'à ce jour.

Le programme expérimental mis en place a donc été adapté pour, d'une part quantifier les transferts hydriques gravillons recyclés-pâte du béton, et d'autre part étudier les déformations du béton à l'état plastique.

La réponse à ce double objectif nécessite l'utilisation d'un banc ventilé fortement instrumenté : capteurs lasers de déformations, capteurs de pression capillaire, caméra haute définition pour suivi de la fissuration, balances de précision pour la détermination de la perte de masse due au vent, etc...

Toutefois, d'autres essais ont aussi été mis au point pour compléter les résultats afin d'appréhender la problématique dans son ensemble.

L'objectif final de cette recherche est bien de mesurer l'effet du degré de pré-saturation des gravillons recyclés sur le béton recyclé à l'état frais mais aussi de comprendre les mécanismes en jeu pour les anticiper et maîtriser le risque de fissuration des bétons recyclés par déformations plastiques qui est nécessaire à la bonne durabilité des structures.

Page laissée intentionnellement blanche.

## CHAPITRE 2 : PROGRAMME EXPERIMENTAL

Le chapitre 2 présente les matériaux utilisés et le programme expérimental prévu. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet national RECYBETON, par conséquent les constituants des bétons comme leurs formulations sont issus du projet national.

Le programme expérimental prévisionnel consistait à étudier les bétons à l'état plastique en termes de déformations et de fissuration sous l'effet d'un séchage sévère. La description du système expérimental complet qui permet de répondre à cet objectif représente une partie conséquente de ce chapitre.

Toutefois, à la lumière des premiers résultats, des expérimentations complémentaires ont été imaginées et réalisées pour approfondir la compréhension des phénomènes. Le chapitre décrit donc la mesure des gradients de pression capillaire, les tests de séparation gravillons / pâte du béton frais et les essais de mesure de la perméabilité à l'état frais.

### 1 LES MATERIAUX ET LA FABRICATION DES BETONS

#### 1.1 L'eau

L'emploi de granulats recyclés dans les bétons nécessite la définition des notions d'eau totale, d'eau d'ajout, d'eau de pré-saturation des granulats et d'eau efficace. Cette dernière n'est pas constante dans le temps du fait des échanges potentiels pâte / granulats et du séchage qui est appliqué aux échantillons de béton.

Eau de pré-saturation des granulats : quantité d'eau nécessaire à la saturation totale ou partielle des granulats préalablement au malaxage. Pour obtenir un état Saturé Surface Sec (SSS), la quantité d'eau est définie comme 100 % de l'absorption nominale des granulats soit 1A.

Dans le protocole expérimental à suivre, la pré-saturation des granulats fait intervenir plus ou moins d'eau que la référence SSS ; soit une pré-saturation à 100 % (1A) + 1 % ce qui correspond à environ 1,2 fois l'absorption nominale : 1,2A ; soit une pré-saturation à 0,5 A soit à 50 % de l'absorption nominale (1A)

Eau efficace : eau disponible pour la pâte et donc l'hydratation de celle-ci.

Eau d'ajout : eau complémentaire à l'eau de pré-saturation introduite dans le malaxeur. Elle est considérée égale à l'eau efficace initiale quel que soit le degré de pré-saturation des gravillons recyclés.

Eau totale : quantité d'eau totale introduite dans le mélange :

- soit eau totale = Eau de saturation des granulats (1A) + Eau efficace
- soit eau totale = Eau de pré-saturation (0,5A ou 1,2A) + Eau d'ajout

Rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  : rapport massique de l'eau efficace divisé par la masse de liant équivalent. Dans la suite de l'étude, on appellera indifféremment ce rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  ou E/L.

L'origine des temps ( $t_0=0$ ) correspond à l'introduction de l'eau d'ajout dans le malaxeur.

Dans cette étude, il a été choisi de travailler à eau d'ajout constante. L'eau totale n'est donc pas identique pour deux bétons recyclés dont le degré de pré-saturation des granulats est différent.



## 1.2 Matériaux utilisés

Les bétons utilisés sont formulés avec un ciment Portland CEM II/A-L 42,5 N de l'usine de Rochefort. Les fiches matériaux sont fournies en annexe 1 du rapport.

Les appellations des formulations des différents bétons testés sont récapitulées dans le tableau 2-1. Un parallèle est effectué entre les noms donnés aux formules dans l'étude et les noms de référence des formulations du projet « Recy-béton » (Sedran, 2013).

Nom des bétons dans l'étude	Nom des bétons projet national « Recy-béton »	Classe de résistance	Pourcentage de recyclés Sables (S)-gravillons(G) (%)	Etat de pré-saturation des granulats recyclés
B <sub>0R</sub>	C25-30 0R 0R	C25-30	S : 0 – G : 0	Sans objet
B <sub>100R 1,2A</sub>	C25-30 0R 100R	C25-30	S : 0 – G : 100	Pré-Saturation à l'état SSS + 1 %, soit 1,2 A
B <sub>100R 0,5A</sub>		C25-30	S : 0 – G : 100	Pré-Saturation à 50 % de l'état SSS, soit 0,5 A
Gc <sub>0R</sub>	C35-45 0R 0R	C35-45	S : 0 – G : 0	Sans objet
Gc <sub>100R 1,2A</sub>	C35-45 0R 100R	C35-45	S : 0 – G : 100	Pré-Saturation à l'état SSS + 1 %, soit 1,2 A
Gc <sub>100R 0,5A</sub>		C35-45	Sables 0 - Gravillons 100	Pré-Saturation à 50 % de l'état SSS, soit 0,5 A

Tableau 2- 1 : appellations des formulations de béton testées

Les formulations des 6 bétons testés sont données à l'état initial en entrée de malaxeur et sont récapitulées dans les tableaux 2.2 et 2.3.

Quel que soit le degré de pré-saturation initial des granulats recyclés, il n'y a pas de correction de l'eau efficace pour absorption ultérieure des granulats. L'eau d'ajout reste constante pour un même béton dont les granulats recyclés sont pré-saturés à 1,2A ou 0,5A.

Constituants d'une gâchée pour 1 m <sup>3</sup> (Dosages massiques initiaux en Kg)			DENSITE SPECIFIQUE	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R 1,2A</sub>	B <sub>100R 0,5A</sub>
Ciment Holcim CEM II/A-L 42,5 N			3,09	270	282	282
Filler Calcaire Betocarb HP OG			2,70	45	31	31
Sable 0/4 Sandrancourt	Abs.=	1,00%	2,55	780	806	806
Gravillons 4/10 Givet	Abs.=	0,62%	2,71	266		
Gravillons recyclés 4 / 10	Abs.=	5,6 %	2,29		163	163
Gravier 6,3/20 Givet	Abs.=	0,57%	2,71	820		
Graviers recyclés 10 / 20	Abs.=	5,8%	2,26		701	701
Superplastifiant MC Powerflow 3140	E.S.=	30,3%	1,06	1.35	1.40	1.40
Eau efficace initiale E <sub>eff</sub> (E/L) <sup>29</sup> :			1,00	166 E/L=0,59	174 E/L=0,60	174 E/L=0,60
Eau de pré-saturation des gravillons recyclés 4 / 10				Sans objet	10,76	4,56
Eau de pré-saturation des graviers recyclés 10 / 20				Sans objet	47,67	20,33

Tableau 2- 2 : formules des bétons de la famille B (C25/30) utilisés dans l'étude

<sup>29</sup> L<sub>eq</sub> = C + 0.25 filler, conformément à la norme EN 206-1.

Constituants d'une gâchée pour 1 m <sup>3</sup> (Dosages massiques initiaux en Kg)			DENSITE SPECIFIQUE	G <sub>c0R</sub>	G <sub>c100R 1,2A</sub>	G <sub>c100R 0,5A</sub>
Ciment Holcim CEM II/A-L 42,5 N			3,09	299	336	336
Filler Calcaire Betocarb HP OG			2,70	58	53	53
Sable 0/4 Sandrancourt	Abs.=	1,00%	2,55	771	782	782
Gravillons 4/10 Givet	Abs.=	0,62%	2,71	264		
Gravillons recyclés 4 / 10	Abs.=	5,6 %	2,29		158	158
Gravier 6,3/20 Givet	Abs.=	0,57%	2,71	810		
Graviers recyclés 10 / 20	Abs.=	5,8%	2,26		682	682
Superplastifiant MC Powerflow 3140	E.S.=	30,3%	1,06	2.10	2.18	2.18
Eau efficace initiale E <sub>eff</sub> (E/L) :			1,00	151 E/L=0,48	156,8 E/L=0,45	156,8 E/L=0,45
Eau de pré-saturation des gravillons recyclés 4 / 10				Sans objet	10,43	4,42
Eau de pré-saturation des graviers recyclés 10 / 20				Sans objet	46,38	19,78

Tableau 2- 3 : formules des bétons de la famille Gc (C35/45) utilisés dans l'étude

On note ici que pour des granulats pré-saturés à 0,5 A ou à 1,2 A, il a été choisi de ne pas avoir une eau totale constante. Compte tenu de l'état plus ou moins saturé des granulats recyclés qui seront introduits dans le mélange, dans les formulations on parlera d'eau efficace initiale et de E/C initial c'est-à-dire en entrée de malaxeur sans préjuger des transferts potentiels ultérieurs entre les granulats – recyclés et la pâte sous l'effet du séchage en particulier.

Le dosage des constituants est conforme aux formules proposées dans le cadre du projet national Recybéton à l'exception de la quantité d'eau qui a été systématiquement diminuée pour rester proche d'une ouvrabilité cible autour de 20 cm et mesurée à l'aide d'essais au cône, (figure 2-1). Les valeurs d'affaissement mesurées sont généralement répétables avec une valeur de  $\pm 30$  mm (De-Larrard François, 1999).



Figure 2- 1 : photographie d'un affaissement de 20 mesuré à l'aide d'un essai au cône

### 1.3 Fabrication des bétons

#### 1.3.1 Conservation des granulats

Pour connaître exactement la quantité d'eau présente dans le mélange, les granulats sont conservés à l'état sec au sein de récipients hermétiquement fermés, (figure 2-2), suite à un étuvage de 72 heures à 105 °C.

Ce mode opératoire est systématiquement utilisé pour toutes les formules de béton testées.



Figure 2- 2 : mode de conservation des granulats à l'état sec en poubelles hermétiquement fermées (sable naturel et graviers recyclés 10 / 20)

#### 1.3.2 Pré-saturation des granulats avant malaxage

D'une manière générale, les sables et gravillons naturels sont saturés dans le malaxeur alors que les gravillons recyclés sont saturés préalablement en bidons conformément au mode opératoire décrit dans le rapport « Recybéton » de « Mise au point des formules de béton de référence » (Sedran, 2013). Cette pré-saturation s'effectue pour chaque catégorie de gravillons, dure 2 heures avec un malaxage de 2 mn par roulage des bidons au début et à la fin des 2 heures. La quantité d'eau de pré-saturation introduite est soit 1,2 A soit 0,5A, (figure 2-3).



Figure 2- 3 : à gauche gravillons recyclés 10/ 20 pré-saturés en bidon à 1,2A  
au centre gravillons recyclés 4 / 10 pré-saturés en bidon à 1,2A  
à droite gravillons recyclés 10 / 20 pré-saturés en bidon à 0,5A

Les sable et gravillons naturels sont pré-saturés dans le malaxeur avec leur quantité d'eau de saturation + 1 % avant introduction du ciment, du filler calcaire, de l'eau et de l'adjuvant. L'état SSS est jugé atteint quand toute l'eau est absorbée et que les granulats naturels apparaissent visuellement SSS. On notera que la saturation complète des granulats naturels est probablement plus lente conformément à (Bendimerad et al., 2015).

### 1.3.3 Malaxage et fabrication des bétons

La fabrication des bétons répond donc aux protocoles décrits dans les tableaux 2-4 et 2-5.

Opérations par ordre chronologique	B <sub>0R</sub> Gc <sub>0R</sub>	B <sub>0Rsec</sub> (B <sub>0Rd</sub> )
Pré-saturation des recyclés Gravillons 4 / 10 Graviers 10 / 20	Sans objet	Sans objet
Mise en place des granulats naturels dans le malaxeur	1 - Sables + gravillons naturels 2 – Eau ⇔ absorption nominale des sable et gravillons naturels + 1 % 3 – malaxage 1mn 4 – repos 5 mn	1 - Sables + gravillons naturels : ETAT SEC dans le malaxeur
Ajouts autres constituants dans le malaxeur	Ciment + filler calcaire	
Malaxage	1 mn	1 mn
Eau d'ajout, t <sub>0</sub> expériences	Eau d'ajout + super plastifiant	Eau totale + super plastifiant
Malaxage	1 mn 30	1 mn 30

Tableau 2- 4 : mode de fabrication des bétons naturels utilisés dans l'étude

Opérations par ordre chronologique	B <sub>100R</sub> 1,2A Gc <sub>100R</sub> 1,2A	B <sub>100R</sub> 0,5A Gc <sub>100R</sub> 0,5A
Pré-saturation des recyclés Gravillons 4 / 10 Graviers 10 / 20	Pré saturation au sein de 2 bidons, un pour les gravillons (4/10) un pour les gravillons (10/20) : malaxage 2 mn / repos 2h / malaxage 2 mn	
Mise en place des granulats naturels dans le malaxeur	1 - Sables naturels 2 – Eau ⇔ absorption sable naturel + 1 % 3 – malaxage 1mn 4 – repos 5 mn	
Ajouts autres constituants dans le malaxeur	Granulats recyclés pré-saturés + ciment + filler calcaire	
Malaxage	1 mn	1 mn
Eau d'ajout, t <sub>0</sub> expériences	Eau d'ajout + super plastifiant	Eau d'ajout + super plastifiant
Malaxage	1 mn 30	1 mn 30

Tableau 2- 5 : mode de fabrication des bétons recyclés utilisés dans l'étude

Les protocoles de malaxage utilisés s'appuient sur les résultats et les recommandations du projet national Calibé (IREX, 2002).

Pour le B<sub>0R</sub>, le protocole de pré-saturation des sables et gravillons naturels dans le malaxeur en début de fabrication a été testé de manière à mesurer son impact sur les résultats :

- Dans un premier cas, « B<sub>0R</sub> » colonne de gauche du tableau 2-4, le sable et les gravillons naturels sont pré-saturés à l'état SSS au sein du malaxeur en début de fabrication puis l'eau d'ajout est introduite ultérieurement dans le malaxeur.
- Dans un deuxième cas, « B<sub>0Rsec</sub> », le sable et les gravillons naturels sont introduits secs dans le malaxeur, le mélange reste sec jusqu'à l'introduction de l'eau d'ajout qui est alors l'eau totale.

#### 1.4 Caractéristiques des bétons à l'état frais

Pendant la phase plastique, le béton frais est un mélange granulaire humide constitué de grains de différentes tailles (gravillons, sable, fillers, ciment), d'eau, d'adjuvant et d'air et dont certaines propriétés peuvent être modélisées similairement à un sol cohésif saturé (Mbemba, 2010), et notamment sa teneur en eau massique  $w$  (%) définie comme égale à la masse d'eau totale / masse des grains solides à l'état sec  $\times 100$ .

La vie d'un béton commence lors de l'introduction de l'eau dans le malaxeur. Cette action représentera donc l'origine du temps,  $t_0$ , pour toutes les mesures effectuées.

Pour un essai donné, le démarrage de la soufflerie du banc ventilé intervient systématiquement au même âge après l'origine des temps ( $t_0$ ).

Enfin, le volume de pâte est défini comme indiqué équation Eq(16).

$$V_{p\grave{a}te} = V_{ciment} + V_{filler} + V_{eau} + V_{adjuvant} + V_{fines\ sables} \quad \text{Eq (16)}$$

Le tableau 2.6 récapitule les principaux volumes prévus dans la formulation pour les six bétons étudiés.

Valeurs données pour 1 m <sup>3</sup> de béton	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R</sub> 1,2A	B <sub>100R</sub> 0,5A	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R</sub> 1,2A	Gc <sub>100R</sub> 0,5A
V <sub>ciment + filler</sub> (litres/)	104,05	102,70	102,70	118,20	128,40	128,40
V <sub>sable</sub> (litres)	305,88	316,08	316,08	302,35	306,67	306,67
V <sub>graviers</sub> (litres)	400,74	381,36	381,36	396,31	370,77	370,77
V <sub>eau</sub> (litres)	180,0	232,0	207,1	165,0	213,0	188,8
M <sub>mat sèche</sub> (Kg)	2181,0	1983,0	1983,0	2202,0	2011,0	2011,0
G / S	1,39	1,07	1,07	1,39	1,07	1,07
Compacité du squelette granulaire du béton (non compris fines)	70,7 %	69,7 %	69,7 %	69,9 %	67,7 %	67,7 %

Tableau 2- 6 : principaux volumes caractéristiques de formules de bétons

Les valeurs de compacité du béton définies dans le tableau 2-6, comme le rapport à un mètre cube de béton frais du volume absolu des matières solides (ciment et granulats), sont cohérentes avec les valeurs de la bibliographie (Festa and Dreux, 2007).

Le tableau 2-7 présente les principales caractéristiques à l'état frais des bétons testés.

	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R</sub> 1,2A	B <sub>100R</sub> 0,5A	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R</sub> 1,2A	Gc <sub>100R</sub> 0,5A
V <sub>pâte</sub> (litres/1m <sup>3</sup> de béton)	289,4	305,7	291,8	290,7	315,4	299,2
% pâte / V <sub>total</sub>	29,3%	30,8%	29,8%	29,7%	32,1%	30,9%
w % (état initial)	8,3%	11,7%	10,4%	7,5%	10,6%	9,4%
Masse volumique mesurée du béton frais (Kg / m <sup>3</sup> )	2385	2214	2199	2412	2263	2239
E/L <sup>30</sup>	0,59	0,6	0,6	0,48	0,45	0,45
Compacité du béton (y compris fines et granulats)	81,1 %	80 %	80 %	81,7 %	80,6 %	80,6 %

Tableau 2- 7 : caractéristiques des bétons à l'état frais

#### 1.4.1 Transport et mise en œuvre

La mise en place du béton dans les moules se fait au plus près du tunnel ventilé de manière à ce que le transport depuis le malaxeur ne vienne pas perturber la mise en place naturelle du béton dans les moules et modifier le phénomène de consolidation.

La vibration se fait par aiguille vibrante simultanément pour tous les moules juste avant l'appareillage de ceux-ci.

Les temps de vibration sont adaptés à la consistance de chaque formulation de béton.

<sup>30</sup> Valeurs de E/L initial en entrée malaxeur en ne prenant pas en compte les échanges éventuels entre la pâte et les granulats.

## 2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL D'ETUDE, BANC VENTILE

Le dispositif expérimental, décrit dans le paragraphe 2, permet l'étude des déformations et de la fissuration du béton à l'état plastique et sous séchage sévère.

### 2.1 Démarche de l'étude

La partie expérimentale de ce travail repose sur la mesure des déplacements dans les trois directions d'un échantillon à l'état plastique et soumis au séchage. A partir des déformations dans les trois directions, en Z (le tassement), et en X et Y dans le plan horizontal (le retrait), le retrait volumique sera calculé.

Ces mesures sont accompagnées de l'étude de la fissuration sous déformation de retrait gêné qui utilise des caméras, des prises de vues toutes les minutes et le traitement de l'image associée.

Ces observations sont complétées de l'étude de phénomènes corollaires :

- étude du développement des pressions capillaires à l'aide de capteurs
- étude de la perte de masse par évaporation par pesées en continue
- étude d'un échantillon en conditions endogènes (retrait, pressions capillaires)
- étude des échanges d'eau granulats recyclés-pâte du béton au cours du temps
- mesure de la perméabilité des bétons frais.

Les essais réalisés sont par conséquent fortement instrumentés. Les multiples données obtenues permettent de suivre l'évolution du matériau à l'état plastique et ont pour objectif de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu durant cette phase.

Dans un premier temps, le banc ventilé va être décrit dans son ensemble puis dans un deuxième temps on détaillera les principaux capteurs utilisés.

### 2.2 Soufflerie et tunnel ventilé

La soufflerie et le tunnel ont été développés et utilisés dans les travaux de (Mbemba, 2010). Ils ont été modifiés et adaptés pour cette étude.

Le ventilateur est une turbine centrifuge montée en série avec un moteur électrique, le tout étant supporté par un châssis métallique et relié au tunnel ventilé par une pièce métallique en forme de divergent.

Les supports sont posés sur silent-blocs de même que la liaison au divergent de manière à filtrer un maximum de vibrations en provenance du moteur comme de la turbine.

Le ventilateur permet d'obtenir une vitesse d'écoulement de l'air uniforme dans le tunnel qui est contrôlée par un anémomètre en aval du tunnel. Deux sondes de contrôles hygrométriques et thermiques sont montées à l'amont et à l'aval du tunnel et permettent de contrôler la stabilité de ces paramètres durant l'essai.

Il est vérifié que les paramètres, température et degré hygrométrique restent relativement constants entre l'amont et l'aval du tunnel et au cours du temps.

Avant la mise en route de la soufflerie, tous les moules sont mis en place au sein de leurs réservations à l'aide de plate-formes auto-élevatrices qui sont rigidement calées avant le démarrage de l'essai.

La mise en place du béton dans les moules, des moules dans le tunnel, ainsi que tout l'appareillage associé est comptée depuis le  $t_0$  origine des temps qui est l'introduction de l'eau d'ajout dans le malaxeur.

Le démarrage de la soufflerie a été fait à  $t_0 + 10, 15$  ou  $35$  mn en fonction des essais réalisés, des appareillages mis en place et des objectifs à atteindre par chaque essai.

La calibration de la soufflerie a été effectuée par Mbemba, 2010 et n'a pas été reprise dans ces travaux. Quelques mesures de contrôle ont simplement été effectuées au droit des 4 emplacements de référence de manière à vérifier que la vitesse du vent est bien uniforme ( $8$  m/s soit  $2324$  tr / min) dans le tunnel à  $\pm 0,5$  m / s en prenant aussi en compte les pertes au droit des jeux entre les moules et le banc, jeux qui sont absolument nécessaires pour éviter toute transmission de vibration parasite du banc aux capteurs de mesures fixés sur les moules.

### 2.2.1 Conditions de séchage

Les dispositifs expérimentaux ont été conçus pour chaque essai et sont disposés dans une salle régulée en température ( $20 \text{ }^\circ \pm 2 \text{ }^\circ \text{C}$ ) et en hygrométrie ( $50 \% \pm 4 \%$ ) au sein d'un tunnel ventilé qui fixe des conditions de séchage avec un vent de  $8$  m/s, ce qui correspond à  $26$  km/h. La salle de réalisation des essais est donc en conditions isothermes contrairement au béton testé et aux moules qui peuvent avoir des échanges thermiques avec le milieu ambiant. En revanche, les moules sont étanches.

Les conditions de séchage dans le tunnel sont figées. La température est en général supérieure de  $1$  à  $2 \text{ }^\circ \text{C}$  par rapport à celle de la salle tandis que l'humidité relative est plus faible ( $2$  à  $5 \%$  HR de moins que dans la salle).

La figure 2-4 représente le tunnel ventilé utilisé. Comparativement aux travaux de (Mbemba, 2010), les principales adaptations de ce moyen d'essai ont consisté à remplacer la totalité des moules, à les équiper de capteurs lasers en lieu et place des LVDT, à fabriquer des cibles pour les lasers et à revoir le suivi de la fissuration en mettant en place deux caméras HD pour une prise d'images régulières tout au long de l'expérience.

La mise au point du banc ainsi repensé a nécessité plusieurs mois pour obtenir des conditions de répétabilité correctes et pour évacuer tous les problèmes de mesures : filtration des vibrations de la soufflerie, remplacement de certains capteurs lasers pour cause d'instabilité du signal, ajout de thermo-couples dans les moules, mise au point finale des mesures de flux, etc....

Tunnel d'essais : vitesse de vent de  $8$  m/s  
HR et  $T^\circ$  réglées au niveau de la salle par climatiseur  
Tunnel en circuit ouvert dans la salle

Soufflerie permettant d'obtenir une vitesse de vent uniforme de  $8$  m/s dans le tunnel d'essais

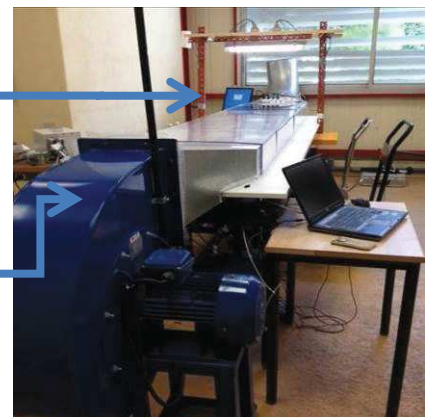


Figure 2- 4 : vue d'ensemble du banc ventilé



Certains moules (perte de masse et étude des déplacements) sont placés en conditions endogènes et sont placés dans le tunnel pour être autant que possible dans les mêmes conditions thermiques que les autres échantillons. En revanche, ils sont protégés de la dessiccation par un capot plastique étanché par du scotch en périphérie.

### 2.2.2 Mesures effectuées sur le tunnel ventilé

L'instrumentation mise en place permet de mesurer des paramètres tels que :

- Les déplacements dans les trois directions, X, Y, Z,
- La mesure des flux d'évaporation par convection sous l'effet d'un vent de 8 m/s
- La mesure des pressions capillaires dans le béton à l'état plastique
- L'étude de la fissuration (âge d'apparition et valeur de l'ouverture finale)

La mesure de ces paramètres nécessite une méthodologie d'acquisition qui est présentée sur la figure 2-5.

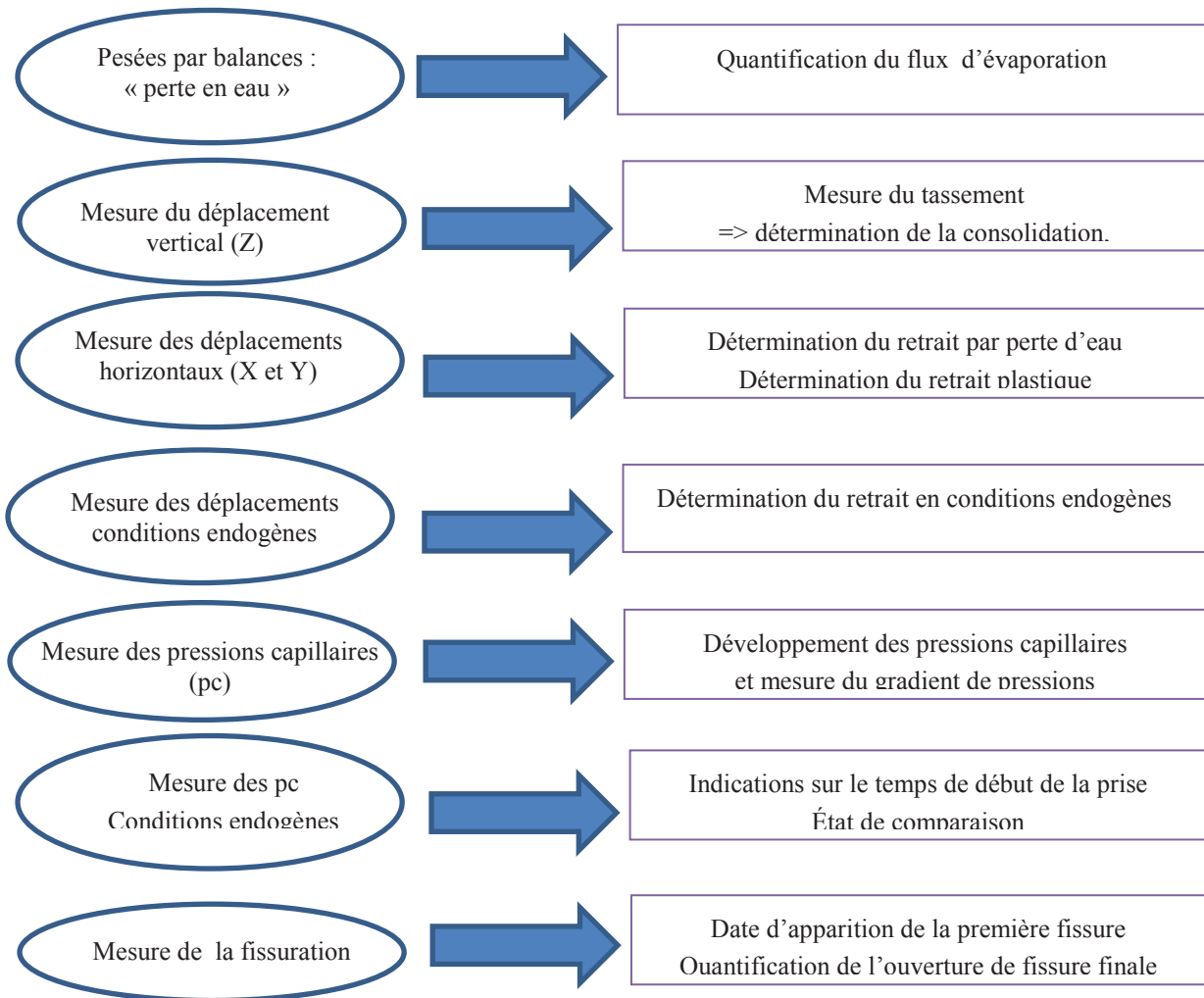


Figure 2- 5 : méthodologie de mesures adoptée sur les moyens d'essais

Le tunnel ventilé abrite les différents instruments de mesures comme représenté sur la figure 2-6.

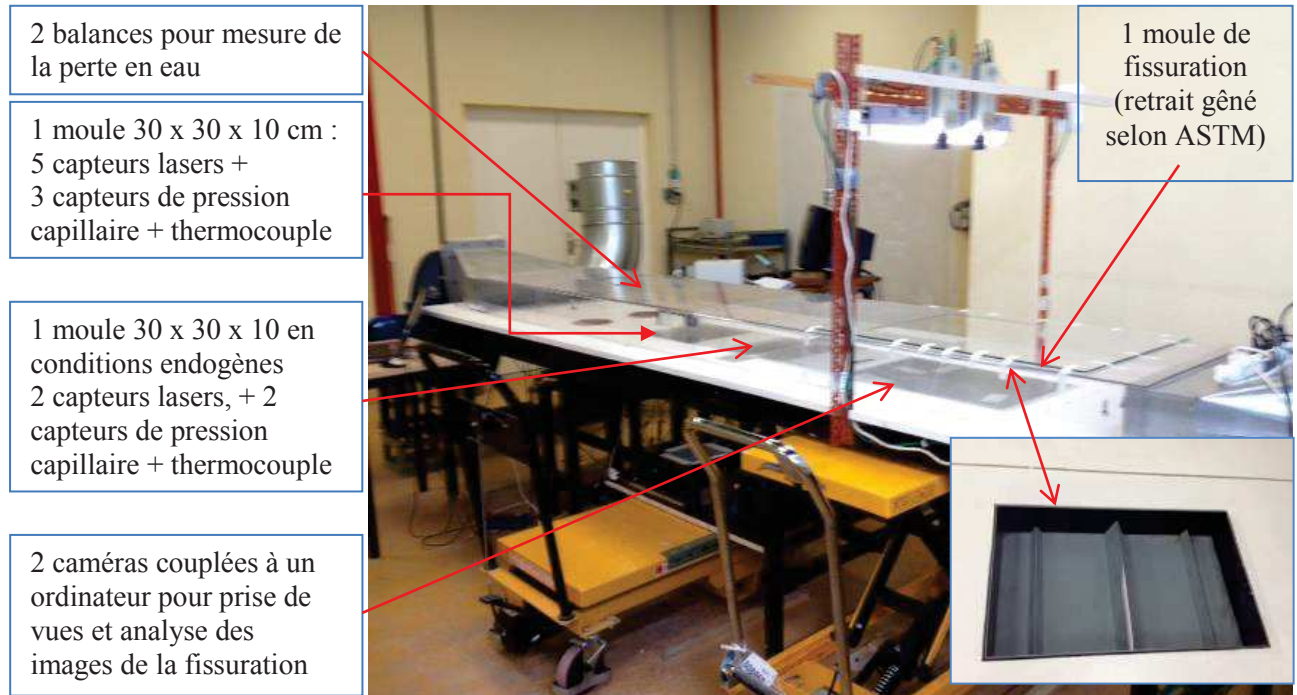


Figure 2- 6 : moules et moyens de mesure du banc d'essai.

La figure 2-7 est une vue de dessus des différents capteurs positionnés sur le banc ventilé. En particulier, il faut remarquer les capteurs lasers placés en vis-à-vis pour mesurer le retrait des échantillons selon les directions X et Y et les capteurs de pression capillaire positionnés selon trois cotés<sup>31</sup> de manière à faire apparaître un éventuel gradient de pressions pendant les essais.

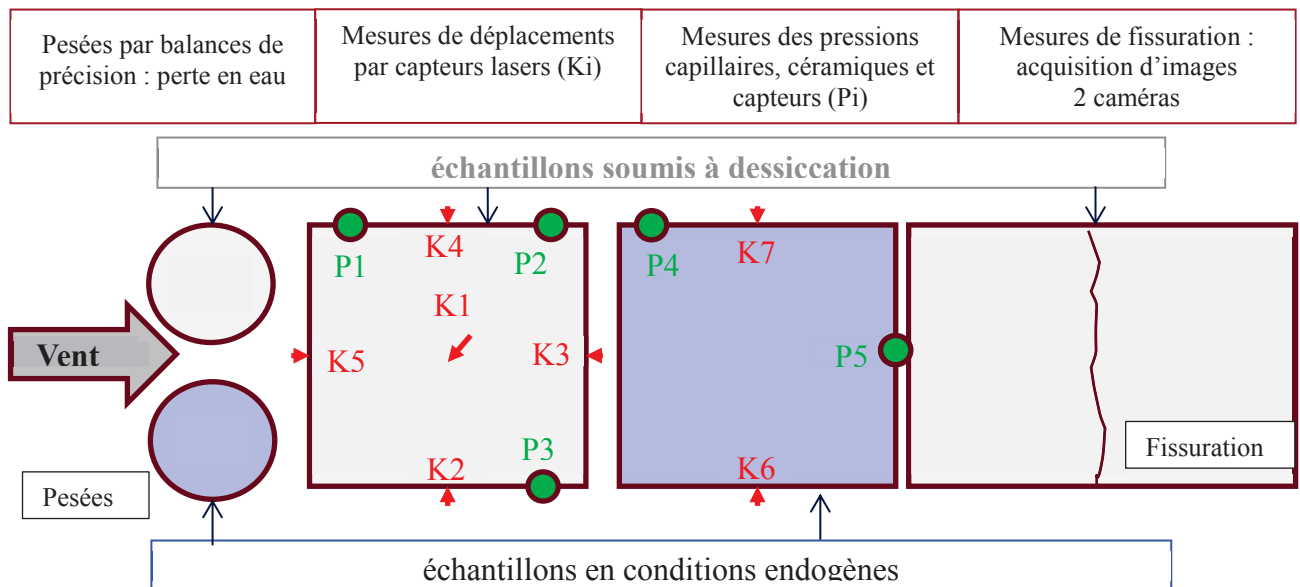


Figure 2- 7 : représentation schématique des moyens de mesures sur les moules

<sup>31</sup> Les capteurs sont à 20, 42, 64 mm de la face supérieure pour une profondeur de moule de 84 mm ce qui permet le positionnement éventuel d'un gros granulat tout autour de chaque capteur

## 2.3 Capteurs de mesure

Le tunnel ventilé nécessite une quantité importante de capteurs de mesures en tous genres pour les mesures de déplacements (lasers), de pression capillaire, d'hygrométrie et de température (dans l'air et dans le béton), de vitesse de vent (tableau 2-8).

Grandeurs physiques	Capteur	Type	U	Plage de mesure	sensibilité	N b	Connecteur Almeno associé	Plage des connecteurs	U (V)
Pression capillaire	Sdec	SKT850T	kPa	0-100	6,67 mv/psi 1psi=6894Pa	5	ZA9000FS2	-260 mV - +260 mV	10
Hygrométrie et température ambiante	hygromètre	FHA646E1c	HR % T°C	0-98 -20/+80	Valeur numérique	2	FHA646E1c		
Vitesse du vent	Anémomètre	FVA935T H5K2	m/s		Valeur numérique	1	FV935TH5K2		
Température béton	thermocouple	Type T	T°C	-20 / +100	Valeur numérique	2	ZA9000FST		
Déplacements	Laser Keyence	IL-S025	mm	20-30	5V/10mm (*) soit 2mm/V	7	ZA9602FS4	-1V/+5V	20

Tableau 2- 8 : récapitulatif des capteurs de mesure sur le tunnel ventilé

Les matériels et le protocole de montage des capteurs de pressions capillaires sont décrits dans (Mbemba, 2010).

## 2.4 Etudes des déformations et de la sensibilité à la fissuration

### 2.4.1 Le retrait empêché : évaluation de la sensibilité à la fissuration

Afin de suivre l'évolution de la fissuration générée dans le matériau cimentaire lors d'un retrait empêché, différents essais existent dans la bibliographie : essentiellement essais à l'anneau ou à l'aide de moules prismatiques.

Le retrait empêché est fortement influencé par la géométrie du moule en relation avec les tailles de granulats, les conditions de blocage du retrait et les conditions environnementales. L'essai de retrait empêché doit permettre de produire des fissures de retrait plastique dans des échantillons de faibles dimensions et avec des conditions de contraintes suffisamment réalistes.

Le moule de retrait qui a été utilisé dans la présente étude s'inspire du moule défini par la norme (ASTM C1579, 2006).

Des moules prismatiques similaires ont déjà été utilisés par différents auteurs pour leurs travaux (Soroushian et al 1998) (Turcry, 2004) (Turcry et al 2006) (Sivakumar et al 2007) (Mbemba, 2010) (Boshoff et al 2013).

Le moule prismatique ASTM a les dimensions intérieures suivantes : 56 x 38,5 x 11,4 cm, conformément à la figure 2-8.

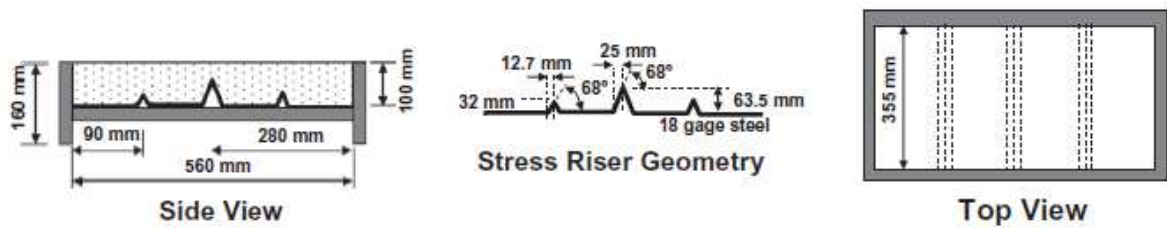


Figure 2- 8 : vue en coupe et en plan du moule définie par ASTM 1579C06 (Soroushian et al 1998) (Leemann et al., 2014)

Les auteurs qui ont utilisés ce type de moule ont généralement modifié la géométrie de manière à s'adapter à leurs études et à la taille des plus gros granulats en particulier, le tableau 2-9 en résume les grandes lignes.

	Dimensions (cm)	$D_{\max}$ + gros granulats (mm)	$H_{\text{libre}}$ sur dent de fissuration / $H_{\text{totale}}$ (%)	particularités
(Soroushian et al 1998)	56x38,5x11,4	25	40	
(Turcry et al 2006)	40x20x7	14	21,4	
(Sivakumar et al 2007)	50x25x7,5	20	27	
(Mbemba, 2010)	40x20x7	11,2	21,4	
(Boshoff et al 2013)	56x38,5x11,4	??	40	Barres supplémentaires de part et d'autre pour accentuer le retrait

Tableau 2- 9 : caractéristiques et dimensions des moules d'étude du retrait empêché utilisés par différents auteurs.

L'étude des caractéristiques des moules ci-dessus associée aux particularités des bétons testés dans cette étude ont conduit à retenir la forme générale du moule ASTM avec une hauteur totale modifiée égale à 84 mm soit la hauteur de la dent centrale 63 mm + 20 mm ( $D_{\max}$  granulats). La hauteur libre représente donc 24 % de la hauteur totale ce qui semble cohérent avec les valeurs du tableau 2-9.

Cette configuration a conduit à une fissuration effective et constatée pour tous les bétons testés<sup>32</sup>.

Au cours de l'essai, la genèse (apparition et évolution) de l'ouverture de la fissure est suivie et enregistré depuis le démarrage du banc à  $t_0 + 15$  mn jusqu'à  $t_0 + 7$  h 15 environ, temps conventionnel qui permet de terminer une batterie d'essais sur une seule journée.

Ce suivi s'appuie sur l'utilisation de deux caméras de type Grundig FA 87-I, (figure 2-9), qui prennent une photo toutes les minutes. Elles sont pilotées par le logiciel Labview 7.0.

<sup>32</sup> Des hauteurs supérieures de 100 ou 114 mm ont été testés mais ne conduisaient pas à une fissuration systématique des bétons.



Figure 2- 9 : photo des deux caméras de prise de vues au droit du moule de retrait gêné.

La transformation des photos en film montrant l'évolution de la fissuration au fil du temps est réalisée à l'aide du logiciel « PFV ver.338 »<sup>33</sup>. La visualisation du film permet de déterminer aisément le temps d'apparition de la fissure et d'en garder la mémoire.

A titre d'exemple, les prises de vue types réalisées par une caméra au cours du temps sont représentées sur la figure 2-10. On voit que l'exploitation de ces clichés permet de déterminer le moment précis où la première fissure apparaît.

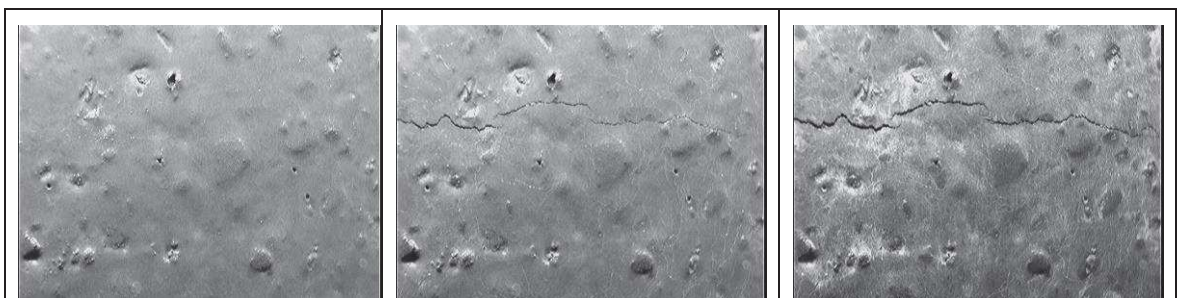


Figure 2- 10 : évolution de la fissuration sur un  $Gc_{100R1,2 A}$  à 1 h , 2 h et 7 h 20 (Labview 7.0)

La fissure apparue au droit de la dent centrale du moule<sup>34</sup> est photographiée par un appareil HD ayant une meilleure définition que les caméras, à la date de  $t_0 + 7$  h 15 environ. L'ouverture de la fissure maximale  $W_{max}$  est ensuite mesurée à partir de cette photographie traitée grâce au logiciel de traitement d'image « ImageJ »<sup>35</sup>.

<sup>33</sup> Logiciel photron fastcam viewer téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.mctcameras.com/pfv.html>

<sup>34</sup> Le moule est alors équipé d'un mètre étalon pour avoir une référence et une équivalence pixels - mm

<sup>35</sup> Image J : free software téléchargeable à l'adresse suivante : <http://imagej.nih.gov/ij/>.

Le traitement d'image effectué est détaillé sur la figure 2-11 qui met en évidence la photographie brute de la fissure puis la photographie traitée pour évaluation de l'ouverture de fissure.

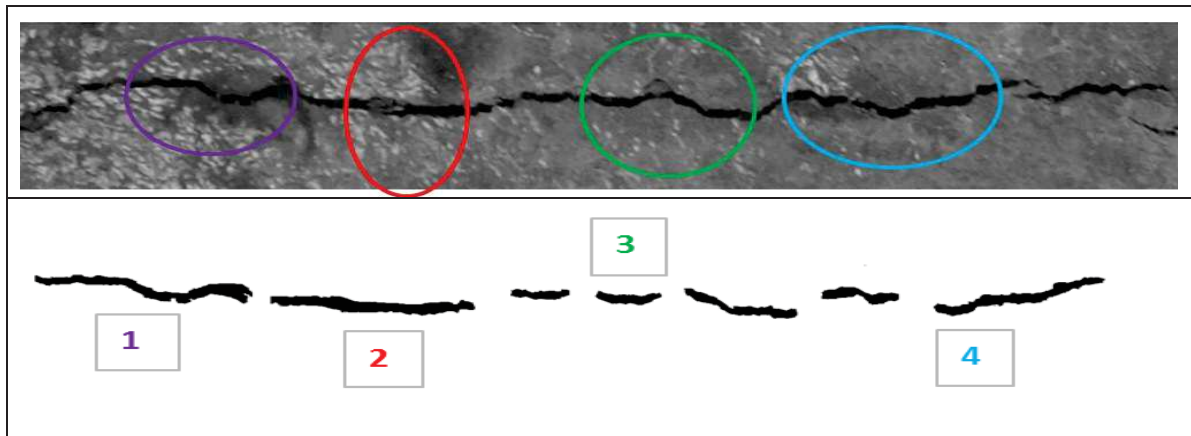


Figure 2- 11 : exemple de prise d'image de fissure ( $B_{100R} 1,2A$ ) par les caméras puis d'image traitée par ImageJ de manière à calculer l'ouverture de fissure max, moyenne et caractéristique.

Les sévères conditions d'essais (moule de retrait empêché,  $V_{\text{vent}} = 8 \text{ m / s}$  et  $\text{RH} = 50 \%$ ) engendrent une fissuration significative à chaque essai, pour chaque béton et dans les trois premières heures, donc dans la phase plastique du matériau.

Dans cette étude, nous ne nous intéressons qu'à la fissuration durant la phase plastique et non à l'évolution de la fissure après la prise du matériau pour laquelle certains auteurs estiment qu'aucune modification notable de la fissure ne se produit après la prise du matériau (Soroushian et al 1998)

#### 2.4.2 Le retrait libre, étude des déformations plastiques

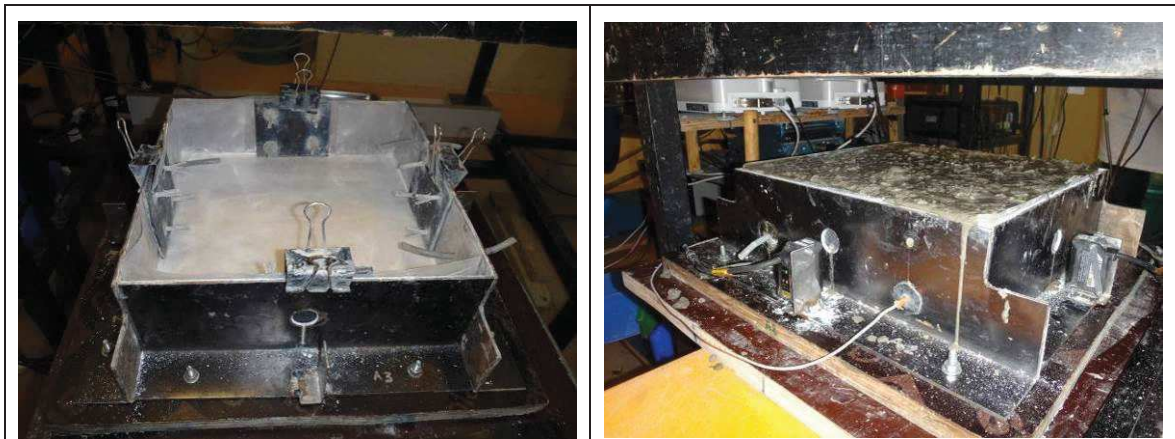
Le dispositif expérimental s'inspire des travaux de (Mbemba, 2010) et de (Slowik et al., 2008). Il est également adapté à la géométrie du banc ventilé :

- le moule de retrait libre est un moule prismatique de  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  de base et de 84 mm de haut<sup>36</sup> en acier dont les parois sont recouvertes de téflon  
les côtés sont percés d'orifices pour permettre :
  - ◆ la mesure des déplacements à l'aide de capteur laser de la marque Keyence
  - ◆ le passage de céramiques poreuses pour le suivi des pressions capillaires
  - ◆ le positionnement d'un thermocouple
- à l'intérieur de ce moule est placé une « chaussette » en polyane qui repose sur le fond du moule préalablement talqué et contre les parois en téflon. Le béton qui est coulé à l'intérieur des chaussettes n'a donc pas de contact direct avec le moule.

<sup>36</sup> La hauteur de tous les moules a été conditionnée par la hauteur du moule de fissuration, cf chapitre précédent, de manière à avoir le même potentiel de ressuage pour tous les essais.

- Les mesures de déplacement s'effectuent par laser sur des plaques positionnées à l'intérieur des chaussettes et liées au béton par des chevilles plastiques et des vis. Ces plaques suivent donc le déplacement du béton lorsque celui-ci apparaît. La mesure s'effectue à mi-hauteur de l'échantillon sur quatre côtés. La déformation de retrait obtenu s'obtient comme le cumul de deux mesures en X ou en Y, divisée par 0.3 m. La figure 2-12 illustre les spécifications techniques détaillées ci-dessus.

Le choix de cet appareillage, moule carré, et de cette méthode de mesure selon les deux axes X, Y permet de comparer les déformations dans les deux directions planes pour mettre en évidence une éventuelle anisotropie due au vent. La recombinaison avec la mesure verticale en Z permet de recalculer la variation volumique de l'échantillon au fil du temps.



*Figure 2- 12 : photos du moule d'étude des déplacements*

*A gauche : moule vide : noter les plaques en matière plastique et la chaussette en polyane  
A droite : moule plein, noter les capteurs lasers en place, et le thermocouple au premier plan*

La calibration des capteurs a été effectuée en immobilisant les plaques et en effectuant les mesures sur 48 heures dans les conditions de l'essai de manière à vérifier que celle-ci (vibrations, flux d'air, ...) n'impacte pas la stabilité de la mesure, (figure 2-13). C'est à cette occasion qu'il a été mis en évidence la nécessité d'un calage par cale métallique de la table auto-élevatrice qui avait tendance à fluer dans le temps, faussant la mesure du tassement.

La calibration des mesures de déplacement de l'essai a été effectuée par des mesures en parallèle sur les deux moules à partir de bétons d'une même gâchée exposés à des conditions environnementales identiques.

La figure 2-14 présente les résultats des mesures de retrait dans le sens transversal pour une même gâchée pour les deux moules en parallèle et pour une paire de capteurs lasers par moule K2-K4 pour le moule 1 et K6-K7 pour le moule 2.

On constate la bonne répétabilité spatiale de la mesure avec peu d'écart entre les deux courbes.

D'autre part, on constate aussi une bonne répétabilité de la mesure pour des gâchées successives d'un même béton, les essais ont été réalisés au moins deux fois, parfois trois fois, et pour tous les bétons testés.

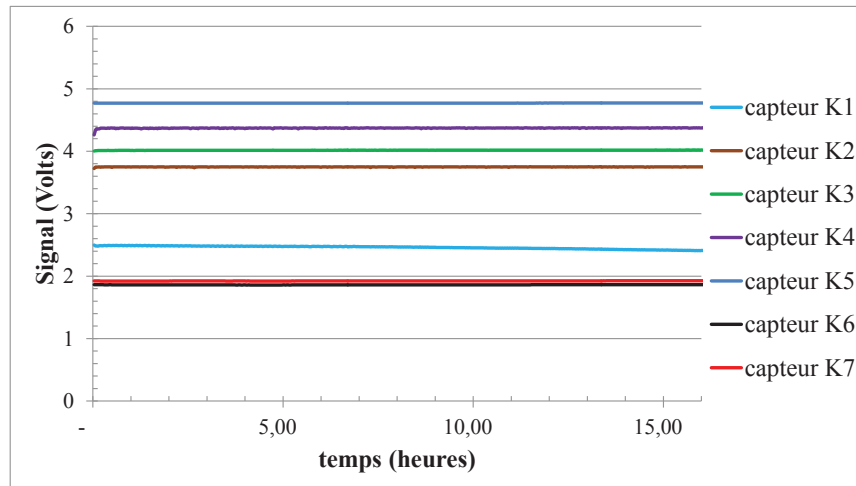


Figure 2- 13 : test de stabilité de la mesure par capteurs lasers

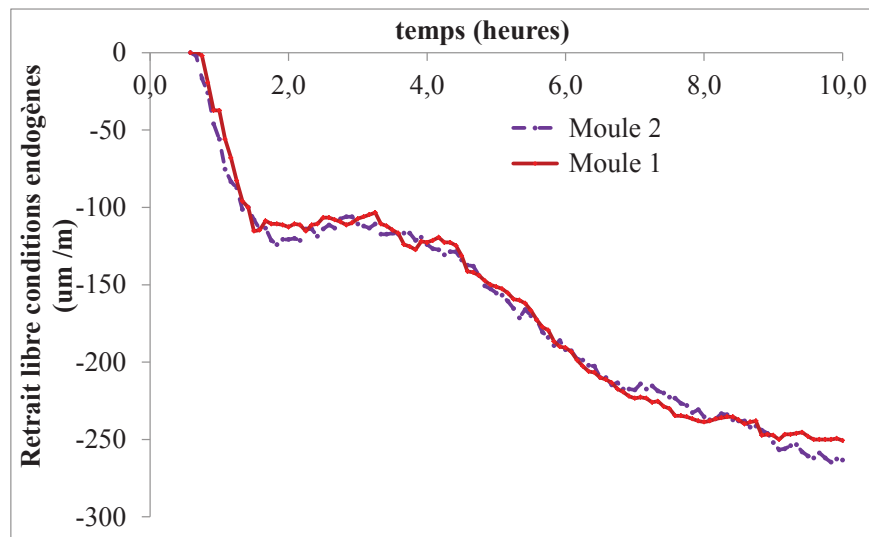


Figure 2- 14 : test comparatif de la mesure de retrait libre en conditions endogènes  
mesures en parallèle entre deux moules, janvier 2014, B<sub>0R</sub>

### 2.4.3 Les déformations verticales

La mesure des déformations verticales a pour objectif d'appréhender la composante verticale du déplacement dans la phase plastique du béton sans chercher à connaître dans le détail le phénomène de ressuage - consolidation du béton.

La mesure de la déformation verticale est particulièrement délicate à obtenir pour différentes raisons :

- le tassement de consolidation intervient dès la mise en œuvre du béton (y compris vibration) terminée
- la cible doit être suffisamment lourde pour résister à la vitesse du vent dans le tunnel ventilé et à la pression de l'eau de ressuage qui est ascendante
- la cible ne doit pas être trop dense pour ne pas influencer la mesure par son propre poids et la mesure doit être répétable (Josserand, 2002).



La méthode de mesure choisie dans la présente étude est la mesure par télémètre laser comme évoqué par (Josserand, 2002) pour mesurer directement le tassement du squelette granulaire.

Une source laser, identique aux capteurs lasers de mesure du retrait libre, est placée au-dessus de l'échantillon en partie centrale de celui-ci au bout d'une potence rigidement fixée et étudiée pour minimiser les mouvements parasites dus au détachement tourbillonnaire causés par l'obstacle sous l'écoulement d'air de 8 m / s, (figure 2-15).

Le laser pointe une cible métallique<sup>37</sup> de 2,25 cm<sup>2</sup> et de 5 mm d'épaisseur posée à la surface du béton et légèrement enfoncée dans celui-ci à la mise en place de la cible de manière à lui donner une stabilité suffisante dans l'écoulement de l'air. L'épaisseur de la cible garantit que l'eau de ressuage ne la submergera jamais de manière à conserver la validité de la mesure.

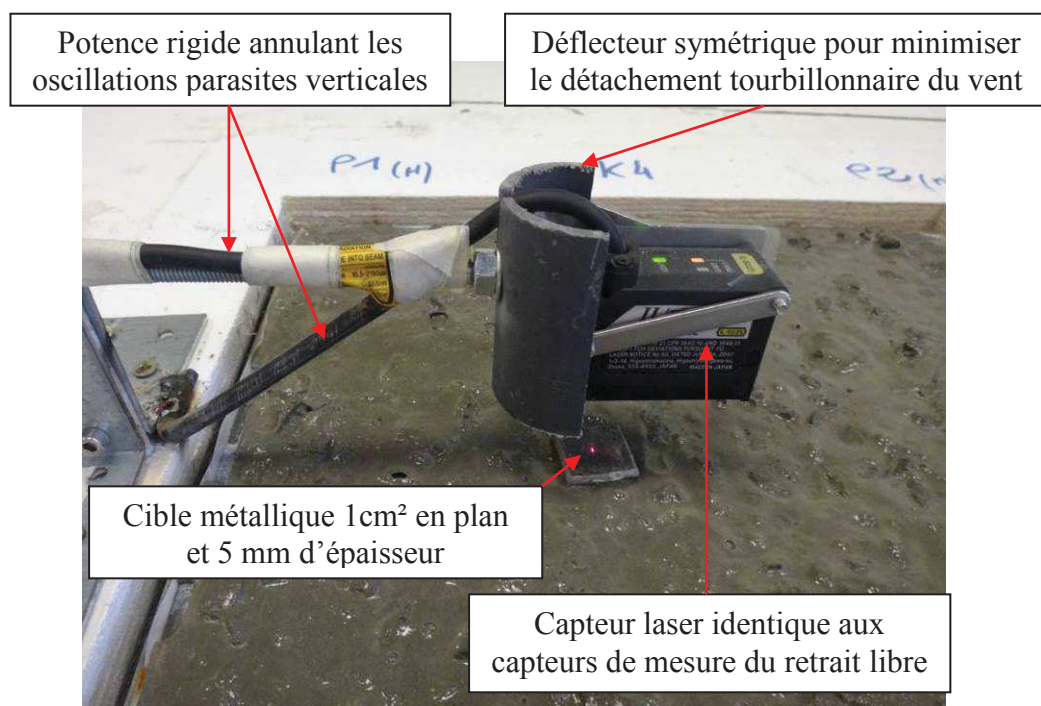


Figure 2- 15 : photographie du capteur laser et de la cible de mesure du tassement

Comme le souligne (Josserand, 2002), la mesure est répétable à l'infini ; toute la difficulté se concentre dans le choix de la cible et dans sa mise en place qui reste délicate pour chaque essai.

Globalement dans les travaux de cette étude, la répétabilité de la mesure a été correcte mais a nécessité une mise en place de la cible soignée et adaptée à la raideur des bétons testés. Certains essais ont posés des problèmes, ont donc été éliminés et remplacés par de nouvelles expériences jusqu'à l'obtention de courbes propres et répétables. La figure 2-16 donne l'exemple de courbes de tassement du béton B<sub>0Rsec</sub>.

<sup>37</sup> D'autres matériaux ont été testés (verre, céramiques, plastiques...) mais aucun n'a donné satisfaction vis-à-vis des critères de l'essai dans le tunnel ventilé sous 8 m / s de vent.

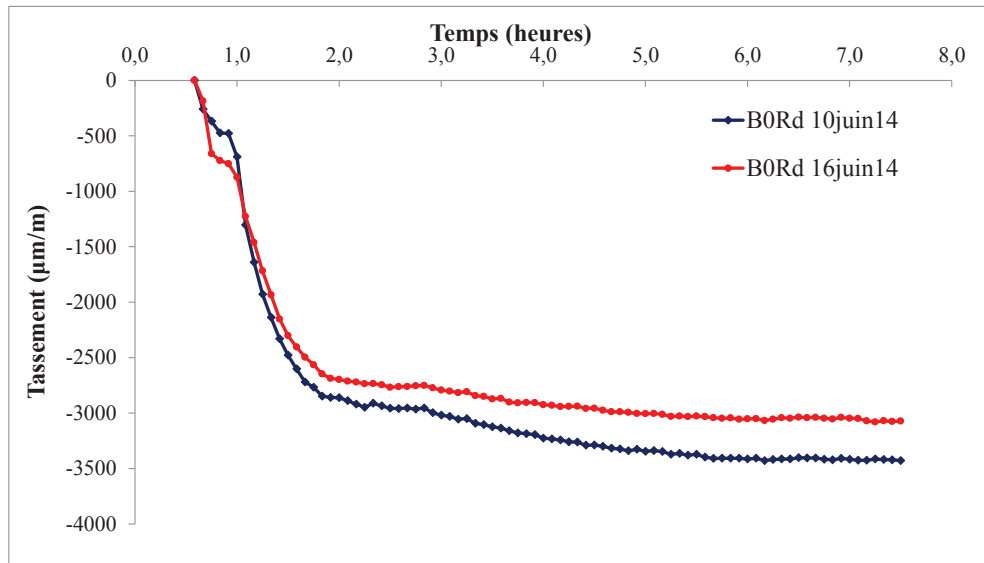


Figure 2- 16 : répétabilité de la mesure du tassement sur un béton naturel  $B_{0Rsec}$ .

Cette mesure de la consolidation du squelette ne permet pas d'évaluer directement le suivi du ressuage qui nécessiterait l'emploi d'un flotteur. Un tel équipement n'est pas compatible avec une étude sous séchage qui fait appel à un fort vent en surface du béton.

## 2.5 Etudes des pressions capillaires dans le béton

L'étude de l'évolution de la pression capillaire est réalisée au sein des mêmes moules  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  d'étude du retrait libre. Ce choix permet d'être sûr que les mesures de pression capillaire sont effectuées sous des conditions extérieures homogènes avec les mesures de déformations.

Le système de mesure des pressions capillaires est directement inspiré des travaux de (Mbemba, 2010). L'appareillage de mesure, (figure 2-17), comprend des capteurs de pressions, reliés à des céramiques poreuses par des tubes transparents. Les céramiques poreuses sont noyées dans le béton juste après la vibration de celui-ci au sein d'une réservation prévue à cet effet.

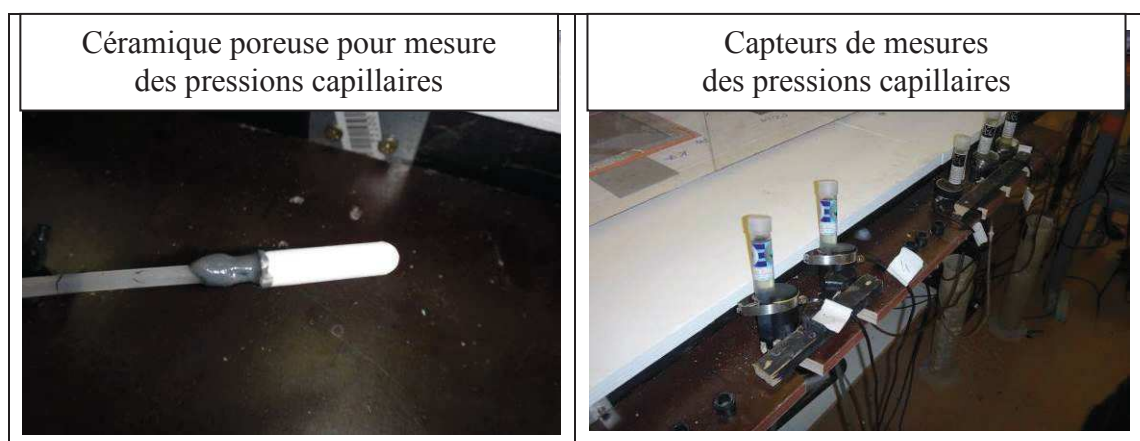


Figure 2- 17 : système de mesure de pression capillaire

Le protocole de préparation de l'essai et de la mesure comprend plusieurs phases :

- avant l'essai :
  - ◆ collage des céramiques sur les tubes capillaires à l'aide de colle époxy
  - ◆ désaération de l'eau par pompe à vide et remplissage du système de mesure, du capteur, tube et de la céramique poreuse à l'aide d'une seringue
  - ◆ immersion des céramiques poreuses au sein d'un récipient rempli d'eau désaérée jusqu'au début de l'essai
- pendant l'essai :
  - ◆ préparation des moules et mise en place des réservations pour céramiques<sup>38</sup>, (figure 2-17),
  - ◆ mise en place du béton et vibration de celui-ci
  - ◆ mise en place des céramiques poreuses, (figure 2-18),
  - ◆ réalisation de l'étanchéité des capuchons des capteurs (trous de seringue) et de l'étanchéité des moules (passage des parois par les tubes capillaires) à l'aide de graisse de silicone.

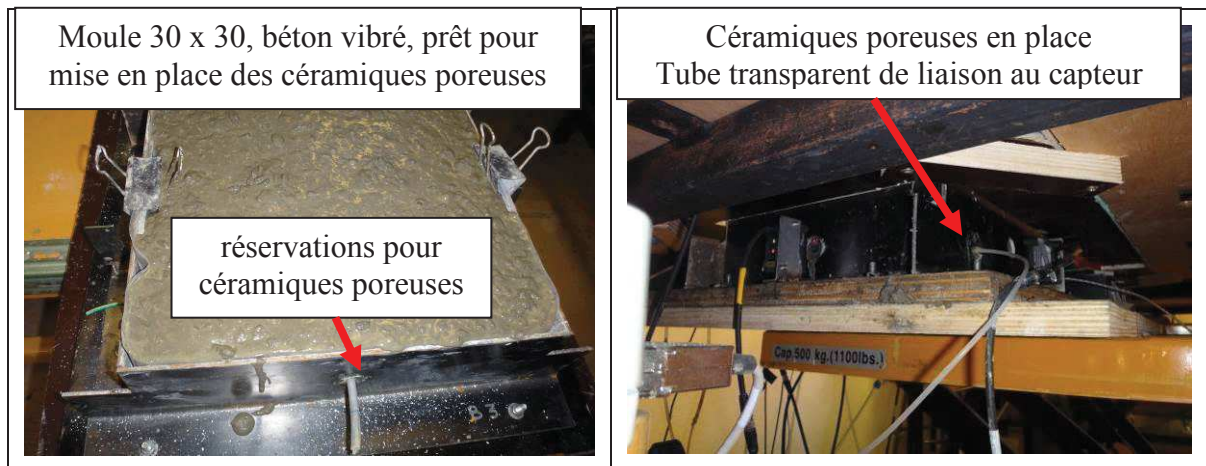


Figure 2- 18 : mise en place des céramiques poreuses au sein du béton après vibration

Le principe de la mesure consiste à suivre l'évolution des valeurs des pressions capillaires du milieu poreux saturé du béton frais jusqu'à la désaturation. Ces valeurs qui traduisent la dépression régnant dans les ménisques du milieu poreux vont évoluer à la baisse. Quand la céramique poreuse qui est noyée dans le béton va se trouver en contact avec la phase gazeuse, on note un retour à zéro qui peut être brutal et qui traduit la fin de validité de la mesure qui va stopper quand une bulle de vapeur ou d'air se forme et à tendance à remonter dans le système de mesure, (figure 2-19).

<sup>38</sup> Ces réservations du diamètre exact des céramiques et de la longueur voulue permettront d'avoir une mise en place parfaite du béton lors de la vibration autour de la future céramique poreuse trop fragile pour sa mise en œuvre avant la vibration.

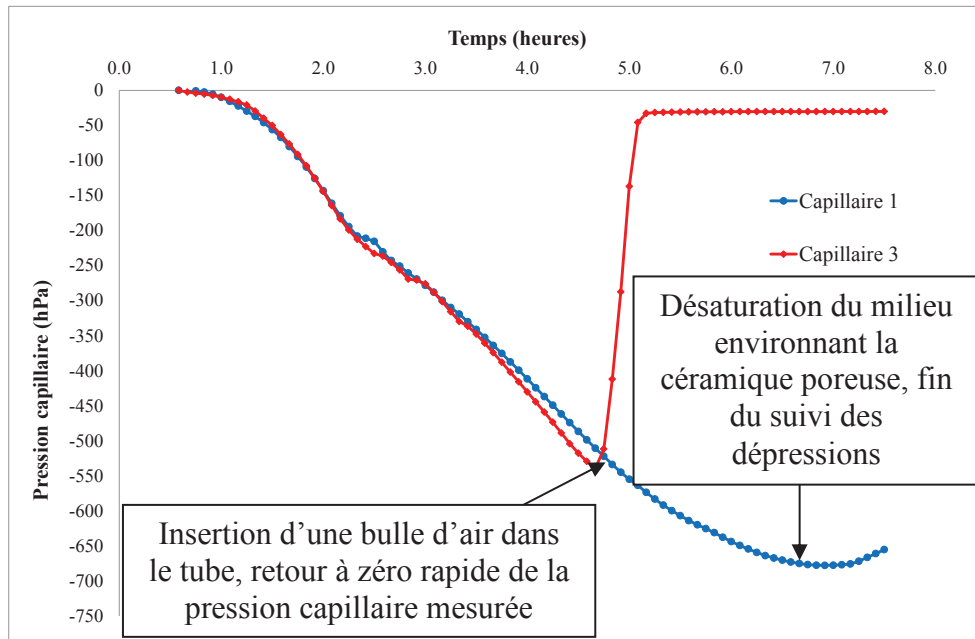


Figure 2- 19 : courbe des pressions capillaires pour deux capteurs au sein d'un même moule

La dépression capillaire a été mesurée à différentes profondeurs des moules de retrait libre :

- pour le moule soumis à dessiccation : un point de mesure haut à 20 mm de la face supérieure du béton, un point de mesure bas à 20 mm du fond du moule et un point de mesure intermédiaire à mi-hauteur, (figure 2-20)

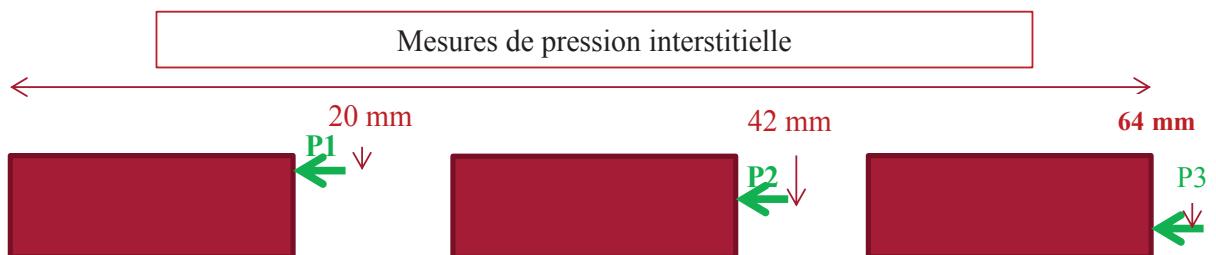


Figure 2- 20 : positionnement altimétrique des points de mesures de la pression capillaire

- pour le moule en conditions endogènes, l'échantillon est protégé de la dessiccation par un capot étanche, il n'y a donc pas de risque de gradient des pressions. Deux capteurs à mi hauteur sont placés sur deux côtés adjacents du moule. Pour la mesure en conditions endogènes, la dépression capillaire pourra se manifester quand la consommation d'eau par autodessiccation (hydratation du ciment) commencera.

La dépression capillaire a donc été mesurée à différentes profondeurs, en présence de vent et en conditions endogènes, (figure 2-21). Les dépressions capillaires mesurées en présence de vent à 20, 42, 64 mm de profondeur ne font pas apparaître de gradient de pressions notable. La pente de la courbe évolue en fonction du temps et de la consommation d'eau par dessiccation ou par hydratation du liant.

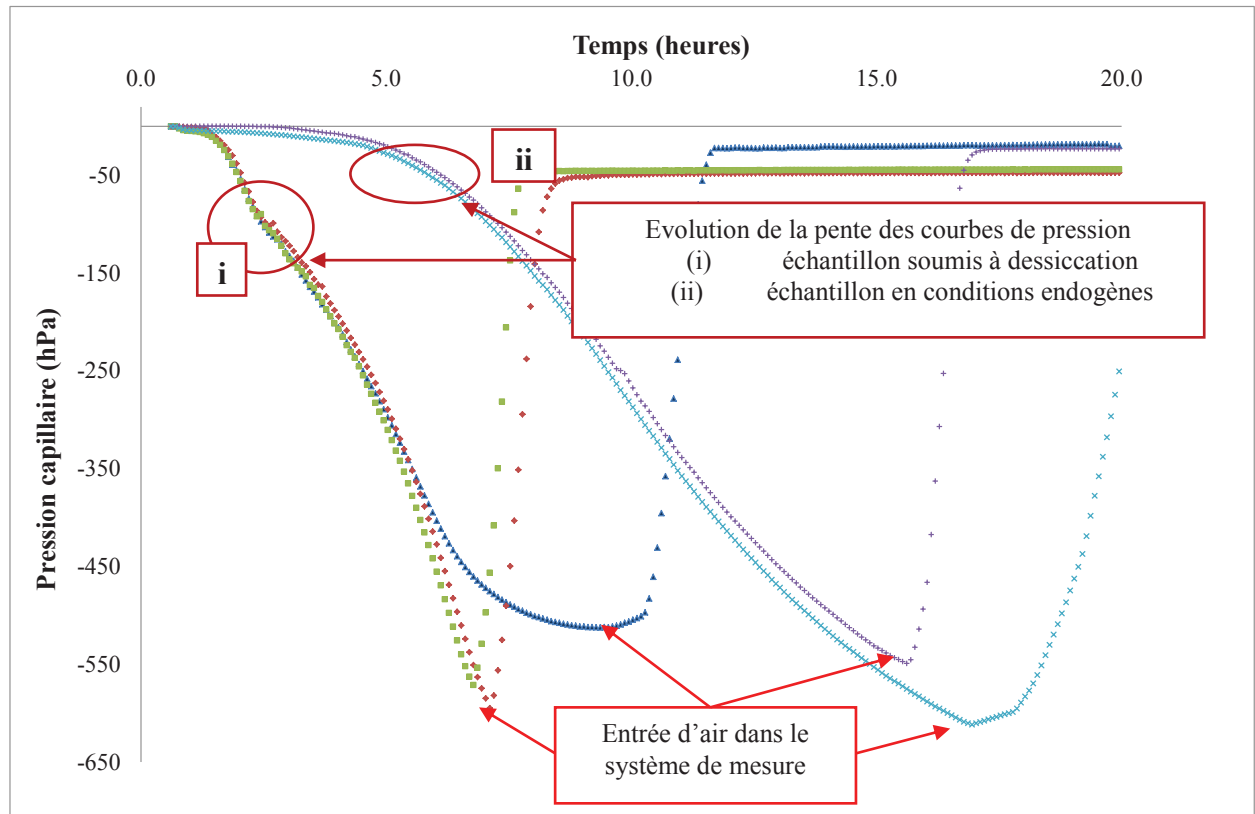


Figure 2- 21 : courbes de suivi des pressions capillaires au sein de deux échantillons moule soumis à dessiccation et moule en conditions endogènes

## 2.6 Evaluation du gradient de pression capillaire

Compte tenu des faibles écarts d'altimétrie entre les capteurs, les mesures de pression capillaire effectuées au sein du moule de retrait libre ne font pas apparaître de gradient de pressions capillaires significatif.

D'autres mesures ont donc été menées sur une éprouvette 16 x 32 équipée des 5 capteurs de pression capillaires aux profondeurs de 20, 64, 130, 190 et 300 mm comptées depuis la face supérieure de l'éprouvette, (figure 2-22).

Il faut ici remarquer que les deux capteurs supérieurs sont positionnés aux mêmes cotes que les capteurs haut et bas présents dans les moules 30 x 30. L'échantillon est soumis à des conditions de dessiccation identiques au sein du banc ventilé.

Ces essais qui ont été menés uniquement sur les bétons recyclés ont systématiquement mis en évidence des gradients de pressions capillaires.



Figure 2- 22 : vue générale d'une éprouvette cylindrique 16 x 32 pour mesure du gradient de pressions capillaires

## 2.7 Mesures de pertes d'eau

L'étude de la perte en eau d'échantillons soumis à dessiccation et en conditions endogènes a été menée à l'aide de deux moules cylindriques de diamètre 160 mm et de 84 mm de hauteur posés sur des balances de précision enregistreuses raccordées à un ordinateur, (figure 2-23).

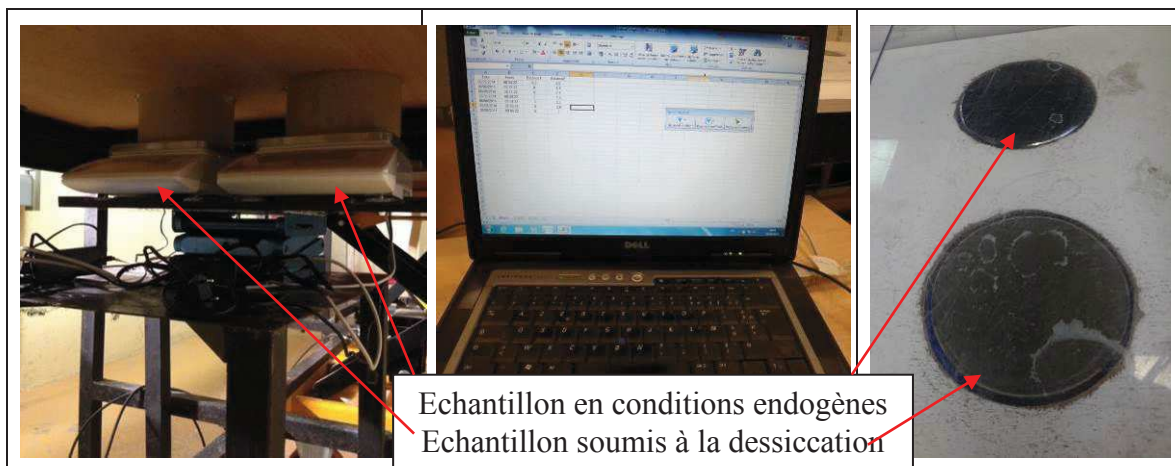


Figure 2- 23 : moyens de mesure de l'évaporation du béton frais, 1 échantillon soumis à la dessiccation et 1 échantillon en conditions endogènes

Chaque cylindre offre une surface d'évaporation  $S$  égale à  $200 \text{ cm}^2$  et l'évaporation est définie comme le rapport défini dans l'équation Eq(17).

$$E(t) = \frac{m_o - m(t)}{S} \quad \text{Eq (17)}$$

Le flux d'évaporation est obtenu par dérivation de l'évaporation par rapport au temps.

Les balances et l'enregistrement ont été calibrés par la mesure en continu d'une masse inerte sur près de 24 heures afin de vérifier in fine un retour à zéro parfait sans dérive, (figure 2-24). Ces mesures ont permis de mettre en exergue une oscillation de  $+ 3 / - 3$  grammes qui sont dus aux effets aérodynamiques dans le tunnel ventilé : légère surpression statique dans le tunnel qui peut être compensée par la turbulence.

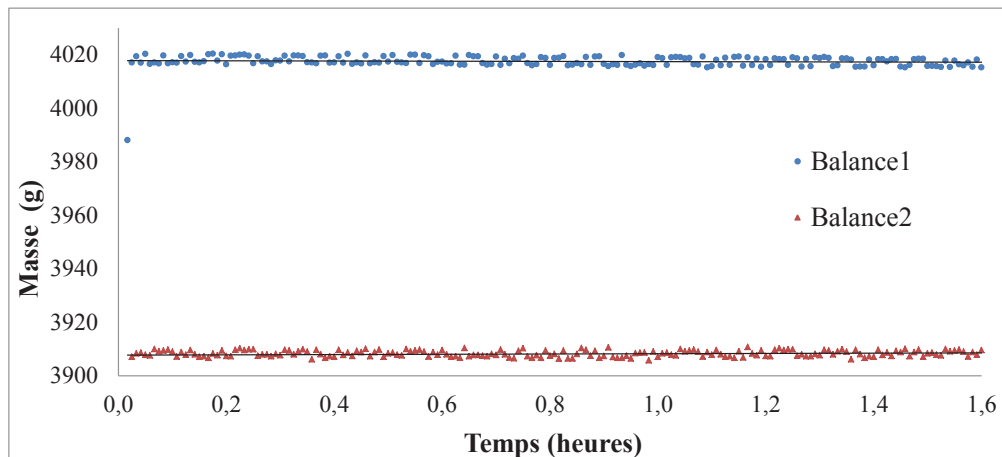


Figure 2- 24 : vérification de la dérive des balances au cours du temps

Les conditions endogènes sont obtenues par la mise en place d'un capot en plastique épais ainsi que d'un scotch aluminium sur tout la hauteur de l'éprouvette (8.4 cm) de manière à s'assurer d'aucune évaporation lors de l'essai, (figure 2-25).



Figure 2- 25 : moules utilisés pour les mesures d'évaporation et conditionnement de l'échantillon endogène

Des mesures comparatives avec l'évaporation d'une surface d'eau libre, placée dans les mêmes conditions thermodynamiques et de dessiccation, ont été réalisées. Globalement, on constate que les diagrammes des deux balances sont linéaires et quasiment parallèles.

Au fil des expériences successives, il a été établi que le flux d'évaporation massique moyen du plan d'eau libre est de l'ordre de  $1 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  ( $\pm 0.20$ ), (figure 2-26). Le flux mesuré est lié aux conditions expérimentales dont le niveau de remplissage du récipient qu'il faut rendre compatible avec la vitesse du vent et donc avec le risque de débordement.

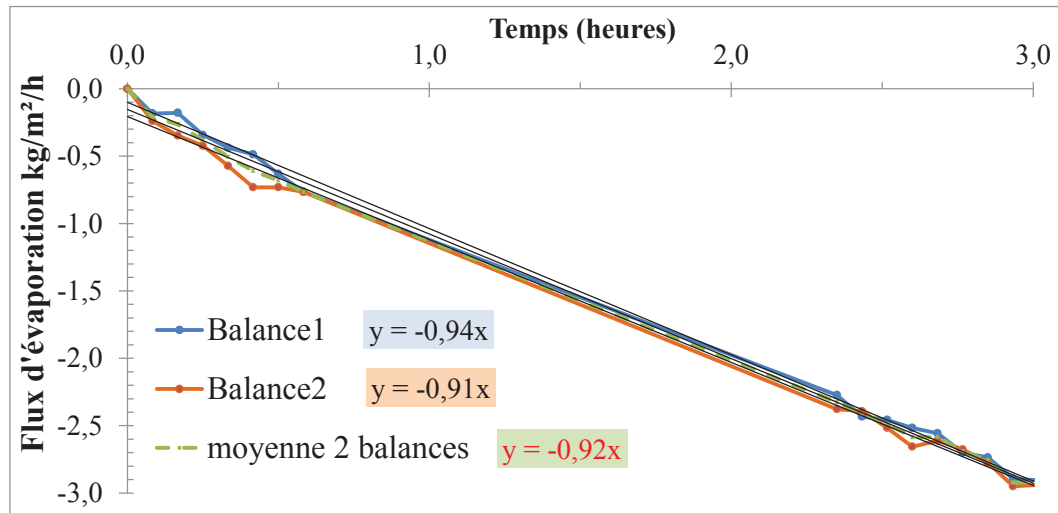


Figure 2- 26 : courbes d'évaporation de deux essais sur plan d'eau libre  
essai du 01 septembre 2014 mené en parallèle sur deux balances

Le tableau 2-10 récapitule la comparaison de quelques valeurs expérimentales avec des valeurs empiriques des formules de Uno et Menzel. Ces formules sont basées sur les formules de Dalton, Horton, Penman... qui sont applicables à des plans d'eau libres soumis à évaporation sous l'effet des conditions extérieures (température et vitesse de vent en particulier).

	Vent de 8 m/s	Vent de 5 m/s
Mesures de l'étude (moyenne ± écart type)	1,0 ± 0.20	0,6 ± 0.07
Mesures de (Mbemba, 2010)	//	0.4 à 0.45
Formules de Menzel – Uno d'après (Uno, 1998)	0,8 à 0,9 RH = 45 à 50 % ; T = 21 ° C	0,51 à 0,57 RH = 45 à 50 % ; T = 21 ° C

Tableau 2- 10 : comparaison de flux d'évaporation Kg / m<sup>2</sup>. h selon différentes sources

Selon l'abaque de l'ACI qui est rappelé figure 1-36 du chapitre 3.5.4.1, la cure serait nécessaire. Les essais sont donc menés dans des conditions de dessiccation très défavorables.

## 2.8 Estimation du temps de début de prise

Usuellement la mesure conventionnelle de la prise du béton est réalisée à l'aide d'essais à l'aiguille VICAT selon la norme (NF EN 193-3). En complément, le début de prise physique peut se mesurer par le développement de la pression capillaire dans le béton. Cette dépression traduit une consommation d'eau par les réactions d'hydratation (Amziane, 2006).

Pour des mortiers obtenus à partir de bétons tamisés à 5 mm. Amziane a mis en évidence que le début de prise « conventionnel » s'est toujours manifesté 3 à 4 h plus tard que le démarrage du développement de la pression capillaire dans le béton en conditions endogènes.



Les bétons étudiés dans ce rapport ont fait l'objet de mesures conventionnelles de la prise par aiguille VICAT ainsi que d'un suivi de la pression capillaire au sein du béton en conditions endogènes. Il a également été constaté un décalage entre la mesure de début de prise physique et la mesure de prise conventionnelle à l'aiguille VICAT de près de 4 heures.

Pour les trois bétons de bâtiment soumis à des conditions endogènes, la figure 2-27 montre l'évolution de la pression capillaire en fonction du temps. Après une variation initiale de quelques hPa, la pression capillaire reste ensuite constante pendant plus de deux heures à des valeurs comprises entre -1 et -2 hPa. Elle se développe ensuite franchement pour tous les bétons. Lorsque la fissuration intervient, (entre 1,7 h et 2,34 h selon les bétons, cf chapitre 4), la pression capillaire est comprise entre -2 et -5 hPa, valeurs qui restent faibles.

Ces constats permettent d'avancer que la période plastique est peu influencée par la consommation d'eau due aux réactions d'hydratation.

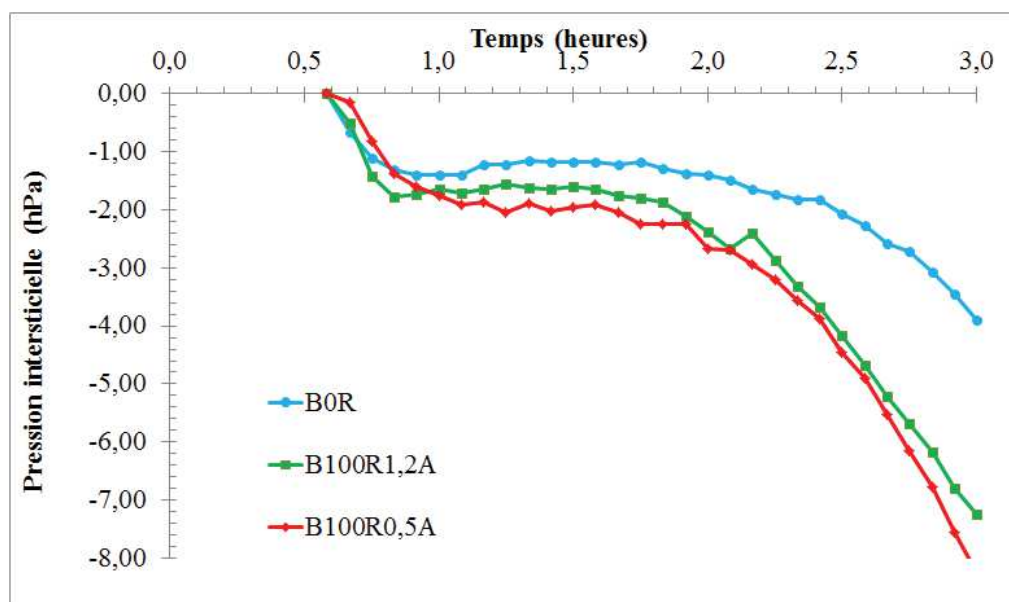


Figure 2- 27 : pressions capillaires en conditions endogènes =  $f(t)$ , bétons de bâtiment

Pour les trois bétons de génie civil, en conditions endogènes, l'évolution de la pression capillaire en fonction du temps est comparable aux bétons de bâtiment. Elle se développe lentement pour atteindre -4 hPa à  $t_0 + 1,5$  heures puis elle reste constante jusqu'à  $t_0 + 2,5$  heures environ.

Comme il sera vu au chapitre 4 § 1, lorsque la fissuration intervient au sein du moule de retrait gêné, la pression capillaire mesurée dans le moule en conditions endogènes vaut environ -5 hPa pour tous les bétons étudiés.

Le début de prise physique correspond à la consommation d'eau par les réactions d'hydratation et intervient essentiellement après 2 h 30.

Dans la mesure, où l'évolution de la pression capillaire dans le moule en conditions endogènes apparaît postérieurement à 2 h 30, il est bien vérifié que l'étude est bien relative à un béton plastique dans la phase dormante. Les réactions d'hydratation si elles ne sont pas inexistantes, restent cependant négligeables du point de vue de la consommation d'eau qu'elles peuvent provoquer au sein du béton. Le degré d'hydratation est donc très faible.

### 3 MESURES DES ECHANGES D'EAU GRANULATS RECYCLES / PATE

Ces expériences complémentaires à celles menées sur le banc ventilé ont été mises en place pour étayer certaines suppositions et hypothèses de transferts hydriques pâte-gravillons recyclés à la lumière de l'exploitation des premiers résultats.

L'objectif est de mettre en évidence et ainsi de mesurer des transferts hydriques entre les granulats recyclés et la pâte du béton au cours du temps sous l'influence de deux facteurs majeurs :

- le degré de pré-saturation des gravillons recyclés, 0,5A ou 1,2A
- les conditions extérieures : conditions endogènes ou séchage.

Le protocole est directement inspiré des expériences réalisées dans le cadre des travaux de thèse de (Bello, 2014) et dont le but est de mesurer la quantité d'eau présente au sein de granulats à fortes capacités d'adsorption en fonction du temps ; les granulats ont préalablement été extraits du béton et séparés de la pâte par un procédé de séparation mécanique. Le protocole de cet essai est présenté sur la figure 2-28.

L'objectif est de calculer l'adsorption des granulats recyclés à l'instant  $t$  et de mettre en lumière des corrélations éventuelles entre maniabilité et adsorption pour faire apparaître le rôle majeur des conditions de saturation initiale des granulats recyclés sur l'eau finalement présente dans la pâte.

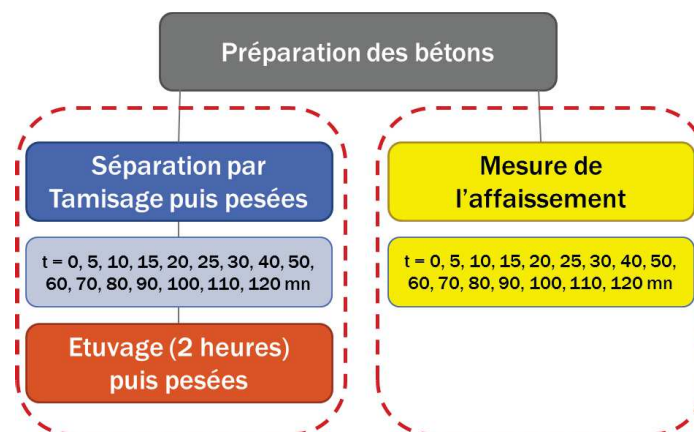


Figure 2- 28 : protocole de l'essai de mesure de l'adsorption des granulats recyclés =  $f(t)$

Les bétons testés sont des bétons recyclés B<sub>100R</sub> et Gc<sub>100R</sub> dont les granulats ont préalablement été pré-saturés à 1,2A ou 0,5 A.

Ces bétons sont mis en œuvre de la même manière que pour les échantillons du tunnel ventilé et sont placés au sein d'un moule spécial, fabriqué pour l'occasion (figure 2-29) qui est soumis :

- soit à des conditions endogènes, sous bâche
- soit à des conditions de séchage dans le tunnel ventilé à la place du moule de fissuration dont il a les mêmes dimensions en plan.

Ce moule comprend 12 compartiments égaux en volume (1685 cm<sup>3</sup>) et en surface (176,5 cm<sup>2</sup>) qui permettent le prélèvement de 12 échantillons identiques et dans des conditions répétables au fil du temps.

La profondeur de chaque compartiment est de 95 mm. Elle est comparable à la profondeur des moules utilisés dans le banc ventilé (84 mm).

La séquence des prélèvements va de un toutes les 6 minutes<sup>39</sup> environ durant la première demi-heure à un toute les 10 minutes ensuite.



*Figure 2- 29 : moule spécialement réalisé pour être placé dans le tunnel ventilé*

La séparation entre pâte et granulats est effectuée à l'aide d'un tamisage manuel énergique de 3 minutes environ, accompagné d'un brossage et d'un malaxage manuel pour faciliter la séparation de la pâte fraîche des granulats, (figure 2-29).

Les gravillons sont normalement à l'état SSS, toutefois la pâte de ciment adhérente aux graviers ne permet pas d'éliminer toute l'eau présente à la surface. L'échantillon est ensuite placé à l'étuve à 105 °C pendant 2h et la quantité d'eau évaporée sera mesurée par pesée de la différence avant et après étuvage.



*Figure 2- 30 : tamisage d'un échantillon à l'état initial (à gauche),  
obtention des granulats à mettre à l'étuve à l'état humide (au milieu)  
puis récupération des granulats secs après étuvage (à droite).*

Compte tenu de l'aspect très lourd de cet essai, 4 personnes se sont mobilisées pendant une journée complète, et dans la mesure où les résultats obtenus sont apparus satisfaisants, les essais ont été réalisés avec un minimum de répétabilité, soit 1 à 2 fois par béton testé.

Les dispersions obtenues pour ces essais sont précisées au chapitre 3 paragraphe 2.1.2.1 et sur les figures 3.6 à 3.9.

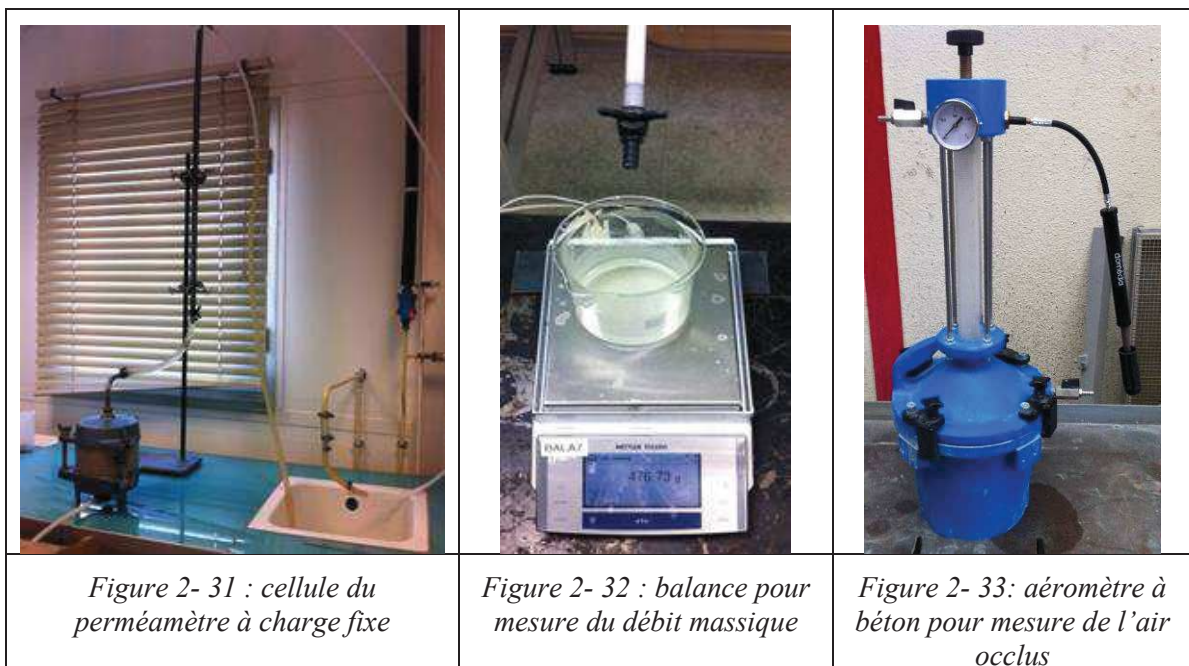
<sup>39</sup> Compte tenu du mode opératoire, il n'est pas possible de rapprocher les points de mesures à moins de 6 mn.

#### 4 MESURES DE LA PERMEABILITE A L'ETAT FRAIS ET DE L'AIR

Les six bétons étudiés dans ce travail ont fait l'objet de mesures de perméabilité à l'état frais.

Ces expériences viennent compléter les mesures de gradient de pression capillaire sous vent ainsi que les mesures des échanges hydriques entre pâte et granulats au cours du temps. Elles ont pour objectif la détermination directe des perméabilités du béton à l'état frais sous charge hydraulique fixe.

Conformément au chapitre 3.2.3, les mesures de perméabilité à l'état frais s'appuient sur une cellule de mesure de la perméabilité des sols sous charge fixe de 1,25 m soit 0,125 bar. L'appareillage est illustré sur la figure 2-31.



La cellule du perméamètre (diamètre 15,3 cm et hauteur 12,7 cm) est équipée en partie haute d'une plaque percée faisant office de diffuseur pour répartir le débit réparti sur la surface de l'échantillon et en partie basse d'une pierre poreuse filtrante. En complément des papiers filtres sont disposés en partie haute et basse et ne laissent passer que l'eau claire. Les parois de la cellule sont enduites de graisse de silicone pour éviter tout cheminement préférentiel à l'interface paroi-béton. Le débit massique est mesuré par récupération de l'eau au sein d'un récipient posé sur une balance de précision, (figure 2-32), raccordée à un ordinateur pour l'acquisition des données en continu.

Des mesures complémentaires ont également été réalisées. Il s'agit de la mesure de masse volumique du béton frais selon la norme (NF EN 12350-6) et la mesure d'air occlus (ou teneur en air) à l'aide d'un aéromètre à béton tel que représenté sur la figure 2-33 et conformément à la norme (NF EN 12350-7).

Le tableau 2-11 récapitule les principales valeurs caractéristiques des essais réalisés. Le temps de démarrage des mesures a été relativement constant et est pris par rapport à  $t_0$  qui est l'introduction de l'eau dans le malaxeur.

L'obtention du régime permanent dans la cellule a pu varier d'un essai à l'autre. C'est le temps de référence pour le calcul de la perméabilité à l'état frais.

	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R-1,2A</sub>	B <sub>100R-0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R-1,2A</sub>	Gc <sub>100R-0,5A</sub>
Début des mesures (mn's'')	9'00"	12'45"	9'43"	9'54"	10'15"	9'10"
Obtention du régime permanent	18'00"	16'45"	29'43"	10'00"	40'15"	17'10"
Masse volumique béton frais (kN/m <sup>3</sup> )	2385	2214	2199	2412	2263	2239
Air occlus (%)	0,9	1,8	2,9	1,0	1,9	2,7
E/L initial, en entrée malaxeur	0,59	0,60	0,60	0,48	0,45	0,45

Tableau 2- 11 : principaux résultats des essais effectués.

Les essais de perméabilité ont duré 2,5 heures depuis le démarrage des mesures. La répétabilité des mesures a été vérifiée en doublant les mesures et en vérifiant l'obtention du même ordre de grandeur de perméabilité.

A la fin de l'essai, le béton a été démoulé et on observe une compacité qui traduit un processus de consolidation. En effet, l'échantillon reste entier et très compact, conformément à la figure 2-34, alors que le béton n'a pas encore fait prise.



Figure 2- 34 : échantillon de béton à l'issue d'un essai de mesure de perméabilité au perméamètre à charge fixe

## 5 MESURES ET INCERTITUDES

L'objet de ce chapitre est de préciser la précision et les écarts des mesures effectuées pour avoir une vision critique des résultats. Cela concerne d'une part la précision des appareils de mesure et d'autre part, la validation phénoménologique des résultats obtenus.

### 5.1 Précision des appareils de mesure

L'exploitation des résultats expérimentaux nécessite de se poser la question de la précision de la mesure et de l'erreur qui est produite.

Dans le cadre des travaux expérimentaux exposés dans ce rapport, les essais effectués utilisent essentiellement trois appareillages :

- les balances de précision « Sartorius » pour les mesures des masses dont la précision de mesure est de  $\pm 0,1$  g. Les grandeurs mesurées comme les pertes en eau vont représenter plusieurs grammes (de l'ordre de 6-8 g) soit une erreur de 1.5 % environ
- les capteurs de pression interstitielles dont la sensibilité est de 6.67 mv par psi soit  $9.67 \cdot 10^{-7}$  Volt / pascal. Leur précision est donnée égale à 0.2 % par le constructeur
- les capteurs de déplacement laser dont la plage de mesure est de + 20mm à - 30 mm avec une sensibilité de 2 mm/V. Les connecteurs correspondants (ZA9602-FS4) dont la plage va de -1V à + 5.5 V délivrent le signal à  $\pm 0.1$  mV soit  $2 \cdot 10^{-4}$  mm. Compte tenu des mesures de retrait ou de tassement obtenues qui sont de l'ordre de 0.2 à 0.3 mm, l'erreur de mesure représente 0.1 %.

Les erreurs de mesure détaillées ci-dessus sont négligeables et ne sont pas corrigées dans l'interprétation des résultats.

### 5.2 Effet du protocole de fabrication sur les mesures

Des essais comparatifs au banc ventilé ont été réalisés avec la formulation  $B_{OR}$ . Ces essais comparatifs ont pour but de démontrer que le protocole de fabrication et de pré-saturation en particulier n'influent pas sur les résultats obtenus :

- le premier béton  $B_{OR}$  est un béton comprenant des sables et graviers naturels qui sont pré-saturés dans le malaxeur avant introduction des autres constituants et de l'eau,
- le deuxième béton  $B_{ORsec}$  est un béton réalisé à l'aide de granulats introduits secs dans le malaxeur. Toute l'eau y compris l'eau de saturation des granulats est introduite en eau d'ajout comme indiqué dans le tableau 2-4.

Pour les deux bétons, l'eau totale est identique. Les résultats comparés sont les pressions capillaires, la moyenne des retraits horizontaux mesurés selon les deux directions orthogonales, l'âge de fissuration et la valeur caractéristique de l'ouverture de fissure.

Ces résultats sont présentés au sein du tableau 2-12 et de la figure 2-35.

	âge de fissuration (h)	Ouverture de fissure $W_k$ (mm)	Valeur du retrait à la fissuration ( $\mu\text{m/m}$ )	Pression capillaire à la fissuration (hPa)
$B_{0R}$ essai 1	2	0,78	1234	80,4
$B_{0R}$ essai 2	2,17	0,71	1114	95,7
$B_{0Rsec}$ essai 1	1,98	0,75	1120	76,3
$B_{0Rsec}$ essai 2	2,15	0,75	1140	83,8

Tableau 2- 12 : principales valeurs comparatives des bétons  $B_{0R}$  et  $B_{0Rsec}$

L'analyse des résultats du tableau 2-12 amène les commentaires suivants :

- les âges de fissuration sont identiques deux à deux : 2 h – 1,98 h et 2,17 h – 2,15 h
- les ouvertures de fissures sont similaires,  $B_{0R}$  (0.71 à 0.78 mm) et  $B_{0Rsec}$  (0.75 mm)
- les valeurs de retrait plastique à la fissuration sont comparables : < 8 % d'écart
- les valeurs de pression capillaire à la fissuration sont du même ordre : 5 à 13 % d'écart.

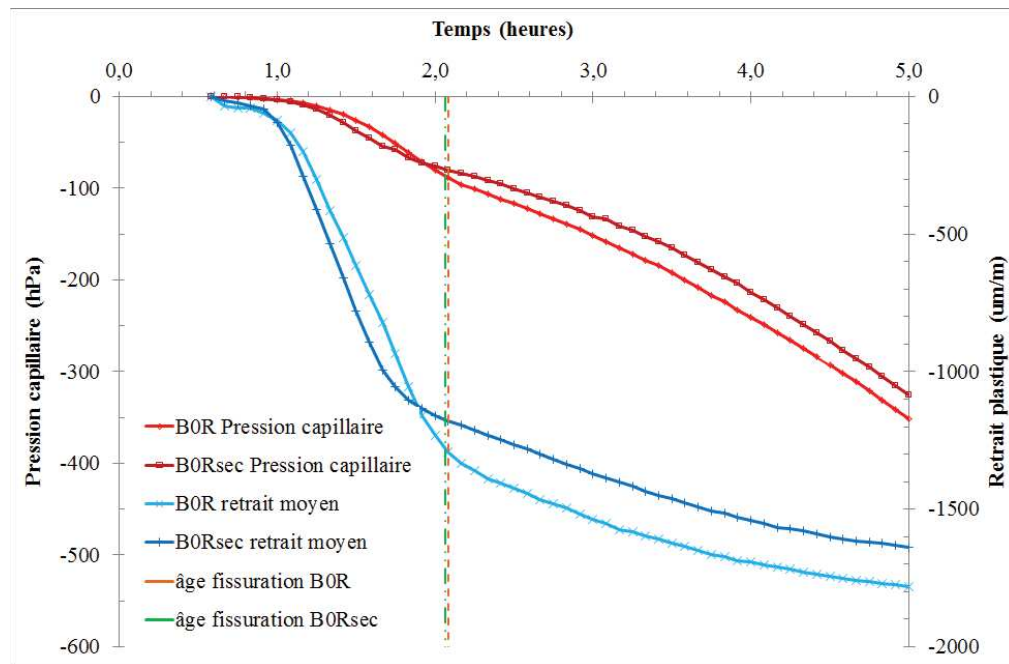


Figure 2- 35 : comparaison entre le béton naturel  $B_{0R}$  à granulats pré-saturés et le béton  $B_{0Rsec}$  à granulats secs dans le malaxeur

L'analyse des courbes de la figure 2-35 met en lumière des allures similaires entre les deux bétons comparés que ce soit pour les pressions capillaires ou pour le retrait plastique.

L'objectif est donc atteint, il est montré que pour des granulats naturels ayant une capacité d'absorption usuelle, le mode de fabrication et plus particulièrement le protocole de saturation et de pré-saturation des granulats n'a pas d'impact sur les résultats obtenus pour les bétons de bâtiment..

### 5.3 Isotropie des mesures de retrait

Les courbes relatives à tous les bétons sont données en annexe 2 et sont assez similaires à la courbe 2-36 ci-dessous.

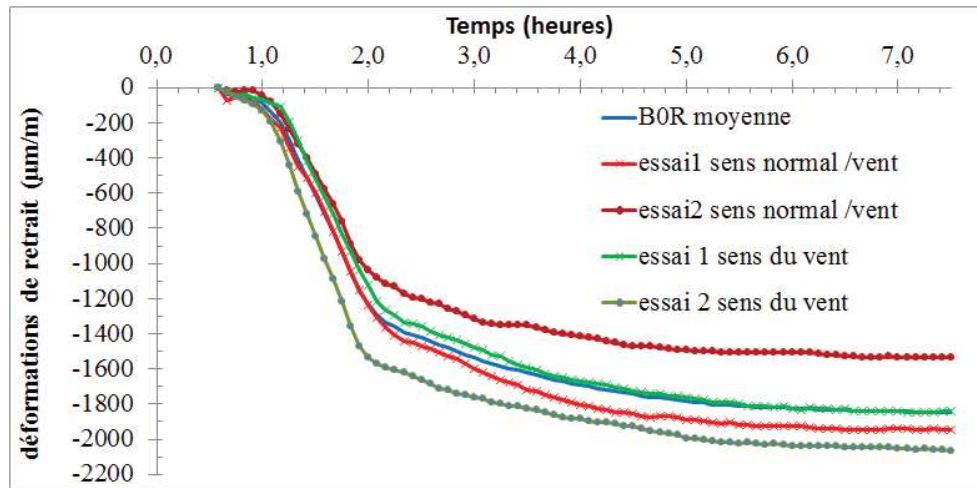


Figure 2- 36 : déformations horizontales de retrait libre en fonction du temps  $B_{OR}$

L'analyse des courbes de retrait ne permet pas de faire apparaître une anisotropie marquée due à la direction de vent sur les mesures de retrait. Les mesures dans le sens parallèle ou perpendiculaire au vent donnent des résultats alternativement au-dessus ou au-dessous de la moyenne en fonction des essais.

Pour le béton  $Gc_{OR}$ , courbe donnée en annexe 2, le retrait mesuré dans le sens du vent des deux essais est légèrement supérieur à celui qui est mesuré dans la direction perpendiculaire. Toutefois, au moment de la fissuration, 3 courbes sur 4 sont quasiment confondues avec des écarts extrêmes de quelques dizaines de micromètres par mètre soit quelques pourcents d'écart.

L'analyse des courbes des bétons recyclés  $B_{100R}1,2A$ ,  $B_{100R}0,5A$ ,  $Gc_{100R}1,2A$ ,  $Gc_{100R}0,5A$  qui sont également fournies en annexe 2, ne met pas en évidence l'existence d'une anisotropie des mesures horizontales de retrait. Les constats faits ci-dessus pour les bétons témoins sont généralisables aux bétons recyclés.

Aucun des deux bétons témoins ou des quatre bétons recyclés ne fait apparaître d'anisotropie des mesures horizontales du retrait plastique en fonction de la direction du vent.

Le tableau 2-13 présente les écarts maximums entre les valeurs mesurées et la moyenne des deux mesures, sens parallèle ou perpendiculaire au vent. Ces valeurs sont proposées pour les six bétons étudiés et pour des temps caractéristiques qui seront développés ultérieurement au chapitre 4 mais qui seront ici appelés « âge d'apparition de l'ouverture de fissure » et « âge de mesure de l'ouverture de fissure ».

	$B_{OR}$	$B_{100R}1,2A$	$B_{100R}0,5A$	$Gc_{OR}$	$Gc_{100R}1,2A$	$Gc_{100R}0,5A$
T apparition de la fissure						
essai 1	3,7 %	1,2%	8,9%	6,8%	3,3%	0,6%
essai 2	15 %	13%	3,6%	0,4%	13%	4,4%
T mesure de la fissure						
essai 1	2,7 %	1,6%	6,7%	6,6%	4,6%	1,8%
essai 2	14%	10%	5,6%	2%	12,8%	3,5%

Tableau 2- 13 : écarts entre valeurs mesurées et moyennes au temps caractéristiques



Compte tenu des écarts constatés dans le tableau 2-13, il résulte de ces analyses, que les courbes de retrait à exploiter seront des moyennes du retrait plastique mesuré parallèlement et perpendiculairement à la direction du vent.

## 5.4 Evaluation du retrait thermique

Ce paragraphe a pour but de quantifier la valeur du retrait thermique qu'il convient de retrancher au retrait plastique mesuré pour ne conserver que le retrait de dessiccation. Pour satisfaire cet objectif, il est nécessaire d'effectuer une première analyse des courbes de températures dans le tunnel ventilé et au cœur des bétons. Il est rappelé que la salle est maintenue en conditions isothermes à  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$  contrairement aux moules et aux échantillons de béton qui ne sont pas en conditions isothermes.

### 5.4.1 Suivi des paramètres $T$ et $RH$

La température dans le banc est contrôlée en amont et en aval de même que le degré hygrométrique  $RH$ .

Au cours des essais, la température de l'air dans le banc est du même ordre de grandeur durant toute la durée de l'expérience. En général, elle est légèrement plus élevée à l'amont qu'à l'aval du banc mais avec toujours moins d'un demi-degré de différence. Le degré d'hygrométrie est constant (moins de 0,5 % d'écart) entre la mesure amont et la mesure aval dans le banc. Il varie au cours de l'essai de 50-52 % au début à 46-48 % après 7 h.

Pour tous les bétons testés, sans exception, les courbes de température issues des thermocouples implantés à cœur des bétons, à mi-hauteur font apparaître des allures illustrées par les courbes 2-37 et 2-38. Ces deux essais font apparaître les variations thermiques les plus importantes pour le béton  $Gc_{100R0,5A}$  qui est le plus pauvre en eau (figure 2-37) et le béton  $B_{100R1,2A}$  qui est le plus riche en eau (figure 2-38).

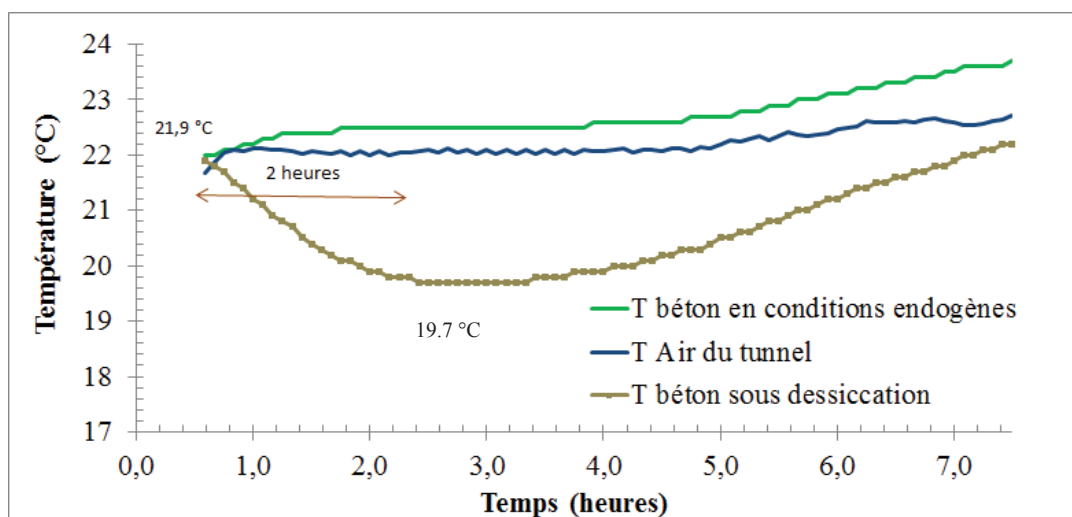


Figure 2- 37 : évolution des températures lors d'un essai, béton  $Gc_{100R0.5A}$  du 22 aout 2014

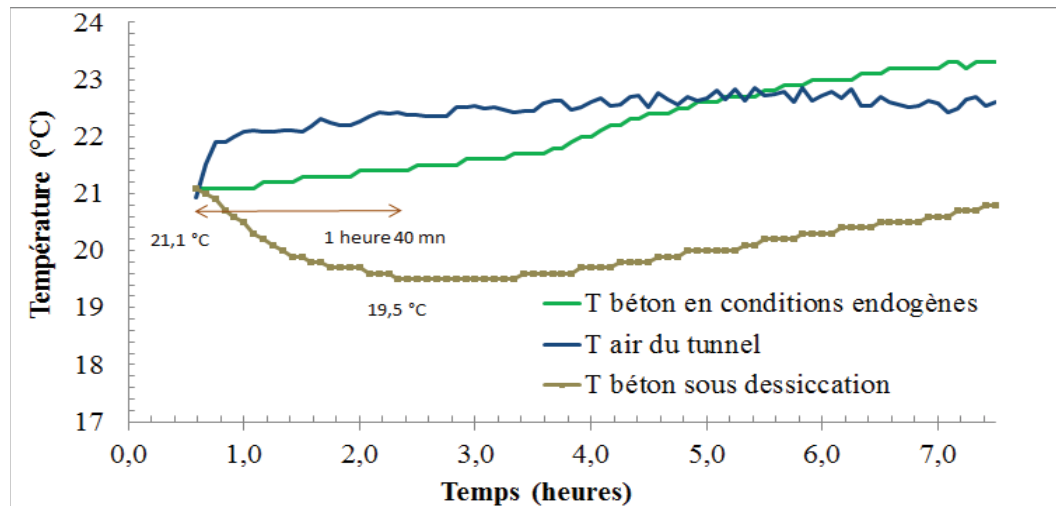


Figure 2- 38 : évolution des températures lors d'un essai, béton  $B_{100R1.2A}$  du 05 juin 2014

Les observations sont les suivantes :

- la température initiale est contrôlée à la sortie du malaxeur et est comprise entre 20 et 22 ° C en fonction de campagne d'essais, printemps ou automne 2014. Cette température est cohérente avec la température mesurée sur le banc en début d'essai
- pour les bétons soumis à dessiccation, la température commence systématiquement par baisser de 1 à 2 ° C sur les 1,5 à 2 premières heures puis est constante durant 1 heure environ. Au-delà, la température du béton remonte quasiment linéairement
- pour les bétons en conditions endogènes, la température reste quasi constante ou s'élève très légèrement (1/2 degré) durant les 4 premières heures. Ensuite, la courbe s'infléchit et la variation à la hausse s'accélère. La courbe est alors linéaire et est généralement approximativement parallèle à la courbe de température du béton sous séchage.

Les figures 2-37 et 2-38 mettent en lumière les conditions thermiques très différentes entre le moule soumis à dessiccation et le moule en conditions endogènes. Par ailleurs, les mesures font apparaître un possible couplage séchage–changement de phase de l'eau–température du béton. Ce sujet sera développé dans le chapitre 5 du présent rapport.

L'élévation de température dans les bétons vers 3,5 heures peut traduire le début des réactions d'hydratation qui sont exothermiques et qui commencent à dégager de la chaleur.

#### 5.4.2 Evaluation du retrait thermique

En considérant les courbes où l'amplitude du refroidissement est la plus forte, (figure 2-37), on obtient une perte de 2,2°C en 2 h. Ce refroidissement multiplié d'un coefficient thermique va donner une déformation de retrait thermique ( $\epsilon_T$ ) selon l'équation Eq(18).

$$\epsilon_T = \mu \cdot \Delta T \quad \text{Eq (18)}$$

Le coefficient thermique de « retrait » le plus grand issu de la littérature est de 13  $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ . Pour Laplante et al (1994), le coefficient thermique de « retrait » est approximativement à la moitié du coefficient thermique de « dilatation ».

S'il est considéré qu'un majorant du coefficient de retrait peut être obtenu en considérant la moitié du plus grand coefficient de dilatation pour un béton au jeune âge issu de la bibliographie soit  $90 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$  (Loukili et al., 2000), on obtient alors un coefficient de « retrait » enveloppe de  $45 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ .

Le tableau 2-14 donne la valeur de retrait thermique « probable », calculée sur la base du coefficient de retrait issu de la bibliographie et la valeur « enveloppe » issue du calcul défavorable précédent.

	Coefficient thermique de retrait ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ )	Amplitude thermique $^\circ\text{C}$	Retrait thermique $\mu\text{m} / \text{m}$	Retrait mesuré total $\mu\text{m} / \text{m}$
Valeur probable	13	2,2	28,6	1600 à 2000
Valeur enveloppe	45	2,2	99	1800 à 2200

Tableau 2- 14 : valeurs de retrait thermique à comparer au retrait plastique mesuré

La valeur calculée maximale,  $99 \mu\text{m}/\text{m}$  est comparables aux valeurs de retrait thermiques calculées par (Mbemba, 2010) :  $170 \mu\text{m}/\text{m}$  environ pour une variation de température de -3 à 4 degrés..

La comparaison des valeurs de retrait thermique avec les valeurs de retrait plastique total mesuré souligne que le retrait thermique apporte à l'échantillon au maximum 2 à 5 % de marge d'erreur.

Compte tenu, premièrement, des conditions de détermination des coefficients thermiques dans la bibliographie, conditions endogènes, coffrages souples, conditions adiabatiques, deuxièmement, du couplage séchage – température du béton sous vent, et troisièmement de la faible « erreur » engendrée par le retrait thermique, il est décidé de ne pas corriger les valeurs de retrait mesuré par le retrait thermique calculé.

Cela va dans le sens de la figure 2-39 proposée par (Loukili et al., 2000), qui ne corrige pas « thermiquement » les mesures faites lors des deux premières heures.

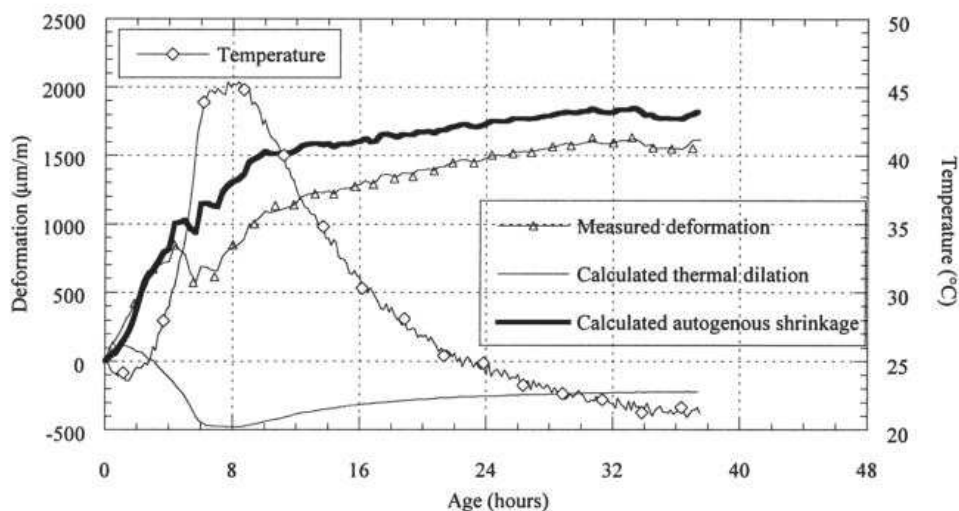


Figure 2- 39 : correction du retrait mesuré par le retrait thermique pour un béton s'élevant à  $45^\circ\text{C}$

## 6 CONCLUSION DU CHAPITRE 2

Ce chapitre qui est relatif aux conditions expérimentales de l'étude a permis de :

- préciser quels sont les matériaux utilisés
- détailler les formules de béton du projet Recybéton qui ont été employées
- décrire les moyens expérimentaux utilisés tels que le banc ventilé ou encore l'essai de séparation des gravillons recyclés de la pâte pour l'étude des transferts hydriques au sein du béton et au cours du temps.

Ce chapitre a également mis l'accent sur les incertitudes des mesures. C'est ainsi qu'il a été montré que :

- le protocole de fabrication des bétons naturels de bâtiment n'avait pas d'effet sur les résultats des mesures
- les mesures horizontales de retrait plastique sont comparables dans deux directions orthogonales, ce qui traduit le caractère isotrope du retrait plastique
- dans les présentes conditions d'essais, le retrait thermique présente des valeurs suffisamment faibles pour pouvoir s'abstenir de corriger les valeurs de retrait plastique.

Ce chapitre a enfin montré que les résultats obtenus étaient suffisamment répétables pour autoriser une exploitation correcte des mesures et des résultats obtenus.

Page laissée intentionnellement blanche.

## **CHAPITRE 3 : INFLUENCE DU DEGRE DE SATURATION INITIAL DES GRANULATS RECYCLES SUR LES CARACTERISTIQUES DU BETON RECYCLE**

En premier lieu, l'étude proposée dans ce chapitre porte sur les transferts hydriques au sein du béton, entre gravillons recyclés et pâte. Le premier objectif est de montrer que dans certaines conditions de séchage et en fonction du degré de pré-saturation des gravillons recyclés, ces transferts d'eau peuvent exister. Le deuxième objectif est de les mesurer.

A la lumière des résultats obtenus, l'impact des échanges d'eau gravillons recyclés-pâte sera évalué sur des paramètres tels que le rapport E/L ou le volume de pâte. L'hypothèse usuelle qui consiste à dire que l'absorption nominale des gravillons (A) est effective dans le malaxeur sera alors vérifiable pour les gravillons recyclés.

Enfin, ce chapitre détaille l'étude de l'influence du degré initial de saturation des granulats et des transferts hydriques gravillons-pâte sur les caractéristiques du béton à l'état frais (ouvrabilité) et durci (résistances).

### **1 CALCULS PREALABLES**

Au préalable, il est nécessaire d'étudier l'absorption des granulats recyclés selon la norme (NF EN 1097-6). Par ailleurs, les conditions de séchage dues au vent doivent être quantifiées.

#### **1.1 Absorption des granulats**

##### **1.1.1 Valeur de l'absorption selon la norme EN1097-6.**

L'absorption à l'eau des granulats du projet national RECYBETON a été mesurée par différents laboratoires partenaires du projet (Sedran, 2013) (Nam et al., 2014) (LE, 2015). Le tableau 3-1 récapitule quelques valeurs mesurées selon la norme (NF EN 1097-6).

Pour les granulats naturels, les valeurs des fiches techniques « fournisseurs » sont également prises en compte. Compte tenu des faibles écarts entre les différentes mesures, les valeurs de la fiche technique des granulats sont retenues dans la présente étude.

Matériaux	IFSTTAR (Sedran, 2013)	C2MA (LE, 2015)	Fiches techniques	Valeurs retenues dans l'étude
Sable naturel 0/4	0,8 %	1 %	1 %	<b>1 %</b>
Gravillon naturel 4/10	0,51 %	0,64 %	0,62 %	<b>0,62 %</b>
Gravillon naturel 6,3/20	0,46 %	0,46 %	0,57 %	<b>0,57 %</b>

*Tableau 3- 1 : coefficient d'absorption d'eau des granulats naturels à 24 h selon NF EN 1097*

Pour les granulats recyclés, le tableau 3-2 compare les valeurs mesurées de quelques laboratoires partenaires du projet RECYBETON.

Gravillons recyclés	IFSTTAR (Sedran, 2013)	Eurovia	L2MGC	C2MA (LE, 2015)	Moyenne (Ecart type)	Coef de variation	Valeurs retenues
4/10	5,6 %	5,6 %	6,2 %	6,35 %	5,94 % - (0,39 %)	6,6 %	<b>5,6 %</b>
10/20	5,8 %	5,8 %	5,8 %	6,21 %	5,90 % - (0,21 %)	3,5 %	<b>5,8 %</b>

Tableau 3- 2 : coefficient d'absorption d'eau des gravillons recyclés à 24 h selon NF EN 1097

Les valeurs moyennes sont proches de 6%. Les coefficients de variation relatifs aux valeurs extrêmes restent faibles. Par conséquent, pour rester fidèle au rapport de formulation des bétons du projet RECYBETON (Sedran, 2013), ces valeurs sont reconduites.

### 1.1.2 Cinétiques d'absorption

Les cinétiques d'absorption à l'eau des gravillons recyclés ont été étudiées (Laneyrie et al., 2014) (LE, 2015). Elles peuvent être caractérisées à l'aide de la norme (NF EN 1097-6) dont un chapitre est relatif aux granulats légers (Laneyrie et al., 2014) ou bien par pesées hydrostatiques (LE, 2015).

La figure 3-1 fournit la valeur cumulée de l'absorption des gravillons recyclés en fonction du temps et pour deux fractions granulaires 4-10 et 10-20 mm. Ces valeurs sont issues du rapport du projet RECYBETON de Laneyrie et al., (2014). Pour un intervalle de temps de 10 minutes, la figure 3-1 représente également les dérivées de l'absorption en fonction du temps. Elles sont issues des travaux de (LE, 2015).

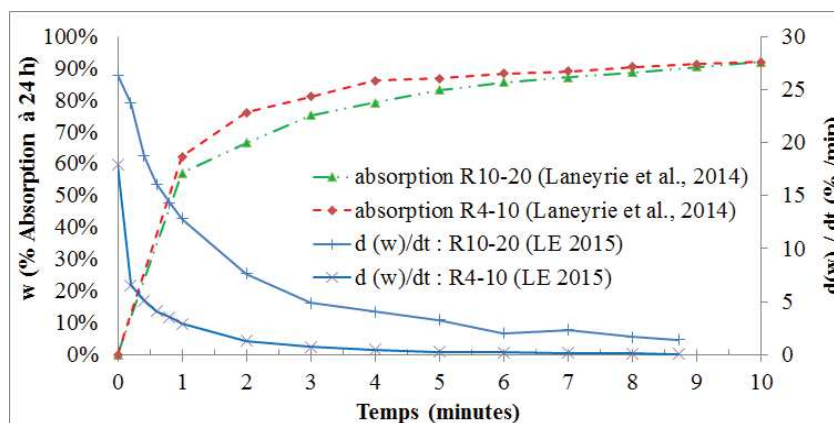


Figure 3- 1 : absorption en fonction du temps sur un intervalle de 10 mn, (Laneyrie et al., 2014)  
Dérivées de l'absorption des gravillons par le temps, (LE, 2015).

Les valeurs initiales de la dérivée sont grandes : 18 à 27 pour les fractions granulaires 4-10 et 10-20 mm. Puis au bout de 90 secondes, soit la durée de malaxage des bétons, elles ont déjà chuté brutalement pour atteindre des valeurs de l'ordre de 7 à 2. L'absorption des gravillons recyclés est donc très rapide. A 5 et 10 mn, elle vaut respectivement 85 % et 92 % de l'absorption à 24 h (Laneyrie et al., 2014).

L'absorption rapide des gravillons recyclés est confirmée dans la littérature par Mefteh et al., (2013) et Belin et al., (2013) dont les études montrent qu'ils absorbent plus de 80 % de l'absorption nominale à 24 h après 15 minutes.

### 1.1.3 Valeurs du rapport E/L

Conformément au chap 2. § 1.1, l'eau efficace se déduit de l'eau totale en enlevant l'eau absorbée par les granulats à hauteur de leur absorption nominale (1A). Pour des granulats naturels, cette absorption est en général considérée comme effective dès la sortie du malaxeur.

Dans un premier temps, il est émis l'hypothèse qu'il en est de même pour les granulats recyclés. Le tableau 3-3 précise les valeurs associées du rapport E/L en entrée et en sortie de malaxeur..

	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R 1,2A</sub>	B <sub>100R 0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R 1,2A</sub>	Gc <sub>100R 0,5A</sub>
E/L en entrée de malaxeur granulats recyclés pré-saturés à 0,5A ou 1,2A	0,59	0,60	0,60	0,48	0,45	0,45
E/L en sortie de malaxeur granulats recyclés saturés à 1A	0,59	0,60	0,52	0,48	0,45	0,38

Tableau 3- 3 : valeurs du rapport E/L des six bétons étudiés en entrée et en sortie du malaxeur.

Rappel : les bétons B<sub>0R</sub> et Gc<sub>0R</sub> sont fabriqués à partir de granulats naturels pré-saturés dans le malaxeur conformément au protocole de fabrication explicité dans le tableau 2-4.

## 1.2 Séchage sous vent et perte d'eau

Sans vent, le flux d'évaporation mesuré est de l'ordre de 0,10 à 0,20 kg/m<sup>2</sup>.h. Ces valeurs sont conformes aux valeurs de la littérature (Turcry, 2004) (Mbemba, 2010). Dans le cas d'une étude sous séchage avec vent, les flux de séchage mesurés vont être beaucoup plus importants.

### 1.2.1 Bétons de bâtiment

La figure 3-2 représente les courbes de perte de masse d'eau mesurée en fonction du temps et ramené à 1 m<sup>2</sup> sur les trois premières heures de l'essai et pour les trois bétons de bâtiment.

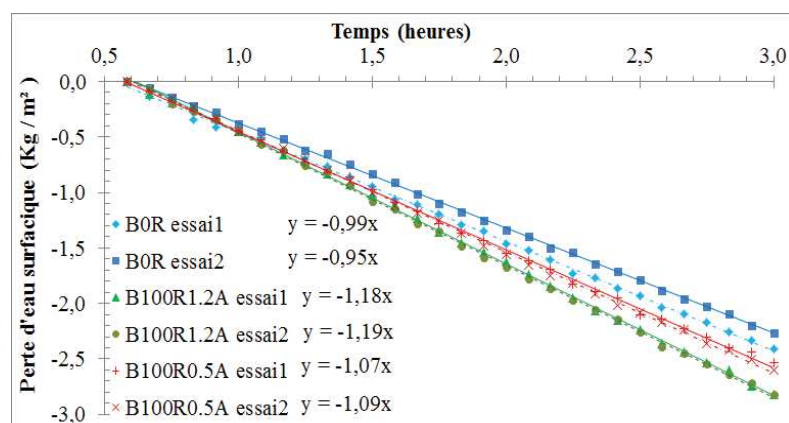


Figure 3- 2 : pertes de masse (par m<sup>2</sup>) des bétons de bâtiment et flux de séchage (pente à l'origine)

Les courbes de perte de masse sont linéaires. Les droites de régression qui donnent les pentes affichées sur la figure 3-2 sont obtenues avec des coefficients de corrélation de 0,99 à 1,00. Les pentes de ces droites caractérisent le flux d'évaporation surfacique de chaque béton qui varie de 0,95 à 1,19 Kg/ m<sup>2</sup>.h.



Ces valeurs de flux sont du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées pour un plan d'eau libre ( $1 \pm 0,2 \text{ Kg/m}^2.\text{h}$ ), conformément au tableau 2-10, chap 2. § 2.7. En effet, les observations visuelles lors des expériences ont mis en évidence une fine pellicule d'eau en surface due au ressuage de ces bétons (figure 3-3) qui justifie cette adéquation.



Figure 3- 3 : pellicule d'eau ressuee en surface du béton B100R1,2A, essai du 02 avril 2014.

Les flux de séchage déterminés pour les bétons de bâtiment sont cohérents avec les valeurs de la littérature (Turcry, 2004). Elles correspondent également à la valeur de flux théorique de  $1 \text{ kg/m}^2.\text{h}$  calculée à l'aide de l'ACI308R91 grâce à l'abaque du 3.5.5.1 du chapitre 1.

### 1.2.2 Bétons de génie civil

La figure 3-4 représente les courbes de perte de masse d'eau mesurée en fonction du temps et ramenée à  $1 \text{ m}^2$  sur les trois premières heures de l'essai et pour les trois bétons de génie civil.

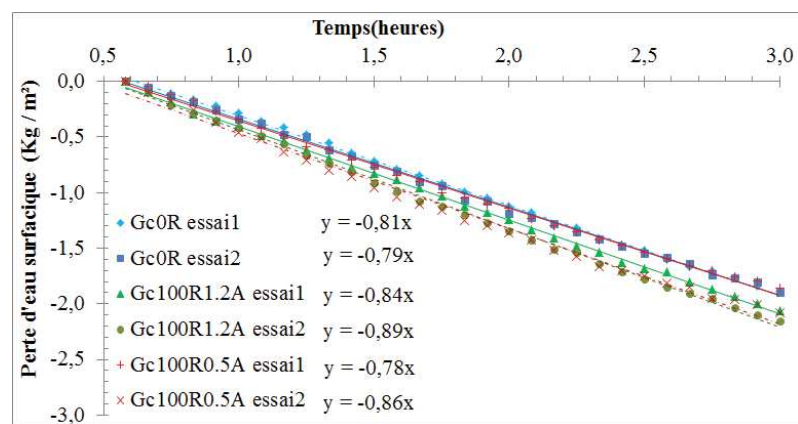


Figure 3- 4 : perte de masse (par  $\text{m}^2$ ) des bétons de GC et flux de séchage (pente à l'origine)

Comme pour les bétons de bâtiments, ces courbes sont linéarisables. Les flux (pentes des droites) varient de 0,80 environ pour le béton naturel Gc<sub>0R</sub> à 0,78 à 0,89 pour les bétons recyclés Gc<sub>100R0,5A</sub> et Gc<sub>100R1,2A</sub>.

Holt and Leivo (2004) et Boshoff and Combrinck (2013) obtiennent des valeurs de flux du même ordre pour des bétons similaires aux bétons Gc<sub>0R</sub> en termes de rapport E/C.

### 1.2.3 Synthèse

Le tableau 3-4 récapitule les valeurs de flux de séchage mesurés pour les six bétons étudiés.

flux surfacique de séchage J : (Kg/m <sup>2</sup> . h)	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R</sub> 1.2A	B <sub>100R</sub> 0.5A	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R</sub> 1.2A	Gc <sub>100R</sub> 0.5A
Essai 1	0,99	1,18	1,07	0,81	0,84	0,78
Essai 2	0,95	1,19	1,09	0,79	0,89	0,86
Flux moyen Moyenne essai 1 – essai 2	0,97	1,19	1,08	0,80	0,87	0,82

Tableau 3- 4 : flux d'évaporation d'eau des bétons recyclés de bâtiment et de génie-civil

La comparaison entre bétons montre que les valeurs des flux d'évaporation surfaciques des bétons de génie-civil sont inférieures de 18 à 27% aux valeurs obtenues pour les bétons de bâtiments globalement plus riches en eau. En effet, pour les bétons de génie civil, l'eau de ressuage n'existe pas. L'eau est présente uniquement dans les pores ce qui diminue la surface d'échange et par conséquent le flux de perte de masse (Turcry, 2004).

Ces observations sont cohérentes avec les résultats de Mbemba, 2010 qui a étudié des bétons ordinaires sous un vent de 5 m/s. Dans cette étude, des flux initiaux (3 premières heures) moins importants sont obtenus pour des bétons dont le rapport E/C diminue : valeurs de flux de 0,7 et 0,5 kg/m<sup>2</sup>.h pour des rapports E/C respectifs de 0,6 et 0,45.

Par ailleurs, la variation entre deux essais relatifs à un même béton est faible : moins de 5% d'écart entre les valeurs de l'essai et la moyenne. Par conséquent, pour la suite de l'étude, la connaissance du flux moyen par type de béton (tableau 3-4) permettra de déterminer la perte de masse (P<sub>m</sub>) d'un moule de surface A à un temps t selon l'équation Eq (19)

$$P_m = J \cdot A \cdot t \text{ (kg)} \quad \text{Eq (19)}$$

J est le flux d'évaporation surfacique (Kg/m<sup>2</sup>.h), A est la surface de béton soumise au séchage (m<sup>2</sup>) et t est le temps d'exposition au vent (heures).

Il est à noter qu'au-delà des trois premières heures, la cinétique de perte de masse est modifiée et l'évaporation n'est plus linéaire en fonction du temps (figure 3-5). En effet, les courbes de perte de masse s'incurvent et le flux diminue progressivement. Cette baisse s'explique par la pénétration du front de séchage dans le béton et par la réduction de la taille des pores à la surface. Il en résulte une diminution de la surface d'échange au cours du temps (Turcry, 2004)

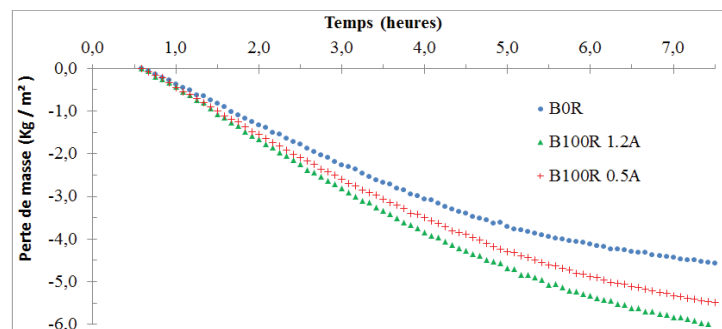


Figure 3- 5 : courbes de pertes de masse des bétons de bâtiment sur une durée de 7,5 heures

## 2 TENEUR EN EAU DES GRANULATS RECYCLES

Ce paragraphe explicite les résultats des mesures de la teneur en eau des gravillons recyclés dans le béton en fonction du temps conformément au protocole présenté au chap 2§3. Comme définie précédemment, l'origine des temps ( $t_0=0$ ) correspond à l'introduction de l'eau d'ajout dans le malaxeur.

### 2.1 Teneur en eau des gravillons recyclés au fil du temps

Les mesures de la teneur en eau des gravillons recyclés en fonction du temps sont récapitulées sur les figures 3-6 à 3-9 respectivement pour les bétons  $B_{100R}0,5A$ ,  $B_{100R}1,2A$ ,  $Gc_{100R}0,5A$  et  $Gc_{100R}1,2A$  en conditions endogènes et sous séchage.

#### 2.1.1 Conditions endogènes

En conditions endogènes, les figures 3-6 et 3-7 montrent que la teneur en eau des gravillons recyclés au cours du temps dépend essentiellement du degré initial de saturation des gravillons.

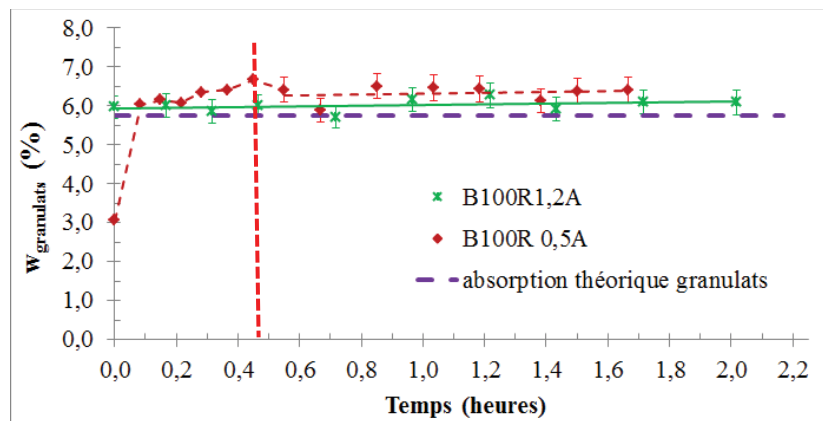


Figure 3- 6: teneur en eau des gravillons recyclés en fonction du temps bétons  $B_{100R} 1,2 A$  et  $B_{100R} 0,5A$ , conditions endogènes

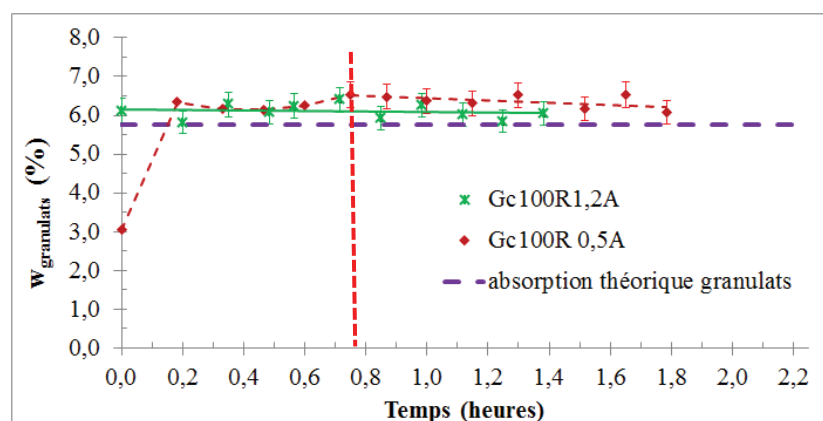


Figure 3- 7 : teneur en eau des gravillons recyclés en fonction du temps bétons  $Gc_{100R} 1,2 A$  et  $Gc_{100R} 0,5A$ , conditions endogènes

### 2.1.1.1 Bétons pré-saturés à 1,2A

Le tableau 3-5 récapitule quelques valeurs de la teneur en eau ( $w$ ) au cours du temps avec pour référence l'absorption nominale théorique (1A) d'après le 1.1.1 du chapitre 3.

% de $w_{\text{nominale}}$ (1A)	Avant malaxage	Sortie du malaxeur, $t_0 + 7 \text{ mn}$	Valeur intermédiaire $t_0 + 1 \text{ heure}$	Fin d'essai, $t_0 + 2 \text{ heures}$
B <sub>100R</sub> 1,2A	104 %	104 %	100 %	106 %
Gc <sub>100R</sub> 1,2A	106 %	101 %	108 %	105 %

Tableau 3- 5 : teneur en eau des gravillons recyclés en fonction du temps en % de l'absorption nominale théorique, conditions endogènes

L'analyse des figures 3-6 et 3-7 et du tableau 3-5 fait apparaître des valeurs de teneur en eau légèrement supérieures à la valeur théorique (5,8%) du mélange homogénéisé des deux fractions granulaires de gravillons (4-10 et 10-20 mm). Ce constat peut se justifier par deux aléas expérimentaux difficilement contournables :

- la valeur théorique elle-même. Elle peut varier en fonction du laboratoire ayant effectué la mesure. Par exemple, la valeur théorique homogénéisée à partir des valeurs mesurées par (LE, 2015) serait de 6,2 % au lieu de 5,8 %
- l'échantillonnage et le protocole de séparation. Malgré la robustesse du protocole démontrée par (Bello, 2014), la méthode expérimentale a ses limites. En effet, aussi énergique et soigneuse soit elle, la séparation des granulats et de la pâte reste imparfaite. Il reste toujours de la pâte adhérente aux granulats et par conséquent de l'eau en son sein.

Toutefois, ce protocole reste utilisable dans notre cas. En effet, pour les bétons B<sub>100R</sub>1,2A et Gc<sub>100R</sub>1,2A, les valeurs moyennes sont  $w = 6$  à 6,09 % , les écarts types valent 0,16 et 0,19. Le coefficient de variation est au maximum de 3% pour le béton Gc<sub>100R</sub>1,2A, ce qui reste très faible.

Il est donc possible de dire que pour ces deux bétons dont les gravillons ont été initialement pré-saturés à 1,2 A, et en l'absence d'échanges avec le milieu extérieur, la teneur en eau des gravillons ne varie pas dans le temps et reste constante. Il n'y a pas de transferts hydriques pâte-granulats.

### 2.1.1.2 Bétons pré-saturés à 0,5A

Le tableau 3-6 récapitule les principales valeurs de teneur en eau en fonction du temps pour les deux bétons B<sub>100R</sub>0,5A et Gc<sub>100R</sub>0,5A.

% de $w_{\text{nominale}}$ (1A)	Avant malaxage	Sortie du malaxeur, $t_0 + 7 \text{ mn}$	Valeur intermédiaire $t_0 + 0,75 \text{ heure}$	Fin d'essai, $t_0 + 1,5 \text{ heures}$
B <sub>100R</sub> 0,5A	50 %	105 %	110 %	111 %
Gc <sub>100R</sub> 0,5A	50 %	110 %	110 %	105 %

Tableau 3- 6 :  $w = f(t)$ , en % de l'absorption nominale théorique, en conditions endogènes

Contrairement aux gravillons pré-saturés à 1,2A, les gravillons initialement partiellement saturés absorbent de l'eau dès le malaxage pour atteindre leur absorption « nominale ». L'analyse des figures 3-6 et 3-7 met en exergue des temps d'absorption maximale de l'ordre de 30 minutes pour le béton B<sub>100R</sub>0,5A et de 50 minutes pour le béton Gc<sub>100R</sub>0,5A. Toutefois l'absorption se fait majoritairement dans le malaxeur avec une cinétique très rapide : 90 % de l'absorption finale est obtenue dès la sortie du malaxeur, 7 mn après t<sub>0</sub>.

Au-delà de la période d'absorption, les valeurs de teneur en eau restent constantes avec une valeur moyenne mesurée de 6.37 %, un écart type de 0,2 et un coefficient de variation de 3% pour les deux bétons B<sub>100R</sub>0,5A et Gc<sub>100R</sub>0,5A.

Il apparaît lors des essais réalisés en conditions endogènes que de tous les mécanismes en jeu, l'absorption des gravillons recyclés dans le malaxeur reste le plus important. Il n'est pas mis en évidence d'autres échanges hydriques post-absorption des gravillons recyclés. Désormais, la même analyse va être menée en conditions de dessiccation par vent de 8 m/s.

### 2.1.2 Conditions de dessiccation

Les figures 3-8 et 3-9 représentent la teneur en eau des gravillons recyclés au cours du temps et pour les quatre bétons recyclés sous séchage.

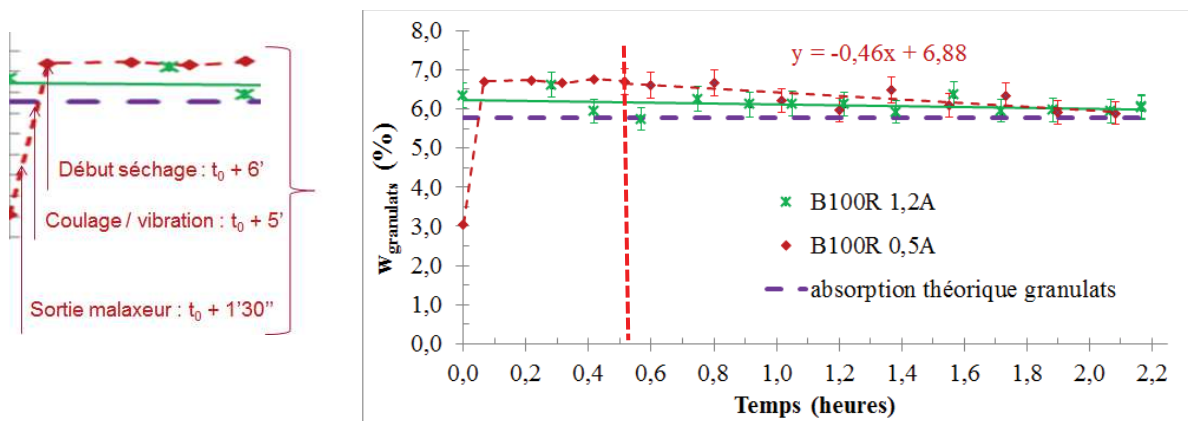


Figure 3- 8 :  $w = f(t)$ , bétons B<sub>100R</sub>1,2A et B<sub>100R</sub>0.5A ; conditions de dessiccation, vent 8m/s

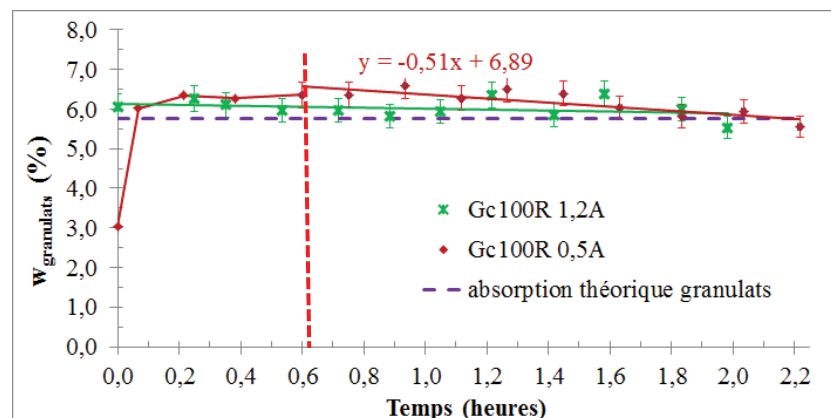


Figure 3- 9 :  $w = f(t)$ , bétons Gc<sub>100R</sub>1,2A et Gc<sub>100R</sub>0.5A ; conditions de dessiccation, vent 8m/s

### 2.1.2.1 Bétons pré-saturés à 1,2 A

Il n'y a pas de différence sensible avec les observations effectuées en conditions endogènes. Pour les bétons B<sub>100R</sub>1,2A et Gc<sub>100R</sub>1,2A, les valeurs moyennes sont  $w = 6,02$  à  $6,10 \%$ , les écarts types valent  $0,22$  et  $0,24$  et le coefficient de variation est au maximum de  $4\%$  pour le béton Gc<sub>100R</sub>1,2A.

Pour les deux bétons dont les gravillons ont été initialement pré-saturés à 1,2 A, de même qu'en conditions endogènes, il n'y a pas de transferts hydriques pâte-granulats. Le processus de séchage est présent mais n'affecte pas les gravillons recyclés.

### 2.1.2.2 Bétons pré-saturés à 0,5 A

Comme en conditions endogènes, les deux bétons dont les gravillons sont partiellement saturés à l'état initial, présente une première phase d'absorption (figures 3-8 et 3-9). Ils absorbent de l'eau dans la pâte dès le malaxage puis pendant 40 à 50 minutes pour atteindre leur absorption finale. Au début, ils ont donc un comportement assez comparable sous dessiccation et en conditions endogènes.

Pour ces bétons, la teneur en eau au cours du temps ( $w$ ) est résumée au sein du tableau 3-7. La référence (100%) est l'absorption nominale théorique (1A) du § 1.1.1.

% de $w_{\text{nominal}}$ (1A)	Avant malaxage	Sortie du malaxeur, $t_0 + 7 \text{ mn}$	Valeur intermédiaire $t_0 + 0,5 \text{ heure}$	Fin d'essai, $t_0 + 2,0 \text{ heures}$
B <sub>100R</sub> 0,5A	50 %	115 %	117 %	102 %
Gc <sub>100R</sub> 0,5A	50 %	105 %	110 %	96 %

Tableau 3- 7 :  $w = f(t)$ , en % de l'absorption nominale conditions de dessiccation sévère

Postérieurement à la phase d'absorption, sous dessiccation sévère, les gravillons des bétons B<sub>100R</sub>0,5A et Gc<sub>100R</sub>0,5A se dé-saturent partiellement et perdent de l'eau soit directement en surface sous l'effet du flux de séchage soit au profit de la pâte du béton.

Il convient de rester prudent car les pentes moyennes sont faibles  $d(w)/dt = 0,46$  et  $0,51 \%/h$  pour les bétons B<sub>100R</sub>0,5A et Gc<sub>100R</sub>0,5A. En effet, la précision des mesures est à relativiser compte tenu de la méthode expérimentale utilisée, de sa reproductibilité et de la dispersion des résultats.

Bien que les essais aient été surtout développés pour mettre en lumière l'absorption des granulats partiellement recyclés, il a été observé des tendances des gravillons recyclés à se désorber pour les bétons B0,5 et Gc0,5 sous vent et ceci contrairement à tous les autres essais.

Ce flux d'eau sortant des gravillons recyclés est moyenné car il est calculé par mesure de tous les granulats de l'échantillon prélevés sur la hauteur totale de l'éprouvette.

## 2.2 Evaluation des transferts hydriques gravillons recyclés-pâte

### 2.2.1 Méthodologie

L'analyse de ces premiers résultats nous encourage à vouloir quantifier la variation massique d'eau au sein des gravillons, de la pâte et du béton soumis à la dessiccation.

La figure 3-10 rappelle le corps d'épreuve de référence et ses caractéristiques géométriques générales. Il représente une des douze alvéoles du moule représenté sur la figure 2-29 du chapitre 2. Dans cette partie, les mesures et calculs de transferts d'eau sont effectués pour ce volume représentatif.

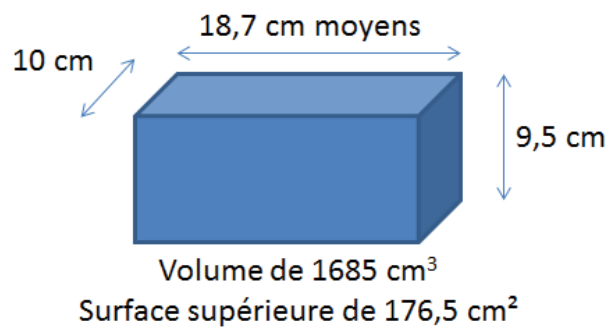


Figure 3- 10 : corps d'épreuve des mesures pour calculs de transferts hydriques

Les mesures et calculs effectués respectent la méthodologie et les principes suivants :

- la masse d'eau dans le béton est obtenue par différence entre l'eau totale et l'eau évaporée. Cette dernière est calculée à l'aide de l'équation Eq(19) du chap 3 § 1.2.3
- la masse d'eau dans les gravillons est calculée en prenant en compte les teneurs en eau mesurées en fonction du temps et représentées sur les figures 3-6 à 3-9 du § 2.1 ci-avant
- la masse d'eau dans la pâte est calculée par différence entre la quantité d'eau dans le béton et la quantité d'eau dans les gravillons.

### 2.2.2 Résultats relatifs aux bétons pré-saturés à 1,2A

Pour les bétons B<sub>100R</sub>1,2A et Gc<sub>100R</sub>1,2A, les figures 3-11 et 3-12 présentent la quantité d'eau au sein du béton, la quantité d'eau absorbée par les gravillons et l'eau dans la pâte en fonction du temps.

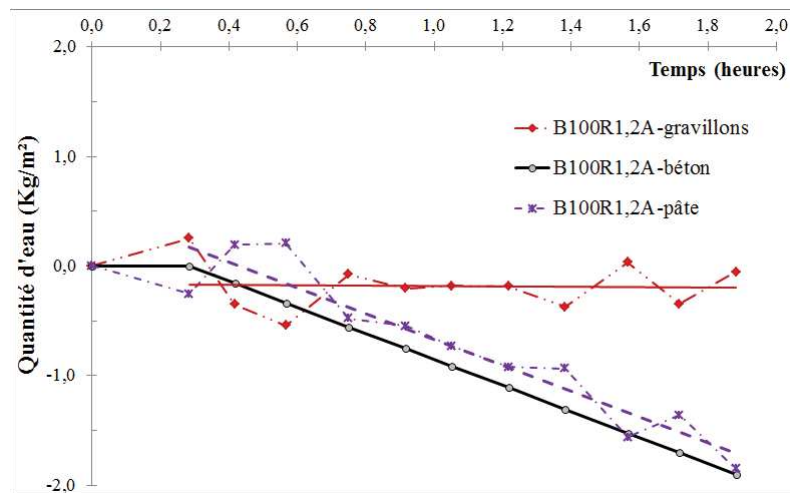


Figure 3- 11 : qté d'eau = f(t) : béton, pâte et gravillons recyclés,  $B_{100R1,2A}$ .

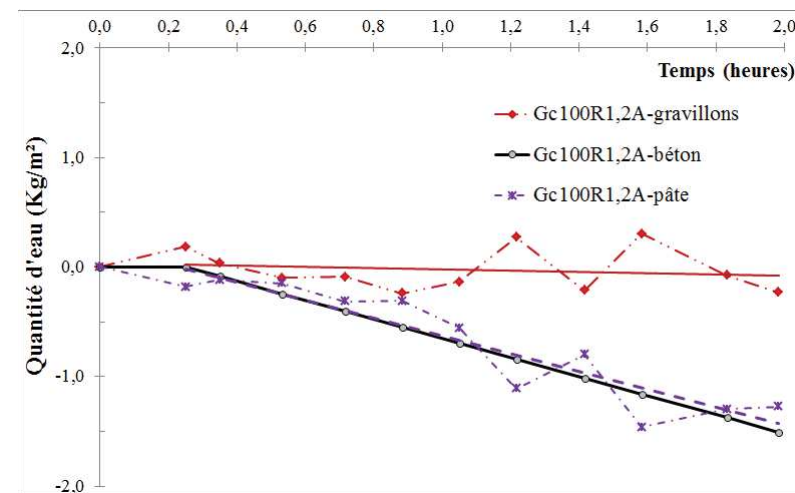


Figure 3- 12 : qté d'eau = f(t) : béton, pâte et gravillons recyclés,  $Gc_{100R1,2A}$ .

L'analyse des figures 3-11 et 3-12 souligne que sous l'effet du séchage du béton, les gravillons recyclés ne perdent pas une quantité d'eau significative et donc mesurable. L'eau évaporée vient de la pâte qui se dé-sature sous l'effet du séchage dont le flux est variable pour chaque béton.

### 2.2.3 Résultats relatifs aux bétons pré-saturés à 0,5A

Les figures 3-13 et 3-14 donnent les quantités d'eau du béton, des gravillons et de la pâte, en fonction du temps pour les bétons  $B_{100R0,5A}$  et  $Gc_{100R0,5A}$ .



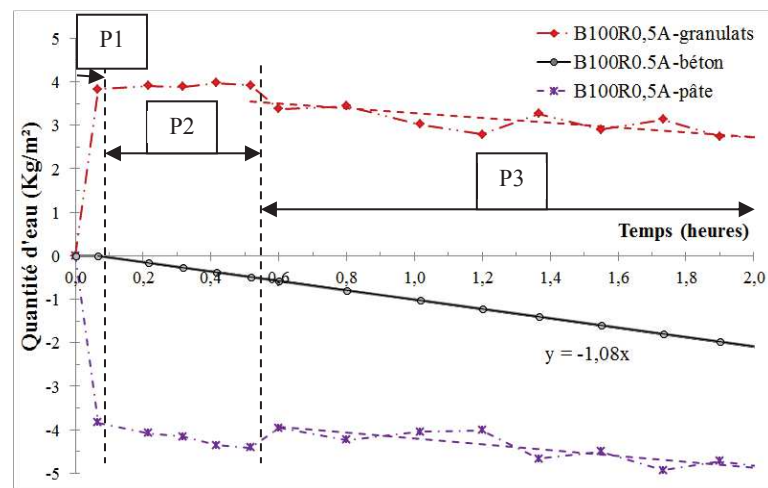


Figure 3- 13 : qté d'eau = f(t) : béton, pâte et gravillons recyclés, B<sub>100R</sub>0,5A (début du séchage à fin P1)

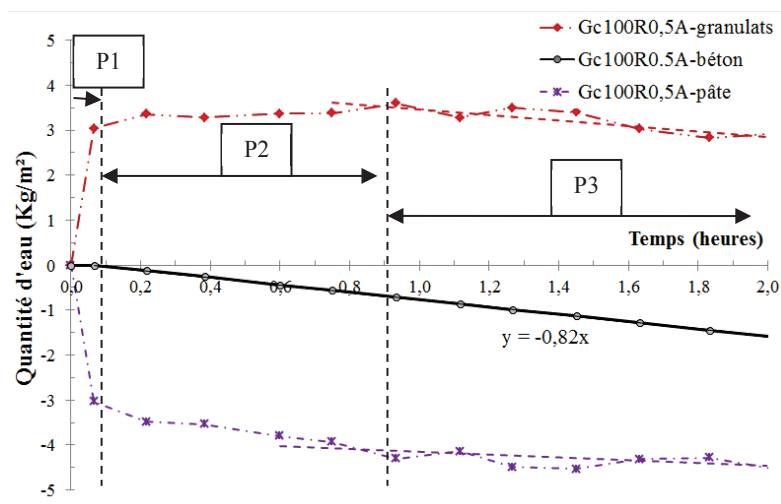


Figure 3- 14 : qté d'eau = f(t) : béton, pâte et gravillons recyclés, Gc<sub>100R</sub>0,5A. (début du séchage à fin P1)

Les figures 3-13 et 3-14 font apparaître trois périodes au cours du temps P1, P2, P3, où les transferts hydriques sont différents pour le béton, les gravillons et la pâte :

- période 1 (P1) : dans le malaxeur et jusqu'au démarrage du séchage à 0,12 h. Les granulats absorbent l'eau de la pâte pour arriver à 90 % de leur absorption nominale. Le séchage n'a pas démarré
- période 2 (P2) : de 0,12 h à 0,6 h (B<sub>100R</sub>1,2A) et 0,8 h (Gc<sub>100R</sub>1,2A).
  - ♦ le béton perd de l'eau avec un flux d'évaporation constant (1-2 du chap 3)
  - ♦ les gravillons continuent d'absorber jusqu'à atteindre leur absorption finale
  - ♦ la pâte perd de l'eau sous les effets conjoints du séchage et de l'absorption des gravillons
- période 3 (P3) : de 0,6 h (B<sub>100R</sub>1,2A) ou 0,8 h (Gc<sub>100R</sub>1,2A) → fin de l'essai.
  - ♦ le béton continue de se dé-saturer comme pendant la période 2

- ◆ les gravillons se dé-saturent partiellement et perdent de l'eau
- ◆ la pâte continue de perdre de l'eau sous l'effet du séchage.

### 2.2.4 Synthèse

Les paragraphes précédents ont mis en évidence qu'il existait des transferts hydriques pâte-gravillons ou gravillons-pâte en fonction du degré de pré-saturation des gravillons recyclés et en fonction des conditions de séchage plus ou moins sévères. Pour des bétons initialement pré-saturés à 0,5 A, la figure 3-15 schématise ces échanges d'eau au cours des trois périodes identifiées au paragraphe précédent.

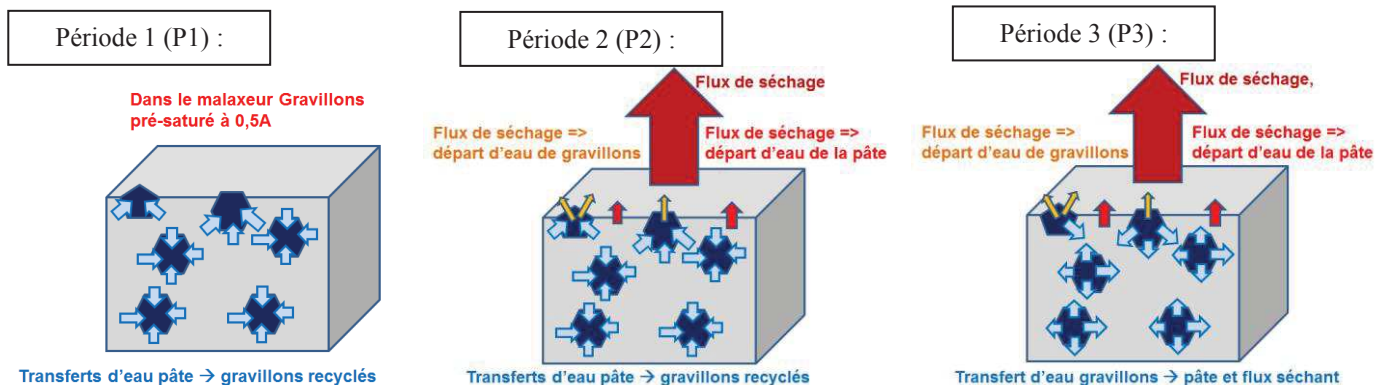


Figure 3- 15 : transferts d'eau pâte-gravillons recyclés au cours du temps, B-Gc<sub>100R</sub>0,5A

Si la pré-saturation des gravillons n'a pas été complète, le phénomène majeur sera l'absorption des gravillons recyclés qui se produit essentiellement dans le malaxeur. En quelques minutes, ils vont absorber le complément d'eau à la pré-saturation pour atteindre environ 90 % à 100 % de leur absorption nominale.

Si les conditions de dessiccation sont sévères et se cumulent avec une quantité d'eau initiale dans la pâte faible, le deuxième phénomène qui est moins important est un flux hydrique inverse des gravillons vers la pâte et vers le milieu séchant.

Ces phénomènes sont observés pour les bétons des deux familles : bâtiment (E/C = 0,6) et Génie Civil (E/C = 0,45) sans différence notable de comportement.

Un parallèle pourrait être dressé avec les bétons à haute performance où le faible rapport E/C engendre une forte auto-dessiccation. Toutefois, dans la phase plastique, le béton a un faible degré d'hydratation. Sa pâte est riche en eau et c'est surtout elle qui va perdre de l'eau par séchage. Cela est d'ailleurs constaté sur les bétons B<sub>100R</sub>1,2A et Gc<sub>100R</sub>1,2A soumis à la dessiccation.

Ces conclusions permettent d'avancer que le potentiel de « réservoir d'eau » ou de « cure interne » des granulats recyclés existe, conformément à (Haejin, 2009) et (Corinaldesi and Moriconi, 2010).

Toutefois, en général, durant la phase plastique la pâte contient beaucoup d'eau ce qui ne nécessite pas la mobilisation de l'effet « réservoir d'eau » des granulats recyclés.

Si les conditions de dessiccation du béton sont très sévères et sont associées à un manque d'eau dans la pâte dû à l'absorption des bétons partiellement saturés à 0,5A, il semble malgré tout possible de mobiliser l'eau contenue dans les granulats.

### 3 CARACTERISTIQUES DE LA PATE A L'ETAT FRAIS

Ce paragraphe utilise les résultats du paragraphe 2 relatif aux transferts hydriques et les utilise pour étudier les variations des caractéristiques du béton à l'état frais en fonction du temps : rapport E/L et volume de pâte.

#### 3.1 Variation du rapport E/L en fonction du temps

Sous l'effet des transferts hydriques mis en évidence précédemment, le volume d'eau dans la pâte évolue au cours du temps. Il en sera donc de même pour le rapport E/L.

Les figures 3-16 et 3-17 représentent la variation du rapport E/L en fonction du temps pour les trois bétons de bâtiment et les trois bétons de génie civil.

Dans cette étude quelques hypothèses simplificatrices ont été adoptées :

- la pré-saturation initiale des gravillons recyclés est prise égale à 50 % (B<sub>100R</sub>0,5A et Gc<sub>100R</sub>0,5A) ou 100 % (B<sub>0R</sub>, Gc<sub>0R</sub>, B<sub>100R</sub>1,2A, Gc<sub>100R</sub>1,2A) de la teneur en eau nominale théorique (1A)
- l'absorption des gravillons recyclés est considérée à sa valeur nominale dès la sortie du malaxeur. En toute rigueur les gravillons recyclés continuent d'absorber 0,1A durant 30 -50 mn environ après la sortie du malaxeur
- la désorption des gravillons est négligée car les valeurs de pentes sont faibles ( 0,46 et 0,51 %/h pour les bétons B<sub>100R</sub>0,5A et Gc<sub>100R</sub>0,5A) et sont dans la marge d'incertitude de l'essai.

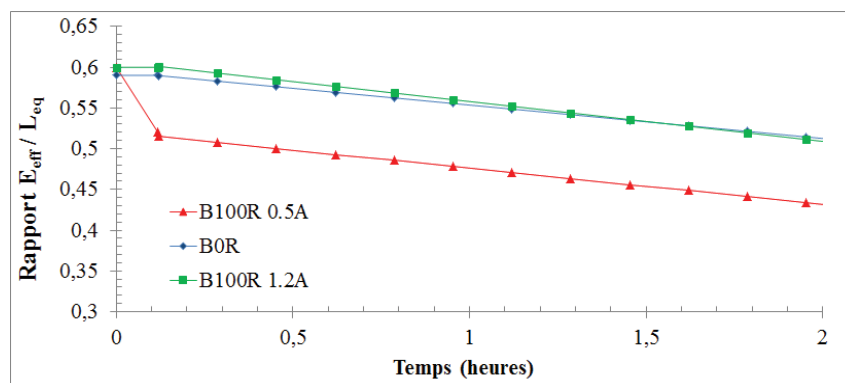


Figure 3- 16 : évolution du rapport E/L = f(t) pour les trois bétons de bâtiment

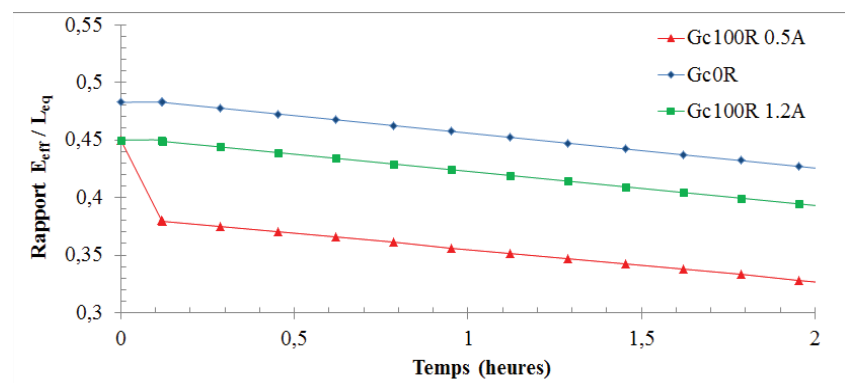


Figure 3- 17 : évolution du rapport E/L = f(t) pour les trois bétons de génie civil

Dans la première période d'absorption des gravillons recyclés, la pâte perd de l'eau aux profits des gravillons et le rapport E/L chute brutalement de 0,6 à 0,52 pour le béton B<sub>100R</sub>0,5A (figure 3-16) et de 0,45 à 0,38 pour le béton Gc<sub>100R</sub>0,5A (figure 3-17). En revanche, ce rapport reste constant pour les autres bétons étudiés pour lesquels les gravillons préalablement saturés ne consomment pas l'eau de la pâte.

Dans les périodes qui suivent, la dé-saturation des gravillons recyclés étant négligée, le séchage consomme de l'eau dans la pâte. Le rapport E/L diminue en conséquence.

Conformément à (Cortas, 2012) et (Corinaldesi and Moriconi, 2010) le degré de pré saturation et dans une moindre mesure les échanges d'eau gravillons-pâtes ultérieurs interviennent directement sur la valeur du rapport E/L au cours du temps.

### 3.2 Air occlus

Le paragraphe précédent a montré l'effet des gravillons recyclés et de leur degré de pré-saturation sur le rapport E/L, Cette variation va également impacter la quantité de pâte des bétons au cours du temps.

Les autres quantités qui caractérisent le volume de pâte (ciment, filler et fines des sables) sont considérées comme des invariants pendant la période dormante du béton où le degré d'hydratation est faible.

L'air occlus varie d'un béton à l'autre et est plus important pour les bétons dont les gravillons ont été partiellement pré-saturés comme l'illustre le tableau 3-6. Il est considéré dans cette étude que l'air occlus est constant dans le temps ainsi que sur la hauteur des échantillons, ce qui est une approximation compte tenu des travaux de (Josserand, 2002).

	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R</sub> 1,2A	B <sub>100R</sub> 0,5A	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R</sub> 1,2A	Gc <sub>100R</sub> 0,5A
Rapport G / S	1,39	1,07	1,07	1,39	1,07	1,07
Pourcentage volumique de gravillons (%)	57	55	55	57	55	55
Pourcentage volumique de sables (%)	43	45	45	43	45	45
Air occlus (%)	0,9	1,8	2,9	1,0	1,9	2,7
Compacité du squelette granulaire du béton	70,7%	69,7 %	69,7%	69,9%	67,7%	67,7%

Tableau 3- 8 : air occlus et rapport G/S des bétons étudiés à l'état frais en sortie de malaxeur

Il faut noter que les valeurs mesurées d'air occlus sont du même ordre de grandeur que les valeurs proposées dans le rapport de formulation établi par (Sedran, 2013). Ce dernier trouve des valeurs de l'ordre de 0,7 à 1 % pour les bétons naturels, autour de 1,5 % pour les bétons à graviers recyclés initialement totalement pré-saturés, et de 2.4 à 3.4 % pour les bétons dont les sables et graviers sont recyclés.

Les mesures effectuées montrent que les bétons dont les gravillons recyclés ont été pré saturés à 0,5 A font apparaître des valeurs d'air occlus supérieures de l'ordre de 1 % comparativement aux mêmes bétons mais dont les gravillons sont pré saturés à 1,2A. Ces valeurs d'air collus de près de 3 % paraissent importantes compte tenu des valeurs d'affaissement au cône ciblées, cf paragraphe 4 du chapitre 3..

### 3.3 Variation du volume de pâte en fonction du temps

Comme pour le rapport E/L, durant la première phase d'absorption des gravillons, le volume de pâte va diminuer par perte d'eau.

Notons que l'eau ressuée de certaines formulations, bétons B<sub>0R</sub>, B<sub>100R1,2A</sub> par exemple, n'est pas déduite pour le calcul du volume de pâte.

Les figures 3-18 et 3-19 traduisent la perte de volume de pâte des différents bétons étudiés en comparant les courbes préalablement normées par le volume initial de pâte.

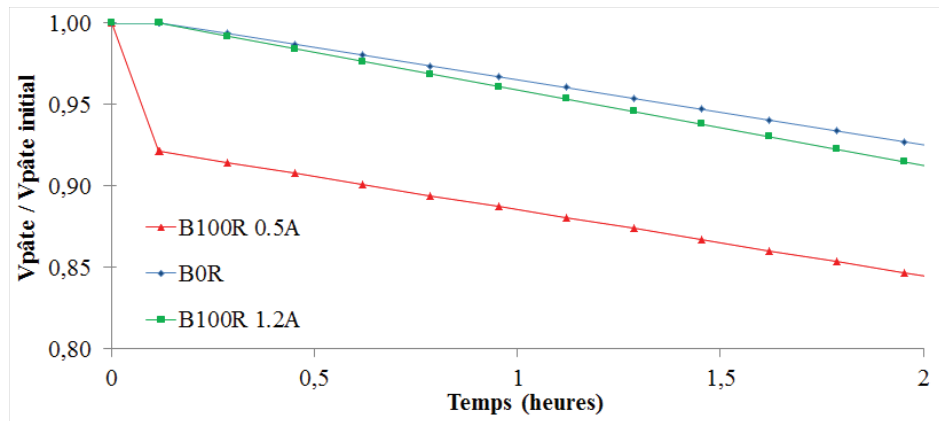


Figure 3- 18 : évolution du volume de pâte en litres en fonction du temps, pour un mètre cube de béton, bétons de bâtiment

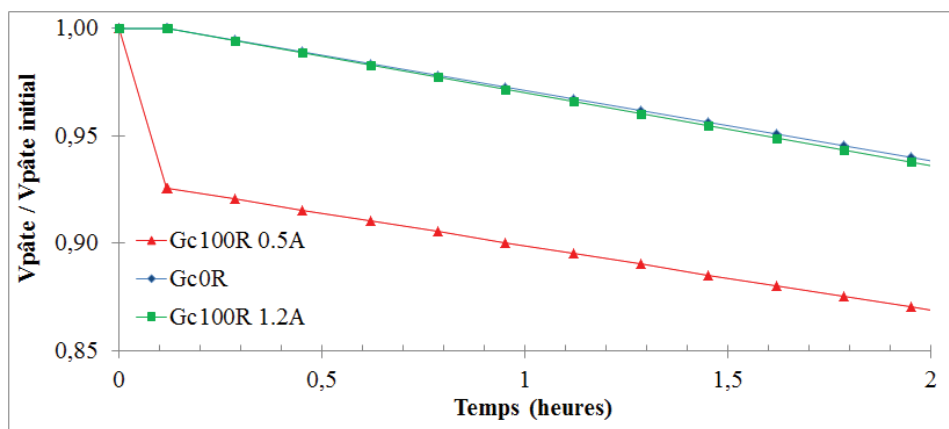


Figure 3- 19 : évolution du volume de pâte en litres en fonction du temps, pour un mètre cube de béton, bétons de génie civil

La variation initiale du volume de pâte des bétons B<sub>100R0,5A</sub> et Gc<sub>100R0,5A</sub> est due à l'absorption d'eau des gravillons recyclés dans le malaxeur. Au-delà de 0,12 h, la pente de chaque courbe est donnée par le flux d'évaporation propre à chaque béton.

La variation de la quantité de pâte peut impacter sur l'ouvrabilité des bétons au cours du temps. Ce constat constitue l'objet du paragraphe 4 à suivre.

## 4 EFFETS SUR L'OUVRABILITE

### 4.1 Mesures effectuées au cône d'Abrams

Les mesures d'affaissement au cône d'Abrams sont effectuées conformément à la norme (NF EN 12350-2).

Les principaux résultats des essais d'affaissement au cône sont présentés sur les figures 3-20 pour les trois bétons de bâtiment et 3-21 pour les deux bétons recyclés de génie civil.

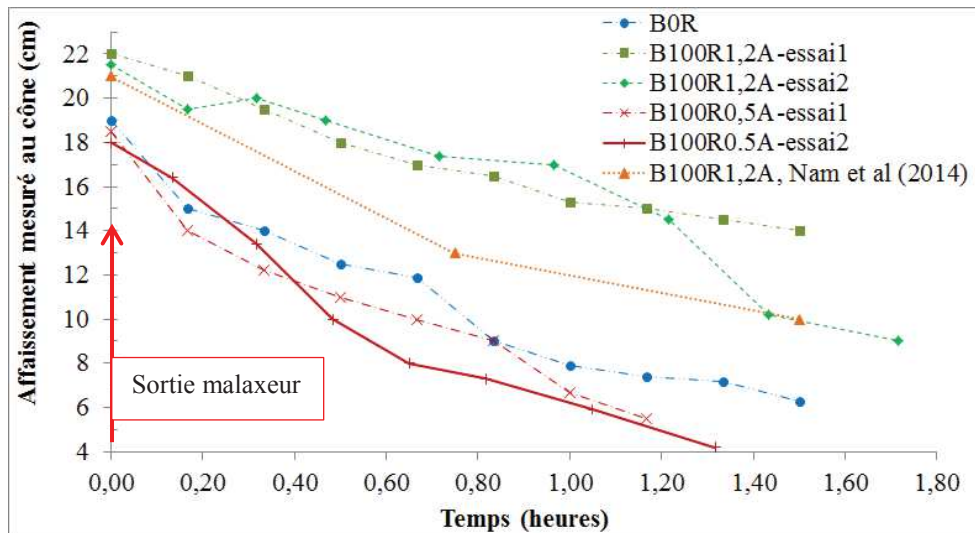


Figure 3- 20 : évolution de l'affaissement au cône en fonction du temps, bétons de bâtiment

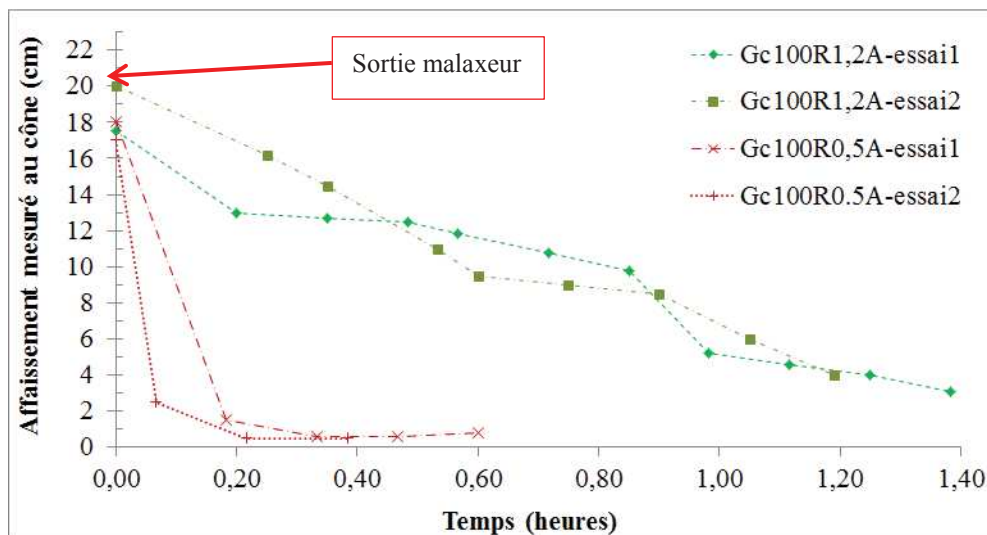


Figure 3- 21 : évolution de l'affaissement au cône en fonction du temps, bétons de génie civil

Pour tous les bétons, naturel et recyclés, les valeurs d'affaissement ne sont pas stables pendant 1,5 heures comme le demande la norme NF EN 206-1.

La perte d'ouvrabilité observée pour le béton naturel durant la première demi-heure peut être due à une mauvaise compatibilité du couple ciment-adjuvant.

## 4.2 Etude des valeurs d'affaissement mesurées en sortie de malaxeur

Si l'attention est portée sur l'ouvrabilité en sortie de malaxeur, le tableau 3-9 récapitule les valeurs d'affaissement au cône obtenues pour les six bétons étudiés.

Valeurs d'essais d'affaissement au cône (cm), arrondies à l'unité	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
Sortie du malaxeur	19	22	18	19,5	20	17

Tableau 3- 9. variation des valeurs des essais d'affaissement en fonction du temps, bétons recyclés B<sub>100R1,2A</sub>, B<sub>100R0,5A</sub>, Gc<sub>100R1,2A</sub>, Gc<sub>100R0,5A</sub>

L'analyse des résultats obtenus pour les différents bétons met en lumière des valeurs d'affaissement comparables en sortie de malaxeur entre naturels et recyclés (1,2A). Les recyclés (0,5A) présentent des valeurs d'affaissement plus faibles que les recyclés (1,2A).

Nam et al., (2014) ont également travaillé sur les bétons du projet national RECYBETON. Pour un béton assez proche du béton B<sub>100R1,2A</sub>, l'affaissement au cône est de 21 cm à la sortie du malaxeur. Cette valeur est comparable à la valeur mesurée de 22 cm.

Conformément à (Sedran, 2013) la valeur cible d'affaissement au cône à obtenir pour tous les bétons est de 20. Compte tenu de la tolérance sur la mesure ( $\pm 30$  mm), tous les bétons testés dans cette étude sont conformes à l'objectif.

Globalement les bétons recyclés de génie civil, qui comportent moins d'eau et plus de ciment que les bétons de bâtiment présentent des affaissements au cône plus faibles (17 à 20) que les bétons recyclés de bâtiment (18 à 22), (tableau 3-9).

L'effet de l'absorption des granulats recyclés est également visible. Ainsi, les bétons réalisés à l'aide de granulats initialement partiellement saturés (0,5A) présentent une valeur d'affaissement au cône plus faible (17-18 cm) que les bétons dont les gravillons recyclés ont été initialement pré-saturés à 1,2A (20-22 cm). Mefteh et al., (2013) et Malešev et al., (2010) obtiennent des résultats similaires. L'absorption d'eau dans la pâte de ciment, induite par les granulats partiellement saturés à 0,5A, amène donc une chute du rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  et du volume de pâte qui a pour conséquence une perte d'ouvrabilité conformément à la littérature (Kou, 2006) (Yong et al 2009) (Xiao et al., 2012).

## 4.3 Suivi de l'évolution de l'affaissement en fonction du temps

Si l'attention est désormais portée sur l'évolution de l'ouvrabilité en fonction du temps, le tableau 3-10 récapitule quelques valeurs d'affaissement au cône obtenues pour les quatre bétons recyclés : à la sortie du malaxeur, après 10 mn, 1 h et 1 h 30.

Valeurs d'essais d'affaissement au cône (cm), arrondies à l'unité	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
Sortie du malaxeur	19	22	18	20	17
Sortie du malaxeur + 10mn	15	20	16	16	3
Sortie du malaxeur + 60mn	7,9	17	5,9	6	1
Sortie du malaxeur + 90mn	6,3	10	4	3	//

Tableau 3- 10. affaissement en fonction du temps, B<sub>0R</sub> et recyclés (1,2A et 0,5A)

Globalement, tous les bétons présentent une baisse importante des valeurs d'affaissement au cône en fonction du temps. Le béton B<sub>100R1,2A</sub> conserve mieux son ouvrabilité que le béton naturel B<sub>0R</sub>.

Dans la mesure où l'essentiel des transferts hydriques entre gravillons et pâte ont lieu dans le malaxeur, à l'âge de t<sub>0</sub>+10 mn, ces transferts hydriques sont en grande partie réalisés. Les essais de suivi de l'affaissement dans le temps étant réalisés en conditions endogènes, il y a peu de variation de volume de pâte due au séchage. Par conséquent, le vieillissement de la pâte contrôle très probablement les variations d'ouvrabilité dans le temps des différents bétons. Toutefois, pour le béton GC<sub>100R0,5A</sub>, le complément d'absorption des granulats durant la première demi-heure peut contribuer à un affaissement quasi nul constaté dès la mesure à 10 minutes.

La figure 3-22 met en parallèle le suivi des valeurs d'affaissement au cône mesurées pour les bétons recyclés suivants :

- B<sub>100R1,2A</sub> et Gc<sub>100R1,2A</sub> de la présente étude
- le béton du projet RECYBETON testé par (Nam et al., 2014) et réalisé dans des conditions d'essais comparables aux bétons B-Gc<sub>100R1,2A</sub>
- des bétons recyclés issus de la littérature : (Kou, 2006) (Poon and Chan, 2006) (Yang et al., 2008) (Nam et al., 2014).

Ces bétons comprennent tous 100% de gravillons recyclés mis en œuvre à l'état SSS, des rapport E/C compris entre 0,45 et 0,6 et le plus souvent l'emploi d'un superplastifiant à l'exception de Kou et al.

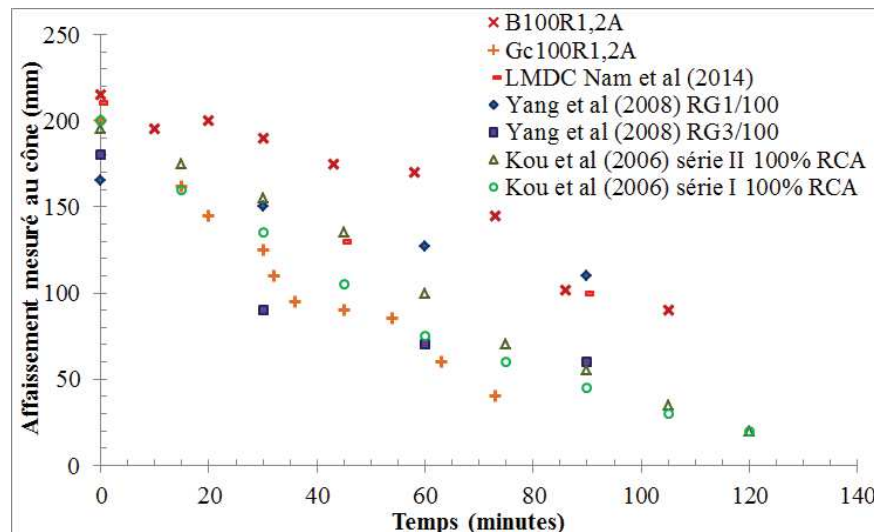


Figure 3- 22 : suivi de l'affaissement au cône de bétons recyclés avec 100% de gravillons recyclés d'après (Kou, 2006) (Poon and Chan, 2006) (Yang et al., 2008) (Nam et al., 2014)

D'une manière générale tous les bétons représentés voient une chute notable de leur ouvrabilité au cours du temps, qui ne permettrait pas une mise en œuvre normale sur chantier au bout d'une heure par exemple pour la plupart d'entre eux.



Tous ces bétons se situent dans un fuseau délimité par les deux bétons recyclés B<sub>100R1,2A</sub> et Gc<sub>100R1,2A</sub>. Le béton B<sub>100R1,2A</sub> est celui qui conserve le mieux son ouvrabilité dans le temps. En revanche, le béton Gc<sub>100R1,2A</sub> est le béton qui a la perte d'ouvrabilité la plus forte.

La figure 3-22 met en évidence qu'à 90 mn, la valeur d'affaissement au cône d'une valeur de 10 cm (tableau 3-9) et mesurée pour le béton B<sub>100R1,2A</sub> est égale à la valeur trouvée par (Nam et al., 2014) pour un béton similaire utilisant les mêmes gravillons recyclés et réalisés dans le cadre du projet RECYBETON.

#### 4.4 Modélisation de la perte d'affaissement en fonction du temps

Yang et al (2008) proposent d'après (Yang and Kim, 2005) un modèle linéaire d'évaluation de la perte d'ouvrabilité dans le temps conformément à l'équation Eq(20) ci-dessous.

$$\frac{S_L}{(S_L)_i} = k t + 1 \quad \text{Eq (20)}$$

où :

- (S<sub>L</sub>) est la valeur de l'affaissement mesurée à l'instant t et (S<sub>L</sub>)<sub>i</sub> est la valeur initiale de l'affaissement
- k, valeur négative, est le taux de perte d'affaissement en (mm/minute) ou (cm/heure).

Les courbes de variation de l'affaissement en fonction du temps tracées selon l'équation Eq(20) sont données sur la figure 3-23 pour les bétons B<sub>100R1,2A</sub>, B<sub>100R0,5A</sub>, Gc<sub>100R1,2A</sub>.

L'analyse de cette figure montre que les bétons B<sub>100R0,5A</sub> et Gc<sub>100R1,2A</sub> se comportent de manière identique. Le coefficient k (pente de droite) des bétons B<sub>100R0,5A</sub> et Gc<sub>100R1,2A</sub> est double de celui du béton B<sub>100R1,2A</sub>. Ce résultat confirme le bon comportement du béton B<sub>100R1,2A</sub> comme décrit plus haut au paragraphe 4.3.

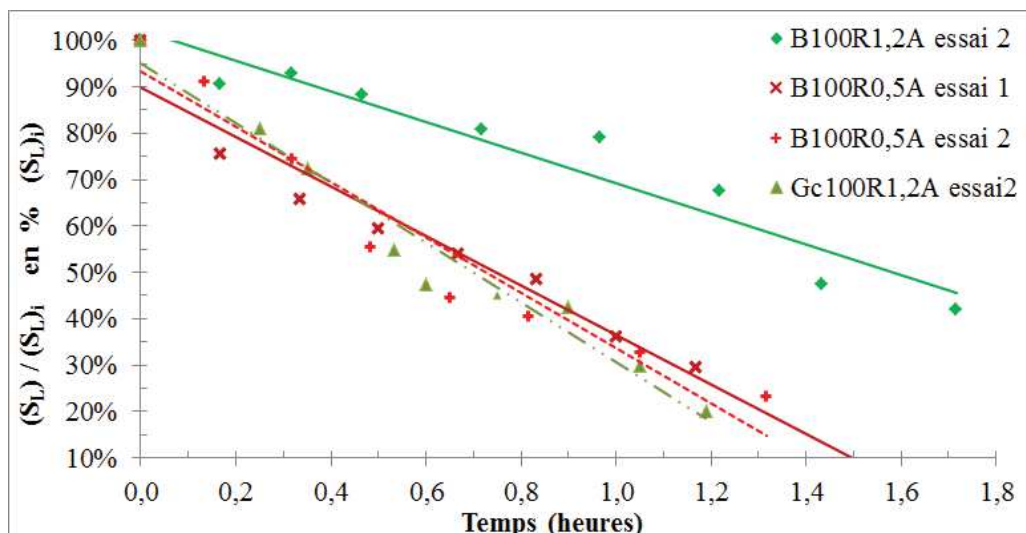


Figure 3- 23 : suivi de l'affaissement en fonction du temps selon le modèle proposé par (Yang and Kim, 2005)

Le taux de perte d'affaissement pour les bétons  $B_{100R}1,2A$ ,  $B_{100R}0,5A$  et  $Gc_{100R}1,2A$ , est évalué sur des durées de 1,2 à 1,5 heures à partir des courbes des figures 3-20 et 3-21. Les valeurs calculées sont récapitulées dans le tableau 3-11.

	$B_{0R}$	$B_{100R}1,2A$ de 0 à 1,5 h	$B_{100R}0,5A$ de 0 à 1,2 h	$Gc_{100R}1,2A$ de 0 à 1,4 h
Présente étude	1,33 mm/min	1,2 mm/min	1,65 à 1,8 mm/min	2,1 mm/min
Nam et al (2014)	//	1,2 mm/min	//	//

Tableau 3- 11 : valeur de  $k$  pour les bétons  $B_{100R}1,2A$  et  $B_{100R}0,5A$

Kou et al (2006) annoncent des valeurs de taux de perte d'affaissement de 1 à 2 mm/min pour des bétons comprenant 100 % de gravillons recyclés dont E/C varie de 0,45 à 0,55 et qui ne comportent pas de super plastifiant.

Pour des bétons comprenant 100% de gravillons recyclés de qualité variable, E/C = 0,5 et qui comportent un super plastifiant, Yang et al (2008) obtiennent des valeurs de taux de perte d'affaissement de 0,6 à 2 mm/min.

Globalement, les bétons  $B_{0R}$  et  $B_{100R}1,2A$  se comportent plutôt bien et sont proches de la valeur basse de la fourchette. Les bétons  $B_{100R}0,5A$  et  $Gc_{100R}1,2A$  sont plutôt proches de la borne haute de l'intervalle et perdent leur ouvrabilité plus vite.

#### 4.5 Evaluation des paramètres de la loi de comportement

Dans le chap 1. § 2.4.2, il est rappelé que la rhéologie de bétons tels que ceux de cette étude suit une loi de Bingham, « modèle fluide à seuil caractérisée par deux paramètres le seuil de cisaillement ( $\tau_0$ ) et la viscosité plastique de la pâte ( $\mu_a$ ) ».

Le tableau 3-12 donne le calcul inverse du seuil de cisaillement ( $\tau_0$ ) à partir des valeurs d'affaissement mesurées en sortie de malaxeur et après 10 mn à l'aide de l'équation Eq(3) rappelée au chap 1. § 2.4.2.

	$B_{0R}$	$B_{100R}1,2A$	$B_{100R}0,5A$	$Gc_{0R}$	$Gc_{100R}1,2A$	$Gc_{100R}0,5A$
Densité	2,39	2,21	2,20	2,41	2,26	2,24
Affaissement au cône Sortie malaxeur (mm)	185	215	180	180	200	180
<b><math>\tau_0</math> sortie malaxeur (Pa)</b>	<b>997</b>	<b>749</b>	<b>966</b>	<b>1038</b>	<b>858</b>	<b>980</b>
Affaissement au cône après 10mn (mm)	140	195	164	//	162	15
<b><math>\tau_0</math> après 10 mn (Pa)</b>	<b>1304</b>	<b>875</b>	<b>1067</b>	//	<b>1103</b>	<b>2036</b>

Tableau 3- 12 : calcul du seuil de viscosité des 6 bétons testés à partir des valeurs d'affaissement mesurées en sortie de malaxeur puis après 10 minutes

En sortie de malaxeur, pour chaque famille de bétons, bâtiment et génie civil, les bétons recyclés dont les gravillons ont été pré-saturés à 1,2A présentent le seuil de viscosité le plus faible en comparaison des bétons témoins :

- 25 % de moins en faveur du béton  $B_{100R1,2A}$  qui est comparé au béton  $B_{0R}$
- 17 % de moins pour le béton  $Gc_{100R1,2A}$  qui comparé au béton témoin  $Gc_{0R}$ .

Les bétons recyclés dont les gravillons ont été pré-saturés à 0,5A donnent des valeurs de seuil de viscosité équivalentes à celles des bétons témoins malgré une quantité d'eau efficace plus faible.

Usuellement pour des bétons coulés vibrés pour structures en béton armé, des valeurs d'affaissement de 150 à 200 mm correspondent à un ordre de grandeur de seuil de viscosité de 1240 à 900 Pa selon (Bernier, 2004) ou de 1500 à 800 Pa selon (De-Larrard François, 1999). Les valeurs du tableau 3-9 qui sont comprises entre 746 et 1038 Pa sont donc dans la fourchette proposée dans la littérature.

Après 10 minutes, les bétons recyclés  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5A}$  et même  $Gc_{100R1,2A}$  conservent une valeur de seuil de viscosité plus faible que le béton naturel  $B_{0R}$ . En revanche, le seuil de viscosité du béton recyclé  $Gc_{100R0,5A}$  a doublé entre la mesure à la sortie du malaxeur et la mesure 10 minutes plus tard.

Cette évolution rapide du seuil de viscosité peut justifier la chute brutale de la valeur d'affaissement au cône qui passe de 180 mm à 15 mm en 10 minutes telle que visualisée sur la figure 3-21.

Un calcul de la valeur de viscosité de la pâte a été effectué conformément à l'équation Eq(4) du chap 1. § 2.4.2. Ce calcul donne des valeurs comprises entre 90 et 150 Pa.s qui semblent correctes au vu des fourchettes usuelles données dans la bibliographie.

## 5 EFFETS SUR LES RESISTANCES MECANIQUES

### 5.1 Analyse des résistances mécaniques

Les transferts d'eau gravillons-pâte ont mis en évidence une variation du rapport E/L en fonction du temps. L'étude va porter sur l'impact de cette variation sur les résistances mécaniques à la compression à 28 jours.

La confection et la conservation des éprouvettes sont conformes à la norme (NF P 18-404). Les essais et mesures de résistances mécaniques à 28 jours sont réalisés conformément à la norme (NF EN12390-3).

La figure 3-24 présente une chute des résistances mécaniques des bétons recyclés B<sub>100R1,2A</sub> (-25 %), B<sub>100R0,5A</sub> (-15%) et Gc<sub>100R1,2A</sub> (-8%) par rapport aux bétons à base de granulats naturels, ce qui est en accord avec la littérature (Poon et al., 2004) (Kou et al., 2011). L'effet des gravillons recyclés est particulièrement sensible pour le béton B<sub>100R1,2A</sub> dont le rapport E/L est pourtant égal à celui du béton B<sub>0R</sub>. Le béton Gc<sub>100R1,2A</sub> semble mieux se comporter mais il faut noter que le rapport E/L est de 0,45 pour une valeur de 0,48 pour le béton Gc<sub>0R</sub>.

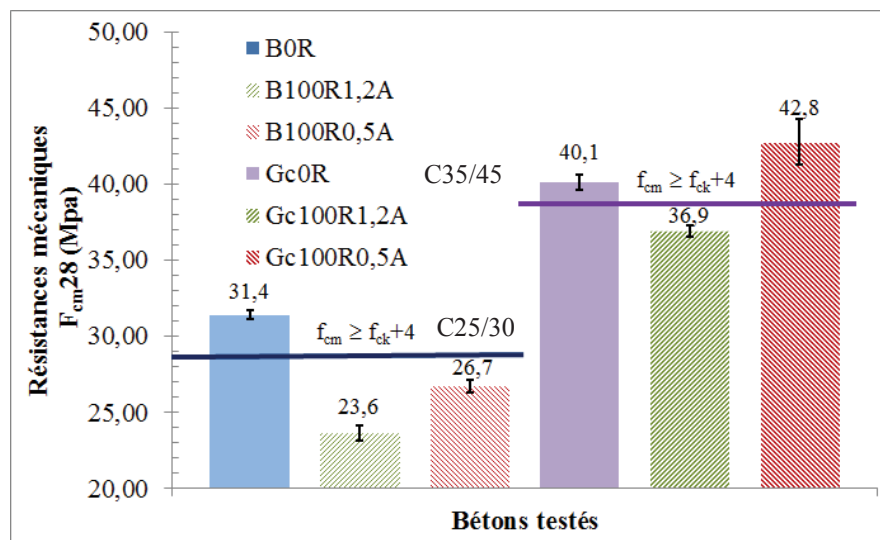


Figure 3- 24 : résistances mécaniques en compression à 28 jours des 6 bétons testés<sup>40</sup>

De plus, les bétons utilisant des granulats partiellement saturés (B<sub>100R0,5A</sub> et Gc<sub>100R0,5A</sub>) ont toujours de meilleures résistances à la compression que les bétons B<sub>100R1,2A</sub> et Gc<sub>100R1,2A</sub> (environ 15% de plus).

Cette amélioration des caractéristiques mécaniques peut être expliquée par la modification du rapport E/L des bétons recyclés sous l'effet de l'absorption des gravillons initialement partiellement saturés.

En effet, dans le malaxeur, l'eau absorbée qui est prise à la pâte, ce qui réduit le rapport E/L conformément aux valeurs rappelées dans le tableau 3-13. La baisse du rapport E/L est favorable aux résistances mécaniques.

<sup>40</sup> Selon le rapport LMDC, le béton témoin B0R a une résistance de 32,5 MPa à 28 jours. Le béton recyclé B100R1,2A a une résistance de 27 MPa environ à 28 jours. (Nam et al., 2014)

Rapport E/L	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
En entrée de malaxeur	0,59	0,60	0,6	0,48	0,45	0,45
En sortie de malaxeur	0,59	0,60	0,52	0,48	0,45	0,38

Tableau 3- 13 : variation du rapport E/L en entrée et en sortie de malaxeur, bétons recyclés

Le béton recyclé Gc<sub>100R0,5A</sub> a une meilleure résistance à la compression à 28 jours que le béton témoin correspondant, (+ 6,7 %).

Cette amélioration de la résistance mécanique représente certes un effet de la baisse du rapport E/L due à l'absorption d'eau par les gravillons recyclés. Mais elle est aussi due à une plus grande quantité de ciment mise en œuvre (Hansen, 1992) (Xiao et al., 2012). En effet, les formulations des bétons recyclés ont une teneur en ciment plus élevée que les formulations des bétons témoins conformément au tableau 1-2 du chapitre 2.

La figure 3-25 donne les résistances mécaniques à la compression des bétons en fonction des rapports E/L calculés en sortie de malaxeur.

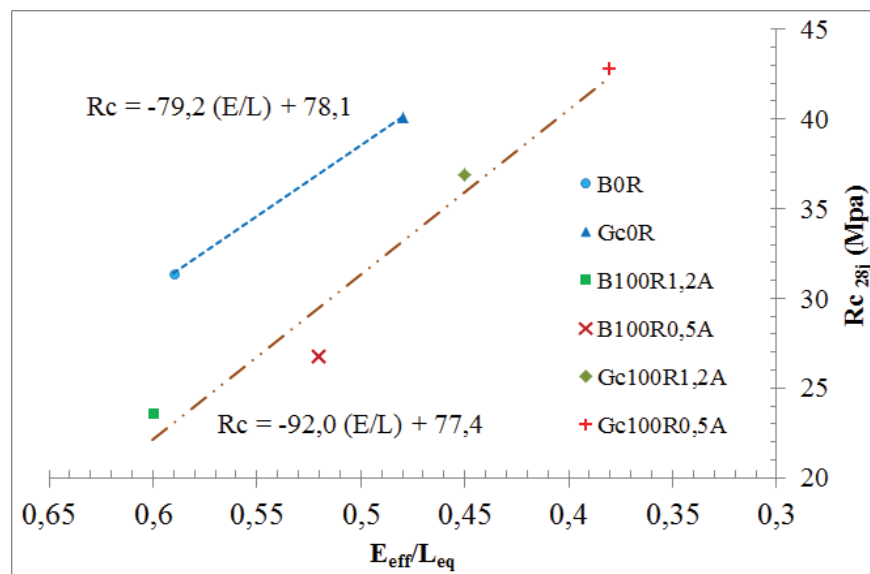


Figure 3- 25 : résistances mécaniques en compression à 28 jours en fonction du rapport  $E_{eff}/L_{eq}$

## 5.2 Corrélation avec quelques méthodes de formulation

A partir de la figure 3-25, il est possible de calculer les coefficients  $K_g$  et  $K_b$  des formules de compression uni-axiales des relations de Feret et de Bolomey (Bernier, 2004) appliquées aux bétons à gravillons naturels et aux bétons à gravillons recyclés comme l'indique le tableau 3-14.

Coefficients de Feret et de Bolomey	Gravillons naturels	Gravillons recyclés
$K_g$ (Feret)	5.1	4,4 ± 0,3
$K_b$ (Bolomey)	0,53	0,46 ± 0,2

Tableau 3- 14 : coefficients de Feret et de Bolomey pour les bétons naturels et recyclés

A titre de comparaison, le coefficient  $K_b$  de graviers calcaires dont  $d_{max} = 20$  mm est de l'ordre de 0,6. Cela met en évidence que les gravillons recyclés ont des caractéristiques sensiblement inférieures aux granulats naturels.

La comparaison des coefficients  $K_g$  obtenus pour les granulats naturels ou recyclés sont à comparer aux valeurs retenues dans le rapport de formulation de (Sedran, 2013) qui sont récapitulées dans le tableau 3-15.

	Granulats naturels	Granulats recyclés
Sables	5.77	4.42
Graviers	5.77	5.17

Tableau 3- 15 : coefficients de Féret issues du rapport de formulation, (Sedran, 2013)

Les écarts entre valeurs de formulation et valeurs calculées par calculs inverses à partir des expériences sont de l'ordre de 15 % pour tous les bétons. Les coefficient  $K_g$  obtenus sont comparables aux coefficients  $K_g$  des gravillons recyclés « G3 » de l'étude de DAO, (2012).

Les gravillons recyclés ont des caractéristiques plus faibles que les gravillons naturels et il est constaté une dégradation parfois forte des résistances mécaniques. Cela disqualifie la plupart des formulations de recyclés vis à vis des imposés de la norme qui précisent notamment que  $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$  MPa.

- $f_{cm}$  : moyenne des essais réalisés
- $f_{ck}$  : valeur caractéristique cible (25 ou 35 MPa dans notre étude pour les familles B ou Gc)

Cette chute des résistances est probablement due à une plus grande fragilité des granulats qu'aux conditions d'adhérence entre les granulats et la pâte.

En effet, (DAO, 2012) et (LE, 2015) montrent que le paramètre p du modèle de résistance à deux paramètres (p et q) et qui traduit l'adhérence granulats-pâte est meilleur pour des granulats recyclés que pour des naturels. En revanche, le rapport p/q qui traduit l'effet plafond de la résistance des granulats diminue pour des recyclés (LE, 2015).

## 6 SYNTHÈSE DU CHAPITRE TROIS

Ce chapitre a montré l'existence de transferts hydriques granulats recyclés-pâte du béton dont le plus important est l'absorption d'eau dans le malaxeur par des gravillons recyclés partiellement saturés.

Pour des recyclés, ce résultat valide l'usage qui consiste à considérer qu'en sortie de malaxeur, les gravillons sont à leur absorption nominale (1A). En revanche, celle-ci est 5 à 6 fois plus grande que pour des gravillons naturels et elle est connue avec moins de précision. L'aléa qui en résulte est une moins bonne maîtrise de l'eau efficace du béton qui est un paramètre clef pour la prévision de son ouvrabilité et de ses résistances mécaniques.

Ce chapitre a également montré que pour des conditions extrêmes de séchage associées avec de faible quantité d'eau initiale dans la pâte, au cours du temps, il est possible de voir un transfert hydrique inverse depuis les gravillons qui se dé-saturent partiellement vers la pâte. Ce phénomène reste faible durant la phase plastique, c'est surtout la pâte du béton qui va se dé-saturer sous l'effet du séchage.

Cette faible désorption, difficilement mesurable et interprétable, est peut être due au fait que le calcul réalisé est un calcul moyen sur la hauteur complète de l'échantillon. La partie inférieure de l'échantillon pourrait se désorber moins que la partie supérieure qui est à proximité de la surface d'échange hydrique par séchage.

Ces transferts font faire évoluer le rapport E/L et le volume de pâte au cours du temps. En particulier, la forte absorption des granulats recyclés partiellement présaturés dans le malaxeur a un effet sur l'ouvrabilité du béton frais et sur l'obtention des résistances mécaniques prévisionnelles.

Toutefois, les effets de ces transferts hydriques viennent s'additionner aux autres phénomènes, tels que le vieillissement de la pâte qui contrôle l'essentiel de l'évolution de l'ouvrabilité en fonction du temps.

L'héritage de ce chapitre pour la suite de l'étude concernant l'étude des déformations du béton plastique et à sa fissuration, réside dans la meilleure connaissance de l'eau totale et de l'eau efficace présentes dans le béton au cours du temps.

En effet, la connaissance de l'absorption des granulats recyclés associée à une évaluation fine des départs d'eau par séchage permet de mieux connaître des grandeurs caractéristiques comme le rapport E/L, ou la teneur en eau du béton en fonction du temps.

## **CHAPITRE 4 : ETUDE DES DEFORMATIONS ET DE LA FISSURATION DU BETON A L'ETAT PLASTIQUE**

Ce chapitre s'appuie sur les résultats du chapitre 3 afin d'étudier les déformations du béton frais, les mécanismes qui les gouvernent et la fissuration qui en résulte.

Dans un premier temps, l'étude porte sur l'étude de la fissuration du béton. Cette approche macroscopique couplée s'intéresse aux conséquences et effets des phénomènes physiques en jeu au sein d'un moule de fissuration.

Dans un deuxième temps, le travail se poursuit avec une approche découplée des mesures et des grandeurs physiques. Cette étude a pour objectif la compréhension de la phénoménologie et de la cinétique des essais pour mettre en lumière les phénomènes physiques de consolidation et de retrait plastique du béton frais.

Suite à la compréhension des phénomènes physiques, le troisième paragraphe s'organise autour d'une discussion comparative entre bétons par résultat de mesure pour décrire les comportements observés et étayer l'argumentaire.

Enfin, une synthèse de tous les résultats et développements constitue la dernière partie de ce chapitre.

### **1 FISSURATION DU BETON A L'ETAT PLASTIQUE**

#### **1.1 Positionnement du problème**

L'étude de la fissuration s'appuie sur l'utilisation du moule de retrait gêné et de fissuration décrit au chap 2. §7.4. Les principaux résultats concernent l'âge d'apparition de la fissure et la valeur de l'ouverture de fissure en fin d'essai.

Il faut rappeler que le moule de retrait gêné et de fissuration est conçu pour que la fissure se produise en partie centrale au droit de la dent de fissuration. Cet essai induit donc une fissuration structurelle du matériau. Cette approche macroscopique couplée constate la conséquence ultime (fissure) d'un processus qui se met en place dès le démarrage de l'expérience.

Lors des essais, il a été constaté que la fissuration n'est pas homogène au droit de la dent de fissuration du moule. D'une part, l'apparition de la fissure est en général effective en partie centrale du moule. D'autre part, la valeur de l'ouverture de la fissure n'est pas constante sur la largeur du moule.

En effet, la figure 4-1 met en lumière l'hétérogénéité de l'ouverture de la fissure qui est minimale de part et d'autre du moule à cause des effets de bord.



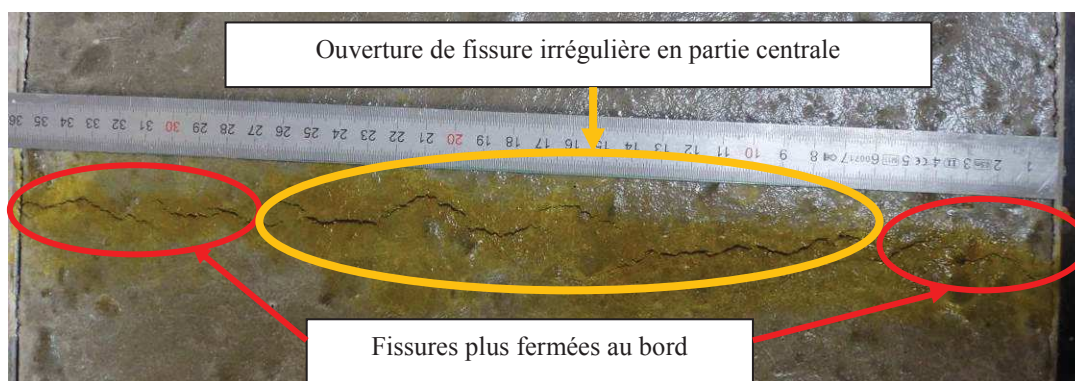


Figure 4-1 : photo à  $t_0 + 7\text{ h }30$  de la fissure du béton recyclé  $B_{100R1,2A}$

Pour tous les essais, il a donc été décidé de respecter systématiquement les mêmes approches de calcul de l'âge de fissuration et de l'ouverture de fissure. Elles sont détaillées dans les deux paragraphes qui suivent.

## 1.2 Détermination de l'âge de fissuration

Une procédure informatisée de détermination de l'âge de fissuration a été évaluée sur quelques essais. Elle s'appuie sur la vectorisation de l'image puis sur l'étude cinématique de l'échantillon au moment de la fissuration. Cette procédure a suffisamment de finesse pour déterminer le moment d'apparition de la fissure mais aussi le moment où les deux parties de part et d'autre de la fissure vont commencer à se déplacer l'une par rapport à l'autre.

Toutefois, la lourdeur du traitement n'a pas été compatible avec la quantité d'essais à réaliser. Par conséquent, la détermination de l'âge d'apparition de la fissure est restée visuelle conformément au protocole décrit au § 2.4.1 du chapitre 2.

A l'aide d'un exemple, la figure 4-2 détaille la méthodologie de détermination de l'âge d'apparition de la fissure sur des clichés pris par la caméra B en place au-dessus du moule de fissuration :

- à gauche : un cliché juste avant l'ouverture de la fissure. A noter que la partie centrale du moule se situe au droit de la flèche verticale
- au centre : le moment précis où la fissure apparaît. Ce sera l'âge de fissuration nommé  $\{t_{\text{fiss}}\}$
- à droite : la fissure se développe vers le bord,  $\{t_{\text{fiss}}\} + 20\text{ mn}$  dans l'exemple.

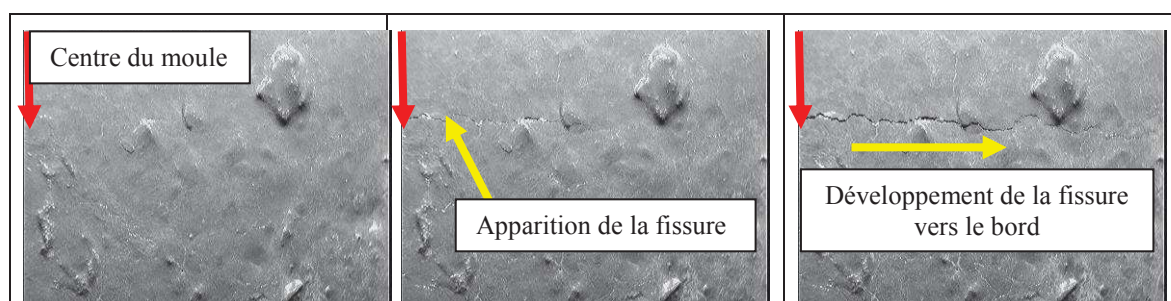


Figure 4-2 : évolution de la fissuration sur un béton  $B_{100R1,2A}$ , essai du 02 avril 2014

Le tableau 4-1 récapitule pour tous les bétons étudiés et pour deux essais qualifiés par béton l'âge d'apparition de la fissure conformément aux spécifications décrites ci-dessus.

	Age d'apparition de la fissure $\{t_{fiss}\}$ compté à partir de $t_0$ , introduction de l'eau d'ajout dans le malaxeur		
	Essai 1	Essai 2	Moyenne essai 1-essai 2
B <sub>0R</sub>	1,67 h (100 mn)	1,84 h (110 mn)	1.76 h (105 mn)
B <sub>100R1,2A</sub>	2,32 h (139 mn)	2,34 h (140 mn)	2,34 h (140 mn)
B <sub>100R0,5A</sub>	1,70 h (102 mn)	1,70 h (101 mn)	1,70 h (102 mn)
Gc <sub>0R</sub>	1,72 h (103 mn)	1,87 h (112 mn)	1,80 h (108 mn)
Gc <sub>100R1,2A</sub>	1,83 h (110 mn)	1,97 h (118 mn)	1,90 h (114 mn)
Gc <sub>100R0,5A</sub>	1,35 h (81 mn)	1,17 h (70 mn)	1,26 h (76 mn)

Tableau 4- 1 : récapitulatif du temps  $\{t_{fiss}\}$ , bétons de bâtiment et de génie civil

Les résultats du tableau 4-1 mettent en évidence que les âges de fissuration sont relativement proches (100 à 120 mn) pour 4 bétons B<sub>0R</sub>, B<sub>100R0,5A</sub>, Gc<sub>0R</sub>, Gc<sub>100R1,2A</sub>.

A contrario, le béton recyclé B<sub>100R1,2A</sub> présente un âge de fissuration plus long (environ 35-40 mn de plus) et le béton recyclé Gc<sub>100R0,5A</sub> présente un âge de fissuration plus faible (30-40 mn de moins). Il semble donc que la substitution par les recyclés amène un décalage de la fissuration entre B<sub>0R</sub> et B<sub>100R1,2A</sub>.

Pour les bétons recyclés, la figure 4-3 met en exergue une corrélation entre la quantité d'eau totale du béton et le temps de fissuration. Pour les bétons recyclés, plus le béton comprend une quantité d'eau importante introduite dans le malaxeur, plus l'âge de fissuration sera grand. Cette affirmation n'est pas vraie pour les bétons naturels dont les âges de fissuration sont comparables malgré des quantités d'eau totales différentes.

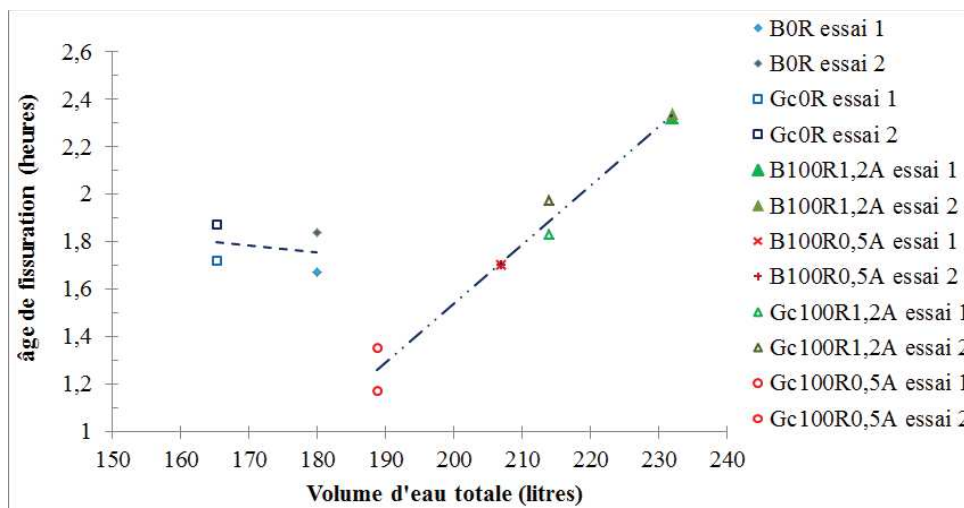


Figure 4- 3 : temps de fissuration en fonction de l'eau totale initiale, 2 bétons naturels et 4 bétons recyclés

Dans la mesure où les essais sont placés sous un séchage par vent de 8 m/s, l'hypothèse d'une corrélation quantité d'eau / temps de séchage / fissuration paraît séduisante lors d'une première approche. Mais compte tenu des flux de séchage différents d'un béton à l'autre (cf chap 3. §1.1.2), la prudence s'impose.

### 1.3 Détermination de l'ouverture de fissure

Les valeurs représentatives de la fissuration sont à considérer dans la partie centrale du moule. Toutefois, même dans cette zone, la fissuration est aléatoire et irrégulière (figure 4-1).

La grande variabilité de la valeur d'ouverture de fissure amène à se poser la question de la valeur représentative à considérer : valeur moyenne, valeur maximale ou valeur caractéristique basée sur un fractile conformément aux spécifications des Eurocodes structuraux 0 et 2.

Il est possible de considérer l'aire totale de fissure ou la valeur maximale de l'ouverture de fissure (Soroushian and Ravanbakhsh, 1998). Toutefois, cette approche conduit à s'intéresser soit à la valeur moyenne (y compris les effets de bords) ou bien à la valeur maximale qui peut être liée à la position d'un gros granulat ou de toute autre hétérogénéité locale au niveau de la dent de fissuration.

D'autres essais menés sur des dalles considèrent l'aire et le linéaire cumulés de fissures ramenés à la surface, (Barluenga and Hernández-Olivares, 2007), ce qui revient à moyenner l'ouverture des fissures.

Dans cette étude, conformément aux spécifications des Eurocodes structuraux, il nous a semblé que la meilleure valeur représentative à choisir pour l'ouverture des fissures devait être la valeur caractéristique au fractile de 95 %,  $w_k$ .

Le calcul de l'ouverture de fissure est basé sur l'analyse d'images par le logiciel « ImageJ », (chapitre 2, § 7). Le traitement des clichés par analyse d'image au droit des zones les plus ouvertes autorise un calcul de moyenne et d'écart type sur un effectif de l'ordre de 25 mesures. Enfin la valeur caractéristique de l'ouverture de fissure est calculée conformément à l'équation Eq(21). Elle est comprise entre  $W_{\text{moyen}}$  et  $W_{\text{max}}$ .

$$w_k = \bar{x} + 1,96 \frac{\sigma(X)}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq (21)}$$

$W_{\text{moyen}}$  : moyenne arithmétique des mesures d'ouverture de fissures,  $W_k$  : ouverture de fissure caractéristique au fractile à 95 %,  $W_{\text{max}}$  : ouverture de fissure maximale mesurée

Le tableau 4-2 récapitule les valeurs d'ouverture de fissures moyenne, maximale et caractéristique pour les 12 essais réalisés à raison de deux essais par béton, 2 bétons naturels et 4 bétons recyclés.

Ouverture de fissure W (mm)	$B_{0R}$	$B_{100R1,2A}$	$B_{100R0,5A}$	$Gc_{0R}$	$Gc_{100R1,2A}$	$Gc_{100R0,5A}$
Wmoyenne : essai 1-essai 2	0,68-0,59	0,96-0,66	0,82-0,72	0,63-0,68	0,77-0,85	0,73-0,62
Wmaximale: essai 1-essai 2	0,78-0,81	1,28-1,29	1,01-0,89	0,71-0,94	1,50-1,39	1,02-1,11
Wcaractéristique: essai 1-essai 2	0,70-0,71	1,07-0,96	0,87-0,78	0,65-0,80	1,29-1,15	0,96-0,88

Tableau 4- 2 : valeurs d'ouvertures de fissures moyennes, maximales et caractéristiques des bétons étudiés,  $B_{0R}$ ,  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5A}$ ,  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ ,  $Gc_{100R0,5A}$

Le tableau 4-2 met en lumière l'aptitude des bétons recyclés pré-saturés à 1,2A à fissurer davantage que les bétons témoins  $B_{0R}$  et  $Gc_{0R}$ .

De la même manière, les bétons recyclés pré-saturés à 1,2A ont des ouvertures de fissures plus grandes que s'ils ont été pré-saturés à 0,5A.

L'étude des valeurs caractéristiques calculées montre qu'elles sont parfois plus proches des valeurs moyennes et parfois plus proches des valeurs maximales. Ce résultat est lié à la typologie de la fissuration de chaque essai. Dans certains cas, la dispersion des mesures est grande et dans d'autres l'ouverture de fissure est assez régulière et oscille autour de la valeur moyenne.

L'ordre de grandeur de l'ouverture de fissure maximale obtenu pour le béton témoin  $Gc_{0R}$  (0,71 mm / 0,94 mm) est comparable à des résultats issus de la bibliographie pour des bétons semblables où  $W_{max} = 0,8$  à 1 mm (Leemann et al., 2014) ou encore 1,1 mm (Soroushian and Ravanbakhsh, 1998).

## 2 DESCRIPTION DES PHENOMENES PHYSIQUES

Ce chapitre s'intéresse aux mécanismes physiques présents et observables pour les différents bétons étudiés. La quantité d'eau mise en œuvre, le degré de pré-saturation des gravillons recyclés, le séchage sont autant de paramètres qui vont influencer les phénomènes physiques et leurs cinétiques.

Pour expliquer le plus clairement et le plus simplement possible ce qui se passe pendant l'essai, le paragraphe commence par une exploitation des observations visuelles effectuées pendant les expériences. A la lumière de ces observations, la méthodologie générale d'étude des phénomènes physiques et de détermination des âges caractéristiques de la cinétique de l'essai sera proposée.

Puis, cette méthodologie sera appliquée aux six bétons étudiés pour pouvoir les identifier par leur comportement et les classer en familles phénoménologiques s'il y a lieu.

Ensuite, la compréhension plus fine des phénomènes physiques en jeu permettra de passer à l'étude comparative des bétons entre eux au travers d'une analyse découpée des différents résultats des mesures expérimentales : tassement, pression capillaire, retrait plastique. L'objectif sera de décrire l'essai, de mieux le comprendre et d'argumenter les hypothèses et raisonnements faits.

### 2.1 Observations expérimentales

Au travers des observations faites lors des expériences, deux séries d'observations expérimentales apparaissent. Elles sont sommairement et chronologiquement décrites au sein du tableau 4-3.

Chronologie	Série d'observations 1	Série d'observations 2
Mise en place du béton dans les moules	Béton à consistance fluide Mise en place aisée même sans vibration	Béton plus visqueux Mise en place à l'aide de la vibration
Début de l'essai et très rapidement	Pellicule d'eau de ressuage (figure 4-4) éventuellement importante pellicule d'eau	Peu d'eau de ressuage (figure 4-4) ou pas d'eau de ressuage
Au bout de quelques dizaines de minutes	Evaporation de l'eau ressuée en surface et séchage de la surface. Le temps d'évaporation de cette eau est variable d'un béton à l'autre en fonction de l'eau ressuée présente en surface	
Puis après une heure environ	Les déformations sont visibles car une légère fissure se dessine en périphérie de l'échantillon au droit de l'interface béton / moule	
Apparition de la fissure	En fonction du temps $\{t_{fiss}\}$ déterminé au § 1.2 du chapitre 4, la fissure apparaît, se développe puis semble se stabiliser	
Fin de l'essai	7 h 20 après l'insertion de l'eau d'ajout dans le malaxeur, l'essai est arrêté, la fissure est photographiée pour calcul de l'ouverture de fissure	

Tableau 4- 3 : chronologie des essais réalisés. Visualisation de deux phénoménologies

La figure 4-4 souligne la différence d'observation au début de l'essai avec présence d'eau de ressuage dans un cas et absence d'eau ressuée dans l'autre cas.

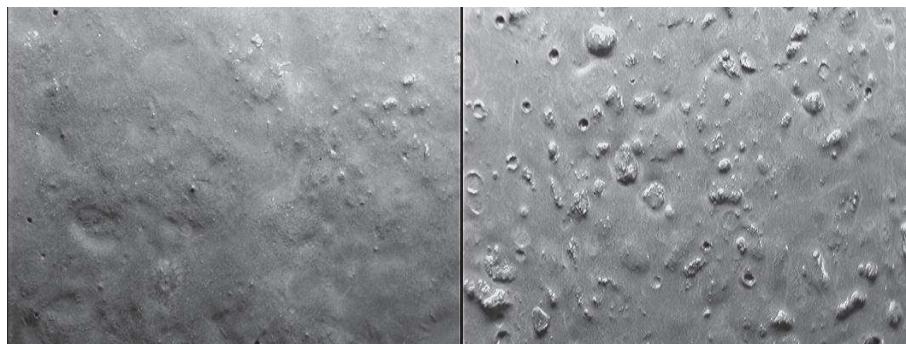


Figure 4- 4 : état de surface en début d'essai...

Béton  $B_{0R}$  - pellicule d'eau en surface (à gauche) - Béton  $Gc_{100R0,5A}$  - surface mat (à droite)

## 2.2 Méthodologie de détermination des temps caractéristiques

En complément de l'âge de fissuration  $\{t_{fiss}\}$ , la phénoménologie des essais incite à déterminer d'autres temps caractéristiques qui sont les suivants :

- l'âge de fin de « consolidation linéaire » : nommé  $\{t_{cons}\}$ . Il correspond à la fin de la période de ressuage à taux constant. Il se caractérise par la fin de la partie linéaire de la courbe des déformations verticales (Powers, 1968) (Radocea, 1990) (Josserand, 2002) (§ 3.4 du chapitre 1)
- l'âge de démarrage des pressions capillaires ( $P_c$ ) : il sera nommé  $\{t_{Pc}\}$ . Il sera déterminé comme le décollage des courbes de ( $P_c$ ) et de retrait horizontal. La détermination de  $\{t_{Pc}\}$  consistera à corrélérer le démarrage de la ( $P_c$ ) (franchissement d'un seuil de 5 hPa) avec le décollage de la courbe de retrait (premier changement de pente)
- l'âge d'entrée d'air dans le système poreux : nommé  $\{t_{pair}\}$ . La notion d'entrée d'air dans le système poreux est décrite par (Slowik and Ju, 2011) au § 3.5.4 du chapitre 1. Sa détermination passera par l'emploi du modèle de (Fredlund and Xing, 1994) applicable aux sols qui consiste à exploiter la courbe caractéristique du matériau telle qu'elle est décrite au § 3-6 du chapitre 1.

La figure 4-5 détaille la méthode de détermination des temps  $\{t_{cons}\}$  et  $\{t_{Pc}\}$ .

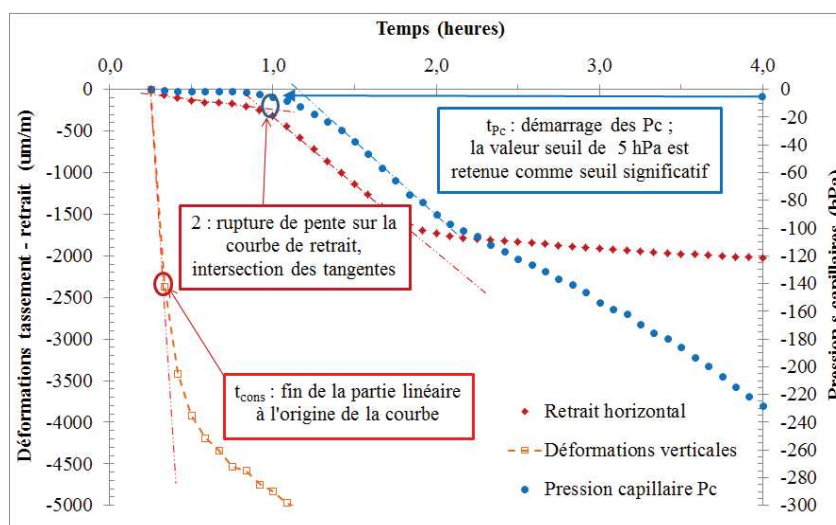


Figure 4- 5 : méthodologie de détermination des temps  $\{t_{cons}\}$  et  $\{t_{Pc}\}$ .

### 2.3 Déformations verticales : détermination de l'âge $\{t_{\text{cons}}\}$

La courbe des déformations verticales en fonction du temps est usuellement appelé courbe de tassement. Toutefois les déformations verticales mesurées résultent du cumul de deux phénomènes physiques, la consolidation unidirectionnelle qui s'accompagne du ressuage et le retrait volumique (Holt, 2001) et (Turcry, 2004).

Dans un premier temps, dans ce paragraphe, il est émis le postulat que la composante verticale du retrait volumique est similaire à la moyenne des composantes horizontales selon X, Y considérées comme isotropes (chap 2. § 10.3).

Par conséquent, les courbes de tassement qui résultent uniquement des déformations de consolidation sont obtenues par soustraction des valeurs de retrait horizontal aux courbes de déformations verticales.

Il est également possible de calculer la hauteur d'eau théorique perdue par évaporation en fonction du temps et calculée conformément à l'équation Eq(22).

$$H_{w \text{ évaporée}} = 1000 \cdot J \cdot t \text{ (}\mu\text{m)} \quad \text{Eq (22)}$$

$H_{w \text{ évaporée}}$  : valeur théorique d'eau évaporée en micromètre, J est le flux d'évaporation surfacique, (Kg/m<sup>2</sup>/h) récapitulé au § 1-2 du chapitre 3, t est le temps d'exposition au vent.

Les figures 4-6 et 4-7 synthétisent les courbes de tassement et d'eau évaporée théorique pour un essai représentatif de chaque béton recyclé, B<sub>100R</sub>1,2A et B<sub>100R</sub>0,5A et Gc<sub>100R</sub>1,2A et Gc<sub>100R</sub>0,5A.

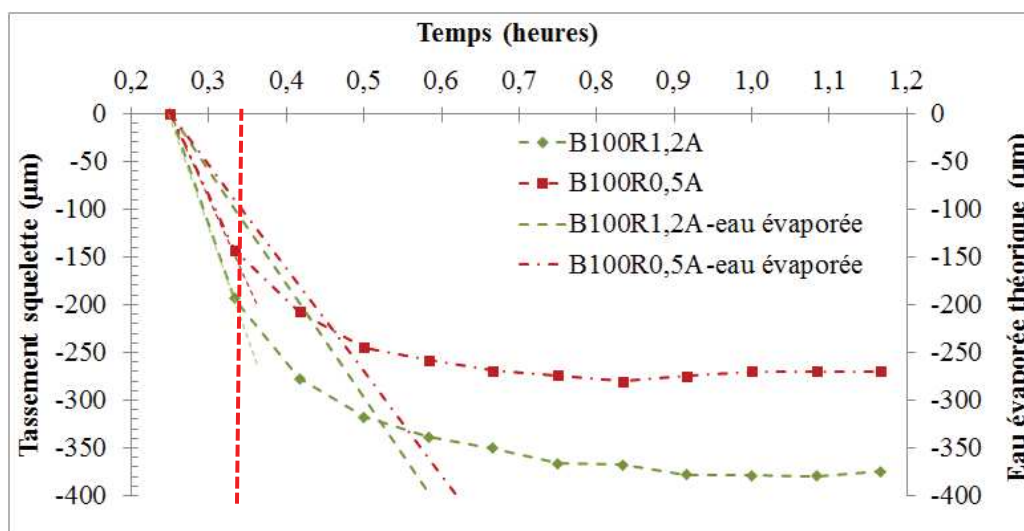


Figure 4- 6 : courbes de tassement et de hauteur d'eau évaporée en fonction du temps bétons B<sub>100R</sub>1,2A et B<sub>100R</sub>0,5A

Pour les bétons de bâtiment, la figure 4-6 met en relief un âge  $\{t_{\text{cons}}\}$  égal à 0,33 h pour les deux bétons B<sub>100R</sub>1,2A et B<sub>100R</sub>0,5A. Au-delà, la consolidation continue mais diminue en intensité. Elle n'est plus à taux constant (§ 3.4 du chapitre 1). Elle se termine approximativement à 0,6 et 0,8 heure pour les deux bétons B<sub>100R</sub>0,5A et B<sub>100R</sub>1,2A.

L'âge  $\{t_{\text{cons}}\}$  du béton naturel B<sub>0R</sub> non représenté ici est également égal à 0,33 h.

La comparaison des courbes de tassement et d'eau évaporée théorique montre que le tassement est plus important en début d'essai que la hauteur d'eau évaporée. Par conséquent, de l'eau ressuée s'accumule en surface du béton. Le constat est cohérent avec les observations du § 2.1.

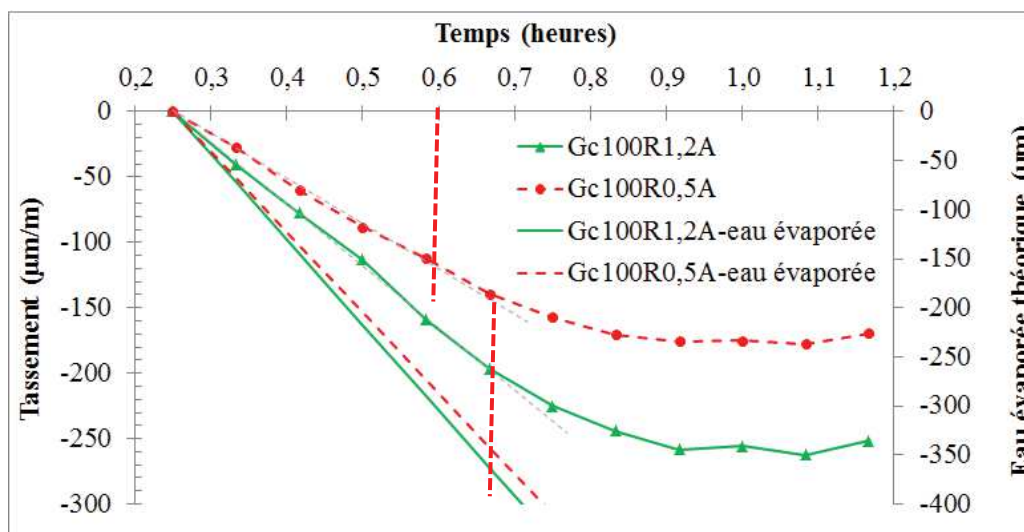


Figure 4- 7 : courbes de tassement et de hauteur d'eau évaporée en fonction du temps  $Gc_{100R1,2A}$  et  $Gc_{100R0,5A}$

Pour les bétons de génie civil, la figure 4-7 montre que l'âge  $\{t_{cons}\}$  est égal à 0,58 h / 0,67 h pour le béton  $Gc_{100R0,5A}$  et égal à 0,67 h / 0,75 h pour le béton  $Gc_{100R1,2A}$ . Puis, la consolidation diminue très rapidement pour se terminer approximativement à 0,9 heure pour les deux bétons recyclés concernés. L'âge  $\{t_{cons}\}$  du béton naturel  $Gc_{0R}$  vaut 0,60 h.

En bilan, conformément aux observations faites lors des expériences, on constate que les trois bétons de bâtiment ressuent, en particulier les bétons  $B_{0R}$  et  $B_{100R1,2A}$ . Ce phénomène ne se manifeste pas pour les trois bétons de génie civil.

## 2.4 Pressions capillaires et retrait : détermination de l'âge $\{t_{Pc}\}$

Compte tenu de la présence ou non d'eau de ressuage protégeant le béton de la dessiccation, l'étude va maintenant porter sur l'âge  $\{t_{Pc}\}$  à partir duquel la pression capillaire se développe. Il est déterminé par l'étude des courbes de pression capillaire et de retrait pour chaque essai réalisé, conformément aux spécifications du § 2-2 précédent. Le tableau 4-4 récapitule l'âge de démarrage des dépressions capillaires  $\{t_{Pc}\}$  pour chaque essai.

	Age de démarrage de la Pc : $\{t_{Pc}\}$ essai 1	Age de démarrage de la Pc : $\{t_{Pc}\}$ essai 2
$B_{0R}$	0,80 h (48 mn)	0,90 h (54 mn)
$B_{100R1,2A}$	0,80 h (48 mn)	1,00 h (60 mn)
$B_{100R0,5A}$	0,67 h (40mn)	0,67 h (40mn)
$Gc_{0R}$	0,57 h (35 mn)	0,57 h (35 mn)
$Gc_{100R1,2A}$	0,57 h (35 mn)	0,67 h (40 mn)
$Gc_{100R0,5A}$	0,57 h (35 mn)	0,42 h (25 mn)

Tableau 4-4 : temps de démarrage de la Pc, Bétons naturels (x2) et recyclés (x4)



Globalement, l'âge de démarrage de la pression capillaire qui traduit un début de désaturation des pores du matériau est plus grand pour les bétons de bâtiments :

- [0,8 ; 0,9 h] pour le béton B<sub>0R</sub> à comparer à 0,57 h pour le béton Gc<sub>0R</sub>
- [0,8 ; 1,0 h] pour le béton B<sub>100R1,2A</sub> à comparer à [0,57 h ; 0,67 h] pour le béton Gc<sub>100R1,2A</sub>
- 0,67 h pour le béton B<sub>100R0,5A</sub> à comparer à [0,42 h ; 0,57 h] pour le béton Gc<sub>100R0,5A</sub>.

Ces âges sont à corrélérer avec les flux de séchage (§1.2, chapitre 3) qui sont plus importants pour les bétons de bâtiment (B<sub>0R</sub> 0,97 ; B<sub>100R1,2A</sub> 1,19 ; B<sub>100R0,5A</sub> 1,08 Kg/m<sup>2</sup>.h) que pour les bétons de génie civil (Gc<sub>0R</sub> 0,8 ; Gc<sub>100R1,2A</sub> 0,87 ; Gc<sub>100R0,5A</sub> 0,82 Kg/m<sup>2</sup>.h).

En bilan, malgré un séchage plus important, le démarrage des pressions capillaires des bétons de bâtiments est retardé de 10 à 15 minutes par rapport aux bétons de génie civil. Ce retard est certainement dû à la présence d'eau ressuée en surface des bétons de bâtiment qui les protège de la dessiccation par effet de cure.

## 2.5 Courbes caractéristiques des matériaux : détermination de $\{t_{Pair}\}$

### 2.5.1 Position du problème

Lors du séchage, les milieux poreux déformables restent saturés jusqu'à l'entrée d'air dans les pores.

Pour assurer un flux de masse constant à la surface, et dans un premier temps égal au flux évaporé, il faut que la pression d'eau dans le béton frais diminue. Il en résulte le développement de la pression capillaire sous la forme d'une dépression, négative, qui est liée à la formation de ménisques dans les pores d'abord à la surface du béton. En retrait libre, cette dépression est à l'origine de la compression de la phase solide qui conduit à la déformation de retrait plastique du béton. Lorsque sa capacité de déformation devient insuffisante, la fissuration apparaît (Mbemba, 2010). La limitation des capacités de déformation est un retrait gêné soit par le squelette solide qui se raidit, soit par les conditions aux limites de l'échantillon (cas du moule de fissuration).

Le développement de la pression capillaire est lié aux paramètres mécaniques du béton et à son aptitude à se déformer ainsi qu'aux paramètres de transfert comme la perméabilité à l'état frais qui va réguler le transport d'eau dans le béton (Wittmann, 1976) (Aregba et al., 1990) (Cáceres Salazar, 2006). Pour les milieux poreux les moins déformables et perméables, le développement de la pression capillaire est rapide et fort. C'est le cas des bétons à faible rapport E/L. Si le milieu poreux est très déformable et très perméable, malgré de plus fortes vitesses de séchage, la montée de la dépression capillaire est plus lente (Mbemba, 2010).

Sous l'effet de la pression capillaire qui se développe, le matériau se déforme non uniformément près de la surface. Lorsque la capacité de déformation du matériau diminue, l'eau présente dans la porosité ne peut plus occuper tout l'espace disponible et l'air entre alors dans le système. Une valeur particulière de pression capillaire est identifiée comme la pression d'entrée d'air dans le matériau (Slowik and Ju, 2011). Ce moment est identifié comme particulièrement à risque pour l'initiation de la fissuration. Ces résultats sont similaires à ceux observés pour les sols fins soumis à la dessiccation tels que décrit au § 3-6 du chapitre 1.

Pour des sols, la pression d'entrée d'air est aussi décrite par (Peron et al., 2009) comme la pression capillaire qui conduit localement à une zone drainée formant un défaut dans le matériau. Ce défaut constitue une faiblesse mécanique et initie la fissuration.

Conformément à ce qui est écrit au chap.1 § 3-6 et aux développements de (Fredlund and Xing, 1994) pour un matériau incompressible<sup>41</sup> et assimilable à un sol fin, la détermination de la pression d'entrée d'air nécessite la construction de la courbe caractéristique sol-eau qui donne la teneur en eau en fonction de la dépression capillaire de la phase liquide (Devillers and El Youssoufi, 2009).

La pression capillaire est mesurée dans le moule de retrait libre soumis à la dessiccation. La teneur en eau du béton se calcule en fonction des résultats du chapitre 3 qui a permis de déterminer la quantité d'eau dans les bétons en fonction du temps.

La figure 4-8 donne un exemple de courbes de teneur en eau du béton en fonction du temps. Compte tenu des hypothèses retenues en fin de chapitre 3, le début de l'essai étant 0,25 heure après l'introduction de l'eau dans le malaxeur, la teneur en eau du béton va essentiellement évoluer en fonction du flux de séchage propre à chaque béton.

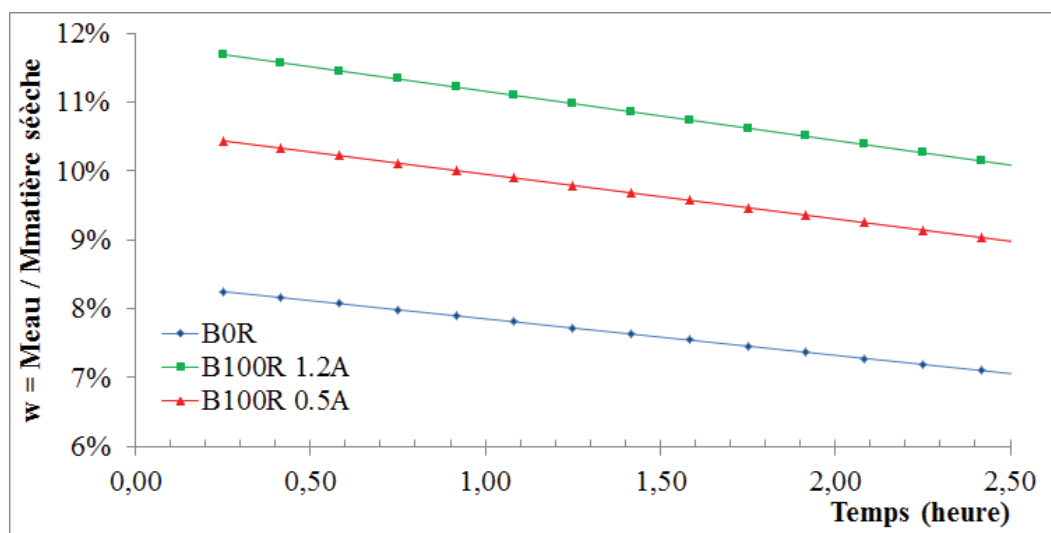


Figure 4- 8 : courbes de variation de la teneur en eau du béton en fonction du temps, bétons  $B_{0R}$ ,  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5A}$

A l'aide de ces données expérimentales, les courbes caractéristiques sol-eau de chaque béton étudié sont construites en repère semi-logarithmique pour déterminer graphiquement la pression d'entrée d'air conformément à (Fredlund and Xing, 1994), cf chapitre 1 § 3.6.

La lecture des courbes de pression capillaire en fonction du temps permettra alors de déterminer l'âge de l'entrée d'air dans le matériau :  $\{t_{\text{Pair}}\}$ .

<sup>41</sup> Les grains solides sont supposés incompressibles dans les calculs de déformation. Cette hypothèse revient à négliger la déformation propre des grains tels que les gravillons du béton devant celle du squelette qui est directement liée aux changements de volume des phases liquides et gazeuses (Devillers and El Youssoufi, 2009)

### 2.5.2 Construction des courbes caractéristiques des bétons étudiés

Les courbes caractéristiques béton-eau comportent en abscisse la dépression capillaire et en ordonnée la teneur en eau du béton  $w$  % qui est calculée à l'aide des résultats du chapitre 3. L'évolution de la quantité d'eau dans le béton dépend essentiellement du flux de séchage. L'absorption des gravillons recyclés se passe principalement dans le malaxeur et est donc antérieure au début de l'essai.

Quelques valeurs de teneur en eau des bétons étudiés sont récapitulées dans le tableau 4-5.

Teneur en eau	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
Initiale : $w_0$ (%)	8,3	11,7	10,4	7,5	10,6	9,4
$w$ à + 1 h (%)	8	11,4	10,2	7,3	10,4	9,2
$w$ à + 2 h (%)	7,5	10,5	9,5	6,9	9,9	8,7
$w$ à + 3 h (%)	7	10	8,9	6,5	9,3	8,2

Tableau 4- 5 : valeurs de teneur en eau du béton en fonction du temps  
Bétons B<sub>0R</sub>, B<sub>100R1,2A</sub>, B<sub>100R0,5A</sub>, Gc<sub>0R</sub>, Gc<sub>100R1,2A</sub>, Gc<sub>100R0,5A</sub>

La mise en forme des données  $w=f(P_c)$  permet alors d'obtenir les courbes caractéristiques des trois bétons de bâtiment et des trois bétons de génie civil (figures 4-9 et 4-10).

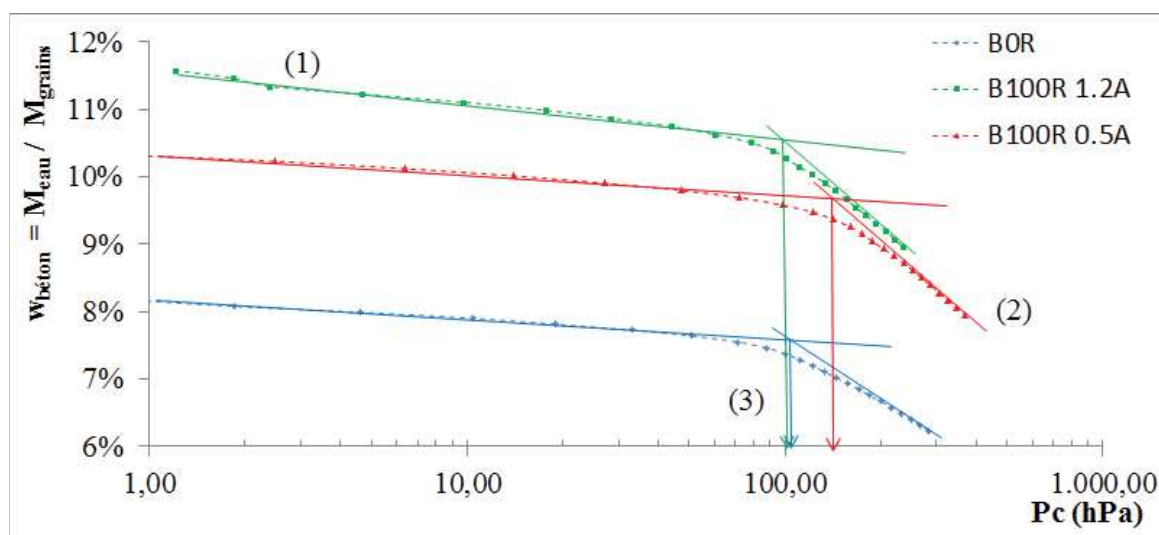


Figure 4- 9 : exemple de détermination de la pression d'entrée d'air, courbe  $w/w_0 = f(p_c)$ , bétons B<sub>0R</sub>, B<sub>100R1,2A</sub>, B<sub>100R0,5A</sub>

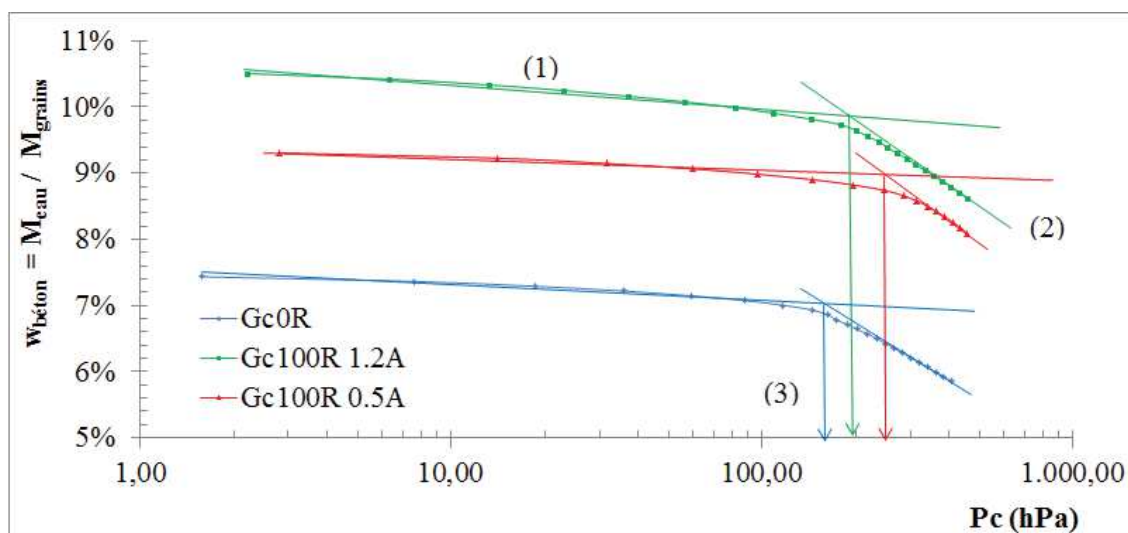


Figure 4- 10 : détermination de la pression d'entrée d'air, courbe  $w = f(p_c)$ , bétons  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ ,  $Gc_{100R0,5A}$

Le principe de la détermination de la pression d'entrée d'air est explicité au 3.6 du chapitre 1 d'après les spécifications de (Fredlund and Xing, 1994). La pression d'entrée d'air est lue sur le graphe (figures 4-9 et 4-10) comme la pression lue en (3) du point d'intersection de deux morceaux linéarisés de la courbe de désorption du béton : linéarisation à l'origine (1) et linéarisation de la 2<sup>ème</sup> partie descendante de la courbe de désorption (2).

Le tableau 4-6 résume la valeur de la pression d'entrée d'air calculée pour chaque béton.

	$B_{0R}$	$B_{100R1,2A}$	$B_{100R0,5A}$	$Gc_{0R}$	$Gc_{100R1,2A}$	$Gc_{100R0,5A}$
Pression d'entrée d'air (hPa)	100	100	120	150	190-200	200-220

Tableau 4- 6 : valeurs des pressions d'entrée d'air des six bétons naturels et recyclés étudiés

Cette valeur est identique pour les deux essais relatifs à chaque béton dans la mesure où les courbes de pression capillaire ont des valeurs très proches (coefficient de variation inférieur à 9 %).

La pression d'entrée d'air des bétons de bâtiment est de l'ordre de 100 à 120 hPa. Celle des bétons de génie civil est comprise entre 150 et 220 hPa. Il y a un rapport 1,5 à 2 entre les deux familles de bétons qu'ils soient naturels ou recyclés.

### 2.5.3 Détermination de l'âge d'entrée d'air : $\{t_{Pair}\}$

Pour chaque béton, la détermination de l'âge d'entrée d'air  $\{t_{Pair}\}$  s'effectue par lecture sur la courbe de la pression capillaire en fonction du temps.

A titre d'exemple, la figure 4-11 montre de quelle manière est déterminé l'âge  $\{t_{Pair}\}$  pour le béton  $B_{0R}$ . Le même travail est accompli pour les cinq autres bétons  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5A}$ ,  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ ,  $Gc_{100R0,5A}$ .

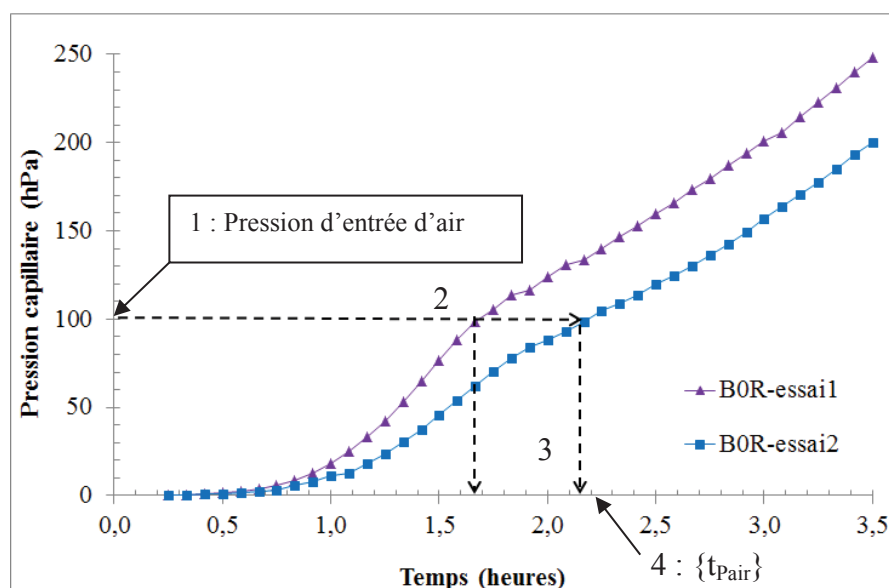


Figure 4- 11 : âge des pressions d'entrée d'air  $\{t_{Pair}\}$  des bétons  $B_{0R}$ ,  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5}$ ,  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ ,  $Gc_{100R0,5A}$

Le tableau 4-7 récapitule les âges  $\{t_{Pair}\}$  pour chaque béton et pour chaque essai.

	Pression d'entrée d'air (hPa)	Age de l'entrée d'air $\{t_{Pair}\}$	
		essai 1	essai 2
$B_{0R}$	100	1,67 h (100 mn)	2,17 h (130 mn)
$B_{100R1,2A}$	100	2,17 à 2,25 h (130-135 mn)	2,08 à 2,17 h (125-130 mn)
$B_{100R0,5A}$	120	1,75 h (105 mn)	1,75 h (105 mn)
$Gc_{0R}$	150	1,67 h (100 mn)	1,75 h (100 mn)
$Gc_{100R1,2A}$	190-200	1,92 à 2,00 h (115-120 mn)	1,92 h (115 mn)
$Gc_{100R0,5A}$	220	1,50 h (90 mn)	1,42 h (85 mn)

Tableau 4- 7 : rappel des pressions d'entrée d'air et des âges correspondants pour les bétons  $B_{0R}$ ,  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5}$ ,  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ ,  $Gc_{100R0,5A}$

Le tableau 4-6 montre que l'âge  $\{t_{Pair}\}$  du béton  $B_{100R1,2A}$  est le plus élevé (125-135 mn). A contrario l'âge  $\{t_{Pair}\}$  du béton  $Gc_{100R0,5A}$  est le plus faible (85-90 mn).

Pour les autres bétons,  $B_{0R}$ ,  $B_{100R0,5A}$ ,  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ , les valeurs de  $\{t_{Pair}\}$  s'échelonnent entre 100 et 130 minutes.

La comparaison des temps caractéristiques  $\{t_{Pair}\}$  et  $\{t_{fiss}\}$  sera développée en synthèse du chapitre 4.

## 2.6 Synthèse relative à la cinétique des essais

### 2.6.1 Bilan des âges caractéristiques

Ce paragraphe synthétise les temps caractéristiques calculés dans les § 1 et 2 du chap 4. Il est rappelé que ces âges sont  $\{t_{cons}\}$ ,  $\{t_{Pc}\}$ ,  $\{t_{Pair}\}$ ,  $\{t_{fiss}\}$  et sont définis § 1, 2.3, 2.4, 2.5 qui précèdent.

Le tableau 4-8 récapitule les âges caractéristiques calculés pour les 6 bétons étudiés et pour les 12 essais qui les caractérisent.

		Age de fin de période de consolidation linéaire : $\{t_{cons}\}$ (heures)	Age de démarrage des Pc : $\{t_{pc}\}$ (heures)	Age d'entrée d'air dans le milieu poreux : $\{t_{pair}\}$ (heures)	Age de fissuration : $\{t_{fiss}\}$ (heures)
B <sub>0R</sub>	Essai 1	0,33 h (20 mn)	0,80 h (48 mn)	1,67 h (100 mn)	1,67 h (100 mn)
	Essai 2		0,90 h (54 mn)	2,17 h (130 mn)	1,84 h (110 mn)
B <sub>100R</sub> 1,2A	Essai 1	0,33 h (20 mn)	0,80 h (48 mn)	2,17 à 2,25 h (130-135 mn)	2,32 h (139 mn)
	Essai 2		1,00 h (60 mn)	2,08 à 2,17 h (125-130 mn)	2,34h (140 mn)
B <sub>100R</sub> 0,5A	Essai 1	0,33 h (20 mn)	0,67 h (40mn)	1,75 h (105 mn)	1,70 h (101 mn)
	Essai 2		0,67 h (40mn)	1,75 h (105 mn)	1,70 h (101 mn)
Gc <sub>0R</sub>	Essai 1	0,60 h (36 mn)	0,57 h (35 mn)	1,67 h (100 mn)	1,72 h (103 mn)
	Essai 2		0,57 h (35 mn)	1,75 h (105 mn)	1,87 h (112 mn)
Gc <sub>100R</sub> 1,2A	Essai 1	0,67 à 0,75 h (40-45 mn)	0,57 h (35 mn)	1,92 à 2,00 h (115-120 mn)	1,83 h (110 mn)
	Essai 2		0,67 h (40 mn)	1,92 h (115 mn)	1,97 h (118 mn)
Gc <sub>100R</sub> 0,5A	Essai 1	0,58 à 0,67 h (35-40 mn)	0,57 h (35 mn)	1,50 h (90 mn)	1,35 h (81 mn)
	Essai 2		0,42 h (25 mn)	1,42 h (85 mn)	1,17 h (70 mn)

Tableau 4- 8 : temps caractéristiques des 6 bétons étudiés ; démarrage de la soufflerie à  $t_0 + 0,25$

L'analyse du tableau 4-8 ci-dessus et des paragraphes qui précèdent met donc en avant deux familles de bétons :

- les bétons de bâtiment pour lesquels  $\{t_{cons}\} < \{t_{pc}\}$ . La consolidation linéaire se termine avant le démarrage des dépressions capillaires
- les bétons de génie civil pour lesquels  $\{t_{cons}\} \geq \{t_{pc}\}$ . Le démarrage des dépressions capillaires est effectif avant que la consolidation soit finie.

D'autre part, le tableau 4-9 affiche le temps calculé  $\{t_{fiss}\} - \{t_{pc}\}$  pour chaque essai et pour la moyenne des deux essais.

	Temps $\{t_{fiss}\} - \{t_{pc}\}$ essai 1, (minutes)	Temps $\{t_{fiss}\} - \{t_{pc}\}$ essai 2, (minutes)	Temps $\{t_{fiss}\} - \{t_{pc}\}$ moyenne, (minutes)	Temps $\{t_{fiss}\} - \{t_{pc}\}$ Coeff de variation (%)
B <sub>0R</sub>	52	56	54	5
B <sub>100R</sub> 1,2A	91	80	85,5	9
B <sub>100R</sub> 0,5A	61	61	61	0,0
Gc <sub>0R</sub>	68	77	72,5	9
Gc <sub>100R</sub> 1,2A	75	78	76,5	1,5
Gc <sub>100R</sub> 0,5A	46	45	45,5	1,0

Tableau 4- 9 : valeurs comparées du décalage  $\{t_{fiss}\} - \{t_{pc}\}$  pour les 12 essais exploités.

La comparaison des temps calculés  $\{t_{fiss}\} - \{t_{pc}\}$  entre différents bétons met en lumière que :

- le décalage du démarrage de la pression capillaire se répercute sur le temps de fissuration

- le temps de développement de la  $P_c$  pour atteindre la fissuration est différent d'un béton à l'autre.

Ces deux facteurs permettent de justifier les écarts constatés dans le tableau 4-1 pour les temps de fissuration des bétons  $B_{100R1,2A}$  et  $Gc_{100R0,5A}$  par exemple.

## 2.6.2 Physique des essais et familles de bétons

L'analyse comparative des temps caractéristiques a mis en évidence deux familles de bétons : les bétons de bâtiment et les bétons de génie civil.

L'objet de ce paragraphe est de décrire le fonctionnement physique pour chaque famille.

### 2.6.2.1 Bétons de bâtiment : $B_{0R}$ , $B_{100R1,2A}$ et $B_{100R0,5A}$

La figure 4-12 représente les courbes de déformations verticales en fonction du temps. Les temps caractéristiques  $\{t_{cons}\}$ ,  $\{t_{Pc}\}$ ,  $\{t_{fiss}\}$  sont reportés sur les courbes de la figure 4-12 pour une meilleure compréhension.

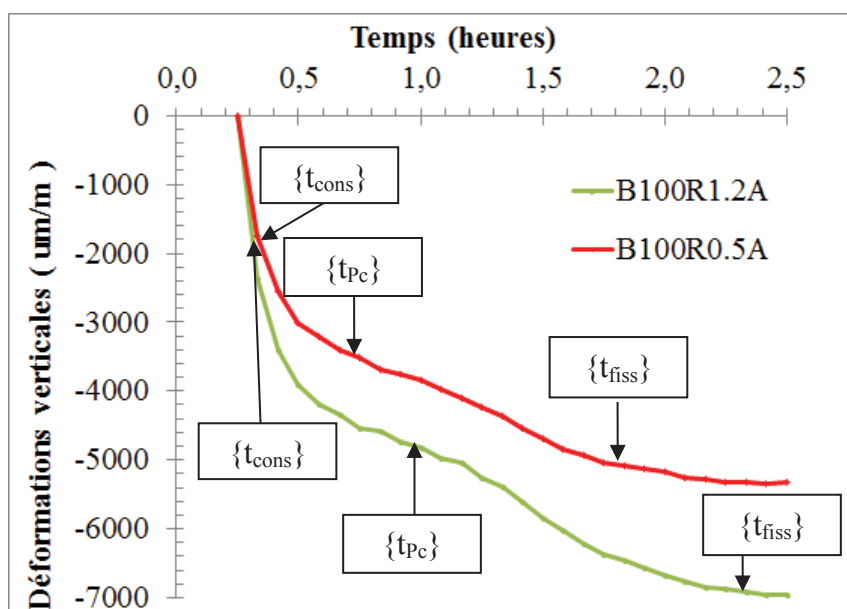


Figure 4- 12 : courbes de déformations verticales des bétons  $B_{100R1,2A}$  et  $B_{100R0,5A}$

L'analyse des temps caractéristiques et de l'allure des courbes fait apparaître les trois périodes identifiées dans la bibliographie qui sont cohérentes avec la description effectuée par (Turcry and Loukili, 2006) pour des BAP (figure 1-32 du chap1. § 3.5.2).

- Période 1,  $t < \{t_{cons}\}$  : phase de consolidation linéaire et de ressuage à vitesse constante. L'eau de ressuage protège le béton de la dessiccation, les pressions capillaires ne se développent pas (ou très peu) et le retrait reste proche de zéro. La courbe de tassement est quasiment linéaire sur cet intervalle. Le phénomène dominant est la consolidation.
- Période 2,  $\{t_{cons}\} < t < \{t_{Pc}\}$  : la phase de consolidation n'est plus linéaire mais se poursuit. La vitesse de ressuage diminue jusqu'à s'annuler. L'eau ressuée qui est évaporée progressivement par le flux séchant continue de protéger le béton de la dessiccation. La fin de la consolidation est atteinte pour  $t = \{0,6 \text{ à } 0,8 \text{ h}\}$  (§ 2.3 du chapitre 4).

- Période 3,  $\{t_{pc}\} < t < \{t_{fiss}\}$  : la consolidation est terminée. L'eau ressuée a été évaporée. Les pressions capillaires et le retrait ont démarrés et se développent. Les déformations verticales mesurées dans cette période correspondent à des déformations de retrait volumique qui se manifestent dans les trois directions : c'est donc la composante verticale du retrait qui est mesurée sur la courbe 4-12 dans cet intervalle de temps.

La fissuration intervient par retrait plastique quand celui-ci arrive à son maximum approximativement au temps  $\{t_{fiss}\}$ . Au-delà de cet âge les déformations évoluent peu. En revanche, le béton continue de se désaturer.

La présence d'eau de ressuage a permis de retarder le démarrage du retrait. Il en résulte que les deux phénomènes que sont la consolidation et le retrait du béton se succèdent dans le temps sans recouvrement.

### 2.6.2.2 Bétons de génie civil : $Gc_{0R}$ , $Gc_{100R1,2A}$ et $Gc_{100R0,5A}$

La figure 4-13 représente les courbes des déformations verticales en fonction du temps. Les temps caractéristiques  $\{t_{cons}\}$ ,  $\{t_{pc}\}$ ,  $\{t_{fiss}\}$  sont reportés sur les courbes de la figure 4-13.

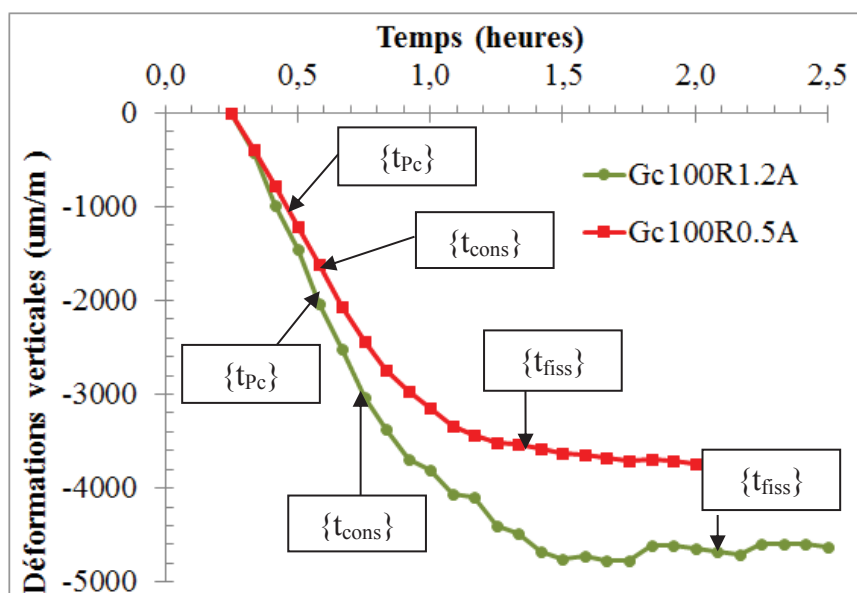


Figure 4- 13 : courbes de déformations verticales des bétons  $Gc_{100R1,2A}$  et  $Gc_{100R0,5A}$

L'analyse des temps caractéristiques et des courbes de déformations verticales souligne un comportement différent pour les bétons de génie civil.

- Période 1,  $t < \{t_{cons}\}$  : contrairement au cas précédent, du fait que  $\{t_{cons}\} > \{t_{pc}\}$ , les pressions capillaires démarrent avant la fin de la consolidation linéaire. Les déformations de consolidation et de retrait se cumulent dès le début de l'essai.

Si  $t < \{t_{pc}\}$ , la consolidation est le phénomène dominant comme en période 1 des bétons de bâtiments. Cette période ne dure que peu de temps.



Dès que  $t > \{t_{pc}\}$ , les deux phénomènes, consolidation et retrait, se superposent. L'eau ressuée est évacuée très rapidement par le flux séchant. Il n'y a pas de cure du béton par l'eau ressuée. Celui-ci sèche et la pression capillaire se développe. En termes de valeurs de déformations, la consolidation reste encore le phénomène dominant pour autant le retrait plastique ne peut plus être négligé.

- Période 2,  $\{t_{pc}\} < \{t_{cons}\} < t < \{t_{fiss}\}$  : les pressions capillaires et le retrait plastique se développent fortement et mettent au second plan la fin de la consolidation. Les pressions capillaires atteignent rapidement des valeurs importantes ainsi que le retrait qui se stabilise assez vite à son palier horizontal. La fissuration intervient au temps  $\{t_{fiss}\}$  quand les déformations avoisinent leur maximum.

Contrairement aux bétons de bâtiment qui sous l'effet de l'eau ressuée voient une succession des phénomènes physiques de consolidation puis de retrait plastique, les bétons de génie civil sont le siège d'une concomitance des deux phénomènes.

### **2.6.3 Bilan**

Désormais, la cinétique des essais est connue au travers de quelques jalons que sont les âges caractéristiques des essais.

Les bétons sont classés en deux familles qui n'offrent pas la même logique d'enchaînement des phénomènes physiques mis en jeu.

A la lumière de ces éléments, l'étude va désormais porter sur l'analyse comparative des résultats entre bétons :

- bétons naturels et bétons recyclés
- bétons pré-saturés à 1,2A ou à 0,5A

La compréhension des phénomènes s'en trouvera améliorée et justifiée.

### 3 INFLUENCE DES GRANULATS RECYCLÉS SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS A L'ETAT PLASTIQUE

Ce paragraphe est une analyse découplée des résultats de mesures. Elle s'appuie sur la cinétique des phénomènes physiques qui est désormais connue pour les bétons de bâtiment et pour les bétons de génie civil.

Cette analyse porte successivement sur les courbes de déformations verticales, puis sur la pression capillaire et se termine par l'étude des déformations de retrait plastique.

#### 3.1 Déformations verticales

##### 3.1.1 Bétons de bâtiment

La figure 4-14 représente les courbes de déformations verticales ( $\varepsilon_v$ ) par rapport au temps pour les bétons  $B_{0R}$ ,  $B_{100R}1,2A$  et  $B_{100R}0,5A$ .

Ces courbes mettent en évidence une forte variation des déformations entre le démarrage de l'essai et 0,5 h. Puis, entre 0,5 h et 2,5 h environ, les déformations continuent de se développer mais plus lentement jusqu'à atteindre finalement un palier sub-horizontale. Durant cette deuxième période la valeur de la dérivée  $d(\varepsilon_v)/dt$  a été divisée approximativement par 10.

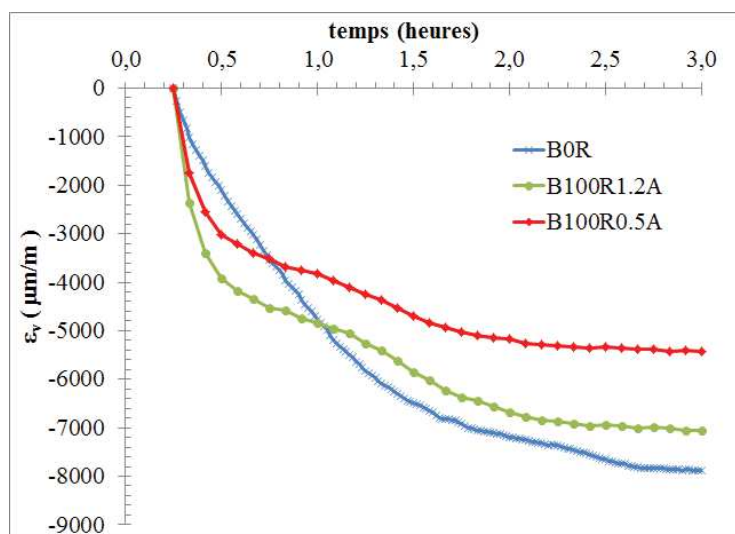


Figure 4- 14 :  $\varepsilon_v = f(t)$  et  $d(\varepsilon_v)/dt = f(t)$   $B_{0R}$ ,  $B_{100R} 1.2A$ ,  $B_{100R}0.5A$ ,

##### 3.1.2 Bétons de génie civil

La figure 4-15 représente les courbes de déformations verticales ( $\varepsilon_v$ ) par rapport au temps pour les bétons  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R}1,2A$  et  $Gc_{100R}0,5A$ .

Leur analyse met en lumière un comportement différent pour les bétons de génie civil. La déformation verticale s'effectue quasiment linéairement pendant 1 heure environ. Les déformations se réalisent en quasi-totalité puis ralentissent brutalement pour arriver au palier horizontal. Comme évoqué au § 2 ci-dessus, ces déformations sont le résultat cumulé de la consolidation et du retrait plastique qui se manifestent en concomitance.

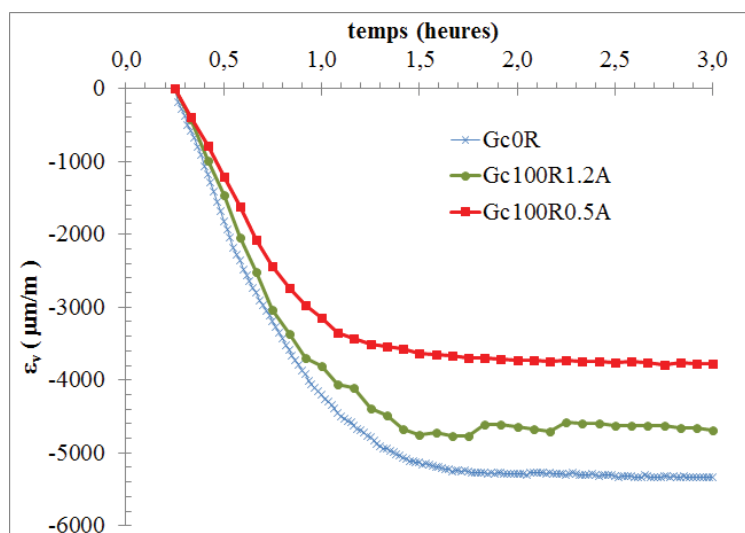


Figure 4- 15 :  $\varepsilon_v = f(t)$  et  $d(\varepsilon_v)/dt = f(t)$  ,  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ ,  $Gc_{100R0,5A}$ .

### 3.1.3 Discussion

Les tableaux 4-10 et 4-11 rappellent pour les bétons naturels et recyclés : les valeurs du rapport E/L calculé à la sortie du malaxeur, l'amplitude des déformations verticales à  $\{t_{cons}\}$  et  $\{t_{pc}\}$  ainsi que l'amplitude maximale des déformations au palier à 4 h.

Pour les bétons de bâtiment, ces valeurs sont lues directement sur les courbes de la figure 4-14 car il n'y a pas concomitance des phénomènes de consolidation et de retrait (§2 du chapitre 4).

	$B_{0R}$	$B_{100R1.2A}$	$B_{100R0.5A}$
E/L en sortie de malaxeur	0,60	0,60	0,52
Fin de la consolidation linéaire : $\varepsilon_v$ à $\{t_{cons}\}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	1000	2360	1750
Fin de consolidation : $\varepsilon_v$ ( $\mu\text{m/m}$ )	5900	4750	3400
Déformations à la fissuration : $\varepsilon_v$ à $\{t_{fiss}\}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	6900	6900	5000
Déformations maximales au palier : $\varepsilon_v$ à 4,0 h ( $\mu\text{m/m}$ )	7890	7100	5600
Pourcentage : consolidation / déformations totales	75 %	67 %	61 %

Tableau 4- 10 : déformations verticales à  $\{t_{cons}\}$ ,  $\{t_{pc}\}$ ,  $\{t_{fiss}\}$  et maximales, bétons de bâtiment

Pour les bétons de génie civil, les valeurs sont lues sur les courbes de tassement de consolidation (exemple figure 4-7 du § 2.3).

	$Gc_{0R}$	$Gc_{100R1,2A}$	$Gc_{100R0,5A}$
E/L en sortie de malaxeur	0,48	0,45	0,38
Fin de consolidation linéaire : $\varepsilon_v$ à $\{t_{cons}\}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	2400	2800	1850
Fin de la consolidation : $\varepsilon_v$ ( $\mu\text{m/m}$ )	3900	3078	2093
Déformations à la fissuration : $\varepsilon_v$ à $\{t_{fiss}\}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	5100	4600	3600
Déformations maximales au palier : $\varepsilon_v$ à 4,0 h ( $\mu\text{m/m}$ )	5340	4800	3800
Pourcentage : consolidation / déformations totales	73 %	63 %	55 %

Tableau 4- 11 : déformations verticales à  $\{t_{cons}\}$ ,  $\{t_{pc}\}$ ,  $\{t_{fiss}\}$  et maximales, bétons de génie civil

Les valeurs de tassement obtenues dans le tableau 4-10 sont du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées par Kronlof et al., (1995) pour des mortiers ou encore Slowik et al., (2008) pour des bétons naturels.

Pour les bétons naturels, les tableaux 4-10 et 4-11 indiquent que la part de consolidation est assez stable (73-75 %) et plus forte que pour les bétons recyclés (55-67%). La densité des gravillons naturels ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ) plus grande que celle des gravillons recyclés ( $2300 \text{ kg/m}^3$ ) peut expliquer cela.

Pour les bétons recyclés, les résultats des tableaux 4-10 et 4-11 font apparaître que le tassement varie avec la quantité d'eau efficace. Plus le rapport E/L est important, plus le tassement sera grand.

La figure 4-16 illustre l'amplitude maximale des déformations à 4 h en fonction du rapport E/L calculé en sortie de malaxeur.

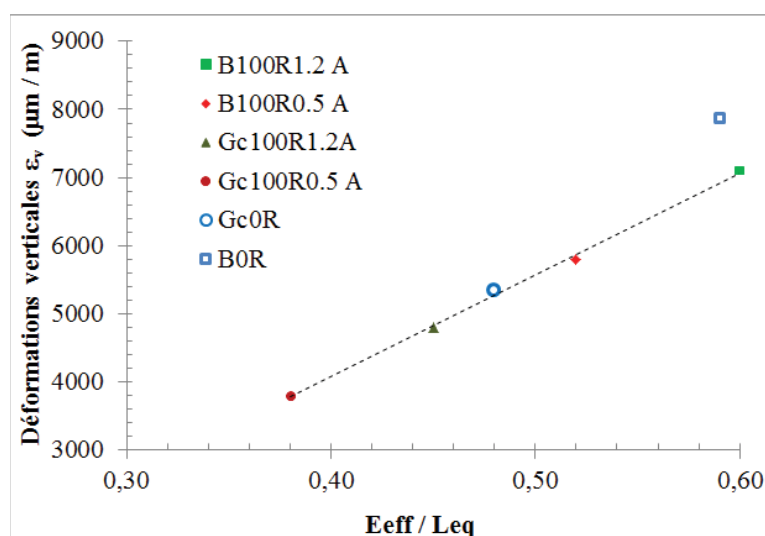


Figure 4- 16 : tassement en fonction de  $E_{eff} / C_{eq}$ , des bétons recyclés, déformations maximales à 4h

Pour tous les bétons, il y a linéarité entre la déformation verticale maximale et la quantité d'eau efficace présente dans le béton, (rapport E/L). Il n'y a pas de spécificités des granulats recyclés. Il semble que le rapport E/L soit le paramètre prépondérant.

## 3.2 Etude de la pression capillaire

La mesure de la pression capillaire ( $P_c$ ) au sein du moule de retrait libre soumis à dessiccation est effectuée à l'aide de 3 capteurs placés à des altimétries différentes dans le moule conformément à la figure 2-20 du chap2. § 7.5 décrivant les conditions expérimentales de la mesure. Les courbes de  $P_c$  ci-dessous représentent des moyennes des trois capteurs.

### 3.2.1 Bétons de bâtiment

La figure 4-17 décrit l'évolution de la  $P_c$  au sein des trois bétons de bâtiments,  $B_{0R}$ ,  $B_{100R1,2A}$  et  $B_{100R0,5A}$ .

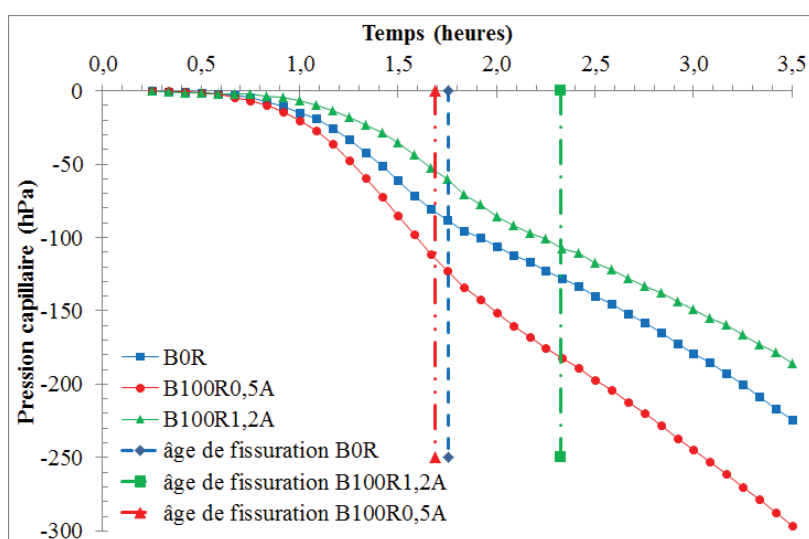


Figure 4- 17 : courbes de pression capillaire =  $f(t)$ , bétons  $B_{0R}$ ,  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5A}$

Par ailleurs, les courbes des fonctions dérivées de la  $P_c$  par rapport au temps, se linéarisent par morceau. Le tableau 4-12 fournit les valeurs des pentes des courbes linéarisées à l'origine (entre 0 et 0,6 h) puis entre 1 h et 2 h et pour chaque béton. Les courbes de la dérivée de la pression capillaire en fonction du temps sont fournies en annexe 3 pour tous les bétons.

	Courbe dérivée $d(P_c) / dt$ pente à l'origine	Courbe dérivée $d(P_c) / dt$ : pente entre 1 h et 2 h
$B_{0R}$	0,91	2,88
$B_{100R1,2A}$	0,21	1,82
$B_{100R0,5A}$	0,52	2,56

Tableau 4- 12 : pentes des courbes  $d(P_c)/dt$  à l'origine et entre 1-2 h, bétons  $B_{0R}$ ,  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5A}$

La comparaison entre le béton naturel  $B_{0R}$  et le béton recyclé  $B_{100R1,2A}$  montre que la  $P_c$  se développe plus vite et plus rapidement pour le béton  $B_{0R}$ . En effet, les pentes données dans le tableau 4-12 sont entre 4 à 2 fois plus grande pour le béton naturel  $B_{0R}$ .

En revanche, les âges  $\{t_{P_c}\}$  (tableau 4-8) sont par contre du même ordre de grandeur pour les deux bétons. La  $P_c$  démarre donc à peu près en même temps.

Si la comparaison porte maintenant sur les deux bétons recyclés  $B_{100R1,2A}$  et  $B_{100R0,5A}$ , il apparaît que la ( $P_c$ ) démarre plus tôt, se développe plus rapidement et avec une plus grande intensité pour le béton  $B_{100R0,5A}$  :

- l'âge  $\{t_{Pc}\}=0,67$  du béton  $B_{100R0,5A}$  est plus faible que celui du béton  $B_{100R1,2A}$   $\{t_{Pc}\}=0,80$  à 1,0 h
- Le tableau 4-12 met également en évidence que les pentes de la courbe dérivée  $d(p_c)/dt$  sont 2,5 à 1,5 fois plus grandes pour le béton  $B_{100R0,5A}$ . La courbe de ( $P_c$ ) atteint donc des valeurs plus importantes et plus rapidement.

### 3.2.2 Bétons de génie civil

La figure 4-18 schématise l'évolution de la ( $P_c$ ) au sein des trois bétons de génie civil,  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$  et  $Gc_{100R0,5A}$ .

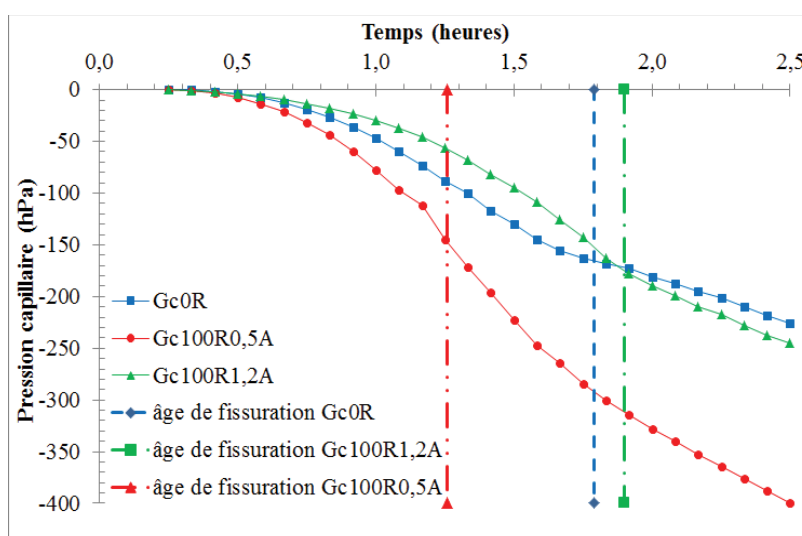


Figure 4- 18 : courbes de pression capillaire =  $f(t)$ , bétons  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ ,  $Gc_{100R0,5A}$ .

Comme précédemment, le tableau 4-13 fournit les valeurs des pentes des courbes linéarisées  $d(P_c)/dt$  à l'origine puis entre 1-2 h.

	Courbe dérivée $d(P_c) / dt$ pente à l'origine	Courbe dérivée $d(P_c) / dt$ : pente entre 1 h et 2 h
$Gc_{0R}$	1,8	3,0
$Gc_{100R1,2A}$	1,5	2,7
$Gc_{100R0,5A}$	2,9	4,9

Tableau 4- 13 : pentes des courbes  $d(P_c)/dt$  à l'origine et entre 1-2 h, bétons  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ ,  $Gc_{100R0,5A}$

La comparaison entre le béton naturel  $Gc_{0R}$  et le béton recyclé  $Gc_{100R1,2A}$  n'est pas significative. Les courbes évoluent sensiblement de la même manière. Les valeurs de pente sont proches.

En ce qui concerne les bétons recyclés, il apparaît que la  $P_c$  se développe dès le démarrage de la soufflerie. En effet, les pentes à l'origine sont importantes, 1,5 hPa/h pour le béton  $Gc_{100R1,2A}$ , et 2,9 hPa/h pour le béton recyclé  $Gc_{100R0,5A}$ . La croissance s'accroît ensuite entre 1-2 h car les valeurs de pentes doublent.

Globalement, le béton  $Gc_{100R}0,5A$  voit la  $P_c$  se développer environ deux fois plus vite que le béton  $Gc_{100R}1,2A$ .

La comparaison des âges  $\{t_{Pc}\}$  des trois bétons fait apparaître des écarts modestes entre bétons. La ( $P_c$ ) du béton  $Gc_{100R}0,5A$  démarre 5 à 10 minutes plus tôt que celle du béton naturel  $Gc_{0R}$  qui démarre entre 0 et 5 minutes plus tôt que celle du béton  $Gc_{100R}1,2A$ .

### 3.2.3 Discussion

#### 3.2.3.1 Comparaison des bétons de bâtiment et des bétons de génie civil

Globalement, les bétons de génie civil ont des variations de ( $P_c$ ) qui varient avec plus d'intensité que les bétons de bâtiment. Par exemple, le béton  $Gc_{0R}$  a une pente initiale de 1,8 contre 0,21 pour le béton  $B_{0R}$ . Ces résultats peuvent se généraliser à la comparaison des autres bétons deux à deux et ce quels que soient les intervalles de temps considérés.

D'autre part, la ( $P_c$ ) des bétons de génie civil démarre plus rapidement que les bétons de bâtiment. La comparaison des temps  $\{t_{Pc}\}$  (tableau 4-8) des deux familles de bétons le démontre :  $\{t_{Pc}\}$  compris entre 0,67 et 1,00 h pour les bétons de bâtiment et entre 0,42 et 0,67 h pour les bétons de génie civil.

Ces observations sont cohérentes avec les résultats de (Mbemba et al., 2013) qui constatent une variation plus rapide et plus forte de la ( $P_c$ ) quand le rapport E/C décroît.

#### 3.2.3.2 Valeurs de la pression capillaire à la fissuration

Le tableau 4-14 récapitule les valeurs de ( $P_c$ ) atteintes à l'âge de fissuration  $\{t_{fiss}\}$ .

	Age de fissuration $\{t_{fiss}\}$ essai 1 (h)	Pression capillaire à $\{t_{fiss}\}$ essai 1 (hPa)	Age de fissuration $\{t_{fiss}\}$ essai 2 (h)	Pression capillaire à $\{t_{fiss}\}$ essai 2 (hPa)
$B_{0R}$	1,67 h	99	1,84 h	85
$B_{100R}1,2A$	2,32 h	103	2,34 h	112
$B_{100R}0,5A$	1,70 h	116	1,70 h	117
$Gc_{0R}$	1,72 h	155	1,87 h	174
$Gc_{100R}1,2A$	1,83 h	160	1,97 h	201
$Gc_{100R}0,5A$	1,35 h	168	1,17 h	118

Tableau 4- 14 : valeurs de pression capillaire mesurées à  $\{t_{fiss}\}$  pour les 6 bétons testés

La lecture du tableau 4-14 souligne un rapport de l'ordre de 1,6 à 2 entre les valeurs de ( $P_c$ ) entre les deux familles de bétons. Elles sont plus grandes pour les bétons de génie civil.

Ces valeurs de ( $P_c$ ) mesurées à l'âge de fissuration sont du même ordre de grandeur que ce que propose (Slowik et al., 2008) pour des bétons (10 kPa) ou pour des matériaux cimentaires de type pâtes de ciment, mortiers ou bétons (entre 10 à 45 kPa).

Boshoff and Combrinck (2013) proposent une valeur maximale de ( $P_c$ ) de l'ordre de 35 kPa pour des bétons. Mbemba et al (2013) mesurent une  $P_c$  de 10 à 20 kPa à 2 h sous un vent de 5 m/s pour différents bétons naturels dont E/C varie de 0,60 à 0,35.

Enfin, à titre de comparaison, il est rappelé qu'en conditions endogènes, à l'âge de fissuration  $\{t_{fiss}\}$  les valeurs de ( $P_c$ ) évoluent encore autour de 5 hPa (§ 7-8 au chapitre 2).

### 3.3 Etude du retrait plastique

L'étude du retrait comporte 4 parties. Deux d'entre elles sont relatives à l'étude des deux familles de bétons, bâtiment et génie civil. La troisième partie porte sur la vérification de l'isotropie du retrait. Enfin, la dernière partie étudie les corrélations entre retrait plastique et fissuration.

En premier lieu, conformément à la bibliographie, (§ 3.5 du chapitre 1) on confirme que pour tous les bétons testés, les variations du retrait plastique suivent parfaitement les variations de la pression capillaire.

#### 3.3.1 Bétons de bâtiment

La figure 4-19 présente les résultats des mesures de retrait pour les bétons  $B_{0R}$ ,  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5A}$  ainsi que les courbes dérivées par rapport au temps.

Le retrait des bétons recyclés est plus grand que celui des bétons naturels. Il faut se rappeler que les bétons recyclés ont une quantité de pâte plus grande que les bétons naturels ce qui favorise un retrait plus fort.

L'analyse des courbes met en exergue une augmentation plus rapide du retrait pour le béton  $B_{100R0,5A}$  que pour les deux autres. Le retrait plastique du béton  $B_{100R1,2A}$  est le dernier à croître. Le premier béton qui va subir un retrait plastique significatif est donc le béton  $B_{100R0,5A}$ .

Le béton recyclé  $B_{100R1,2A}$  est décalé dans le temps par rapport aux deux autres, au démarrage comme à la fin. Au final, à partir de 2 h sa valeur de retrait se confond avec celle du béton  $B_{100R0,5A}$ .

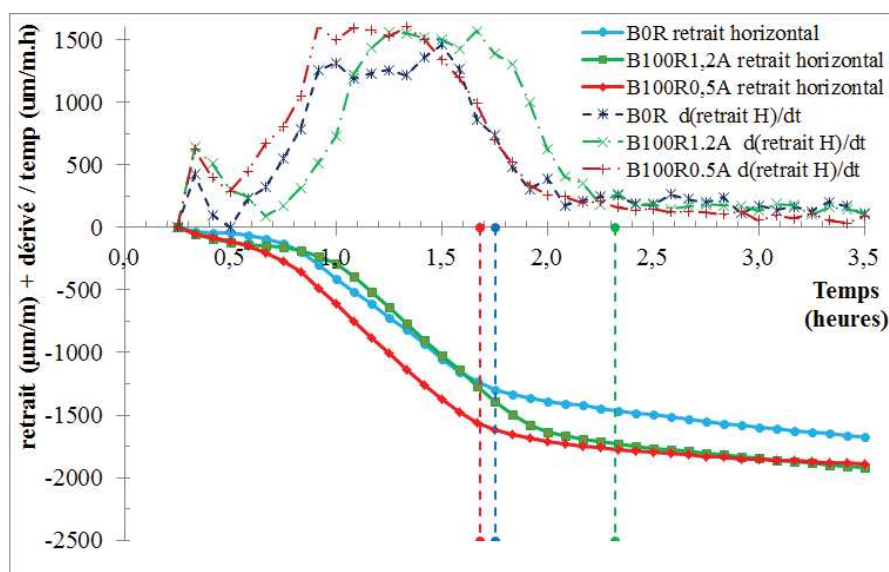


Figure 4- 19 : retrait libre horizontal =  $f(t)$  et courbes dérivées par rapport au temps bétons  $B_{0R}$  -  $B_{100R1,2A}$  -  $B_{100R0,5A}$

#### 3.3.2 Bétons de génie civil

La figure 4-20 récapitule les résultats des mesures pour les bétons  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$  et  $Gc_{100R0,5A}$ .



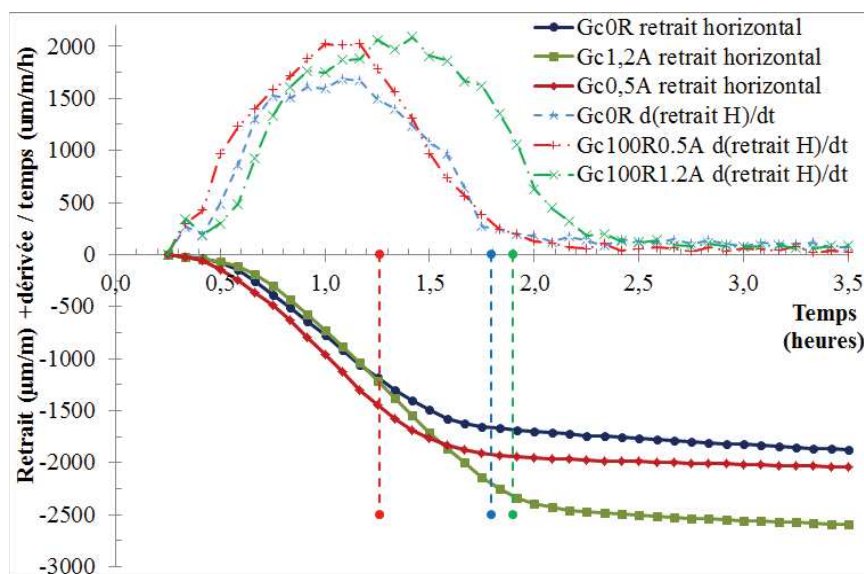


Figure 4- 20 : retrait libre horizontal =  $f(t)$  et courbes dérivées par rapport au temps  
 $Gc_{0R} - Gc_{100R1.2A} - Gc_{100R0.5A}$

Le retrait des bétons de génie civil est plus important que le retrait des bétons de bâtiment. Ce constat se vérifie pour les bétons naturels et pour les bétons recyclés comparés deux à deux.

Les variations des courbes de retrait sont comparables pour les deux bétons  $Gc_{0R}$  et  $Gc_{100R1.2A}$ . Le retrait plastique du béton  $Gc_{100R0.5A}$  croît légèrement plus vite. L'interprétation des courbes dérivées du retrait plastique par rapport au temps permettent d'avancer que :

- pour les deux bétons  $Gc_{0R}$  et  $Gc_{100R0.5A}$ , le retrait plastique se termine en même temps
- le retrait plastique du béton recyclé  $Gc_{100R1.2A}$  est décalé dans le temps par rapport aux deux autres.

### 3.3.3 Isotropie du retrait plastique

Au début du § 2, il a été postulé que la composante de retrait vertical (selon Z) était identique aux composantes horizontales en X et en Y.

Le but de ce paragraphe est de vérifier ce postulat à posteriori pour compléter le chap2. § 10.3 qui a mis en évidence l'isotropie des deux composantes horizontales de retrait plastique.

#### 3.3.3.1 Bétons de bâtiment

Le retrait plastique vertical selon Z est intégré dans la courbe des déformations verticales mesurées. Il faut donc isoler la composante de retrait vertical de la part due à la consolidation.

Pour les bétons de bâtiment  $\{t_{pc}\}$  est supérieur à  $\{t_{cons}\}$ . La consolidation et le retrait se succèdent. La composante de retrait va être isolée à l'aide de l'équation Eq(23).

$$\text{RetV}(t) = \varepsilon v(t) - \varepsilon v(\{t_{pc}\}) + \text{Ret H}(\{t_{pc}\}) \quad \text{Eq (23)}$$

Où  $Ret_v(t)$  est la valeur de la composante de retrait vertical à l'instant  $t > \{t_{Pc}\}$ ;  $\varepsilon_v(t)$  est la valeur de déformation verticale mesurée à l'instant  $t$ ;  $\varepsilon_v(\{t_{Pc}\})$  est la valeur de déformation verticale mesurée à l'instant  $\{t_{Pc}\}$ ;

Et  $Ret_H(\{t_{Pc}\})$  est la valeur de retrait horizontal mesurée à l'instant  $\{t_{Pc}\}$ . Ce terme n'a pas de signification physique. C'est une correction qui a pour seul but de définir une origine commune aux courbes de retrait horizontal et vertical dans le but de vérifier leur superposition.

Les figures 4-21 et 4-22 présentent les résultats obtenus pour les deux bétons  $B_{100R1,2A}$  et  $B_{100R0,5A}$ .

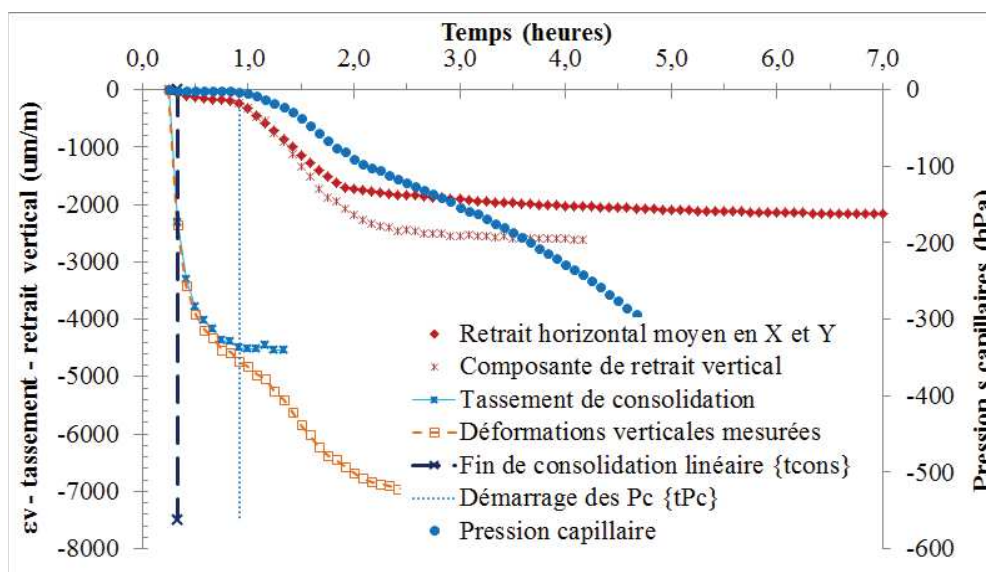


Figure 4- 21 : courbes de retrait horizontal et de retrait vertical, béton  $B_{100R1,2A}$

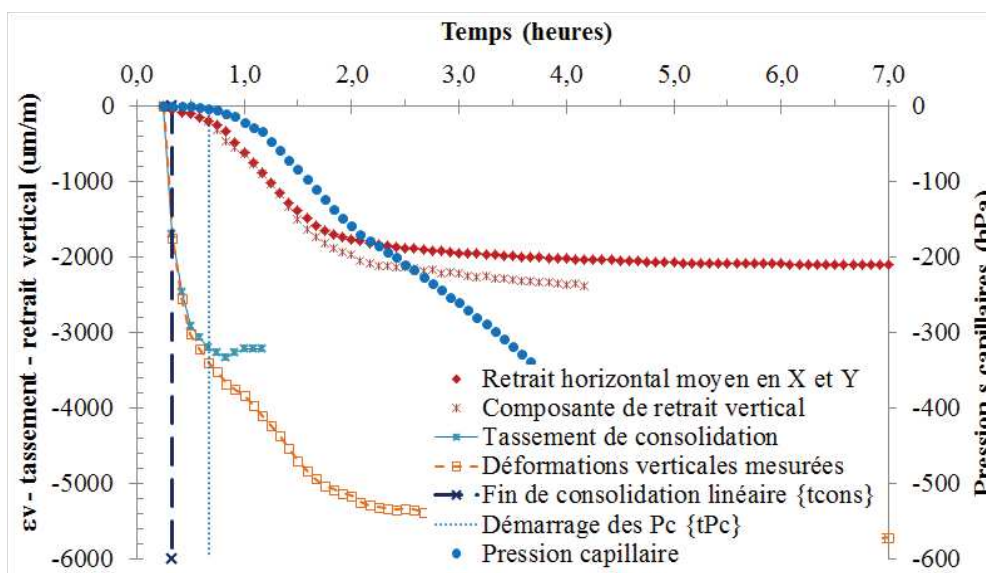


Figure 4- 22 : courbes de retrait horizontal et de retrait vertical, béton  $B_{100R0,5A}$

Les composantes horizontales (X et Y moyennées) et verticale (Z) du retrait plastique (hors consolidation) vont être comparées en vitesse de variation et en amplitude totale :

- les variations des composantes de retrait plastique sont superposables jusqu'à 1,5 h pour les deux bétons B<sub>100R1,2A</sub> et B<sub>100R0,5A</sub>
- les amplitudes des composantes de retrait plastique présentent un écart de 15 à 25 % pour les bétons B<sub>100R0,5A</sub> et B<sub>100R1,2A</sub> après 2 h 00.

Pour ces deux bétons, l'expérimentation démontre que le retrait plastique des bétons recyclés de bâtiment est un phénomène volumique isotrope jusqu'à 1,5 h.

### 3.3.3.2 Bétons de génie civil

Pour les bétons de génie civil,  $\{t_{pc}\}$  étant inférieur à  $\{t_{cons}\}$ , les déformations de consolidation et de retrait plastique sont simultanées. De plus, ces bétons ont une consolidation majoritairement linéaire (figure 4-7).

Or, pour vérifier l'isotropie du retrait, il faut s'intéresser à un intervalle de temps où il n'y a plus d'effet de la consolidation. Donc il va être pris pour hypothèse qu'au-delà de  $\{t_{cons}\}$  les déformations de consolidations deviennent faibles et peuvent être négligées.

Pour les bétons de génie civil, l'équation Eq(23) est modifiée et devient Eq(24) suivante :

$$\text{RetV}(t) = \varepsilon_v(t) - \varepsilon_v(\{t_{cons}\}) + \text{Ret H}(\{t_{cons}\}) \quad \text{Eq (24)}$$

$\text{Ret}_v(t)$ ;  $\varepsilon_v(t)$ ;  $\varepsilon_v(\{t_{cons}\})$ ;  $\text{Ret H}(\{t_{cons}\})$  sont identiques aux définitions de l'équation Eq(23). Seul l'âge de calcul est différent.

L'application de l'équation Eq(24) conduit à l'obtention des figures 4-23 et 4-24 relatives aux béton Gc<sub>100R1,2A</sub> et Gc<sub>100R0,5A</sub>.

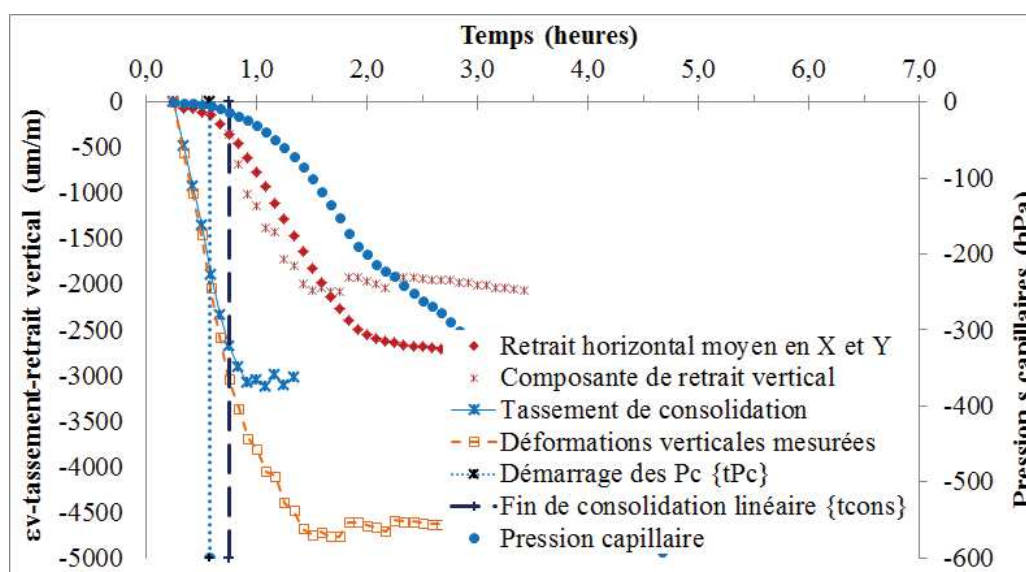


Figure 4- 23 : courbes de retrait horizontal et de retrait vertical, béton Gc<sub>100R1,2A</sub>

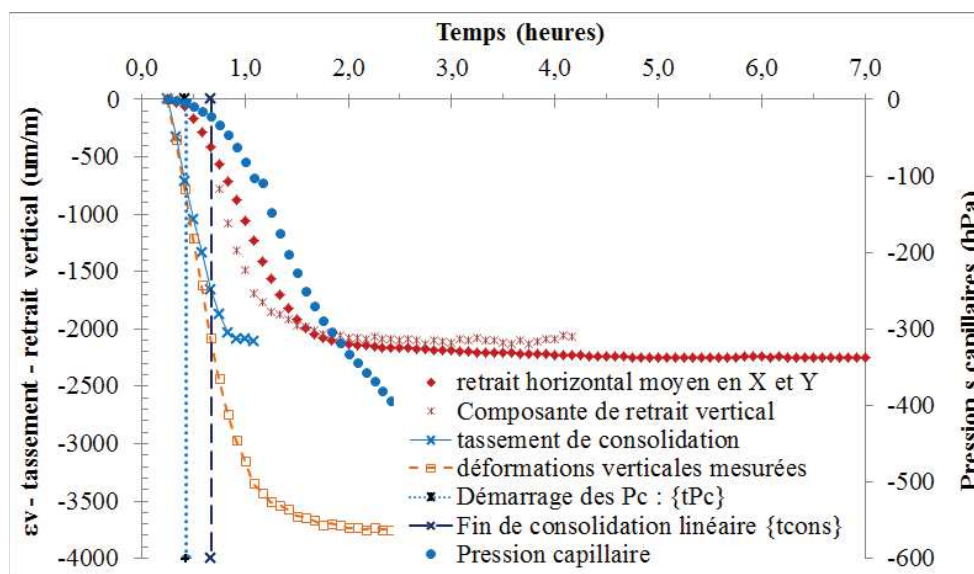


Figure 4- 24 : courbes de retrait horizontal et de retrait vertical, béton  $Gc_{100R0,5A}$

Le bilan est comparable à celui des bétons de bâtiment.

### 3.3.3.3 Bilan

Dans ce paragraphe, en complément du paragraphe 5.3 du chapitre 2, pour les bétons recyclés, il a été vérifié que le retrait qui est un phénomène volumique se manifeste de manière isotrope pour un âge inférieur à 1,5 h. Par conséquent, le postulat du §2 relatif à l'isotropie du retrait volumique est bien vérifié.

En revanche, au-delà d'une durée de 1,5 h, la notion d'isotropie du retrait volumique ne garde plus qu'un sens qualitatif, à la lumière des résultats obtenus dans cette étude.

### 3.3.4 **Corrélations retrait et fissuration**

Le dernier point abordé dans cette étude du retrait plastique est relatif à la corrélation du retrait plastique et de la fissuration. Deux axes sont explorés :

- la corrélation entre l'apparition de la fissuration et la valeur du retrait à cet âge
- la corrélation entre l'ouverture de fissure ( $w_k$ ) et la valeur du retrait à 7,2 h (âge de fin d'essai et de prise des clichés qui servent au calcul de  $w_k$ ).

Pour les six bétons étudiés, le tableau 4-14 synthétise pour chaque essai et pour la moyenne des essais :

- l'âge de fissuration  $\{t_{fiss}\}$ , (tableau 4-1)
- la valeur de retrait plastique horizontal mesuré à l'âge  $\{t_{fiss}\}$
- l'ouverture de fissure caractéristique mesurée à 7,2 h (tableau 4-2)
- la valeur de retrait plastique horizontal mesuré à 7,2 h.

	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
<u>Age de fissuration</u>						
essai 1 – essai 2	1,67-1,83	2,33-2,34	1,7-1,7	1,72-1,87	1,83-1,97	1,35-1,17
moyenne des 2 essais (heures)	1,76 h (1 h 45)	2,34 h (2 h 20)	1,70 h (1 h 42)	1,80 h (1 h 48)	1,90 h (1 h 54)	1,26 h (1 h 16)
<u>Retrait à la fissuration</u>						
essai 1 – essai 2	1315-1286	1656-1811	1618-1550	1595-1715	2103-2554	1444-1409
moyenne des 2 essais ( $\mu\text{m/m}$ )	1301	1734	1584	1655	2329	1427
<u>Ouverture de fissure Wk</u> à 7,2 h - essai 1 – essai 2						
moyenne des 2 essais (mm)	0,70-0,71 0,71	1,07-0,96 1,02	0,87-0,78 0,83	0,65-0,80 0,73	1,29-1,15 1,22	0,96-0,88 0,92
<u>Retrait à 7,2 h</u>						
Essai 1 – essai 2	1894-1801	2087-2163	2099-1891	1985-1993	2562-2863	1912-2252
moyenne des 2 essais ( $\mu\text{m/m}$ )	1848	2125	1995	1989	2713	2082

Tableau 4- 15 : âges, valeurs de retrait et de fissuration caractéristiques bétons B<sub>0R</sub>, B<sub>100R1,2A</sub>, B<sub>100R0,5A</sub>, Gc<sub>0R</sub>, Gc<sub>100R1,2A</sub>, Gc<sub>100R0,5A</sub> ;

### 3.3.4.1 Corrélation âge de fissuration et valeur de retrait associée

En premier lieu, l'analyse du tableau va porter sur une comparaison entre bétons. Elle met en évidence que :

- le retrait de chaque béton recyclé est plus grand que celui du béton de référence : + 33% pour le B<sub>100R1,2A</sub> et + 41 % pour le Gc<sub>100R1,2A</sub>
- le retrait des bétons recyclés pré-saturé à 1,2A est plus fort que celui des bétons pré-saturés à 0,5A : + 9% pour le bétons B<sub>100R1,2A</sub> et + 63 % pour le béton Gc<sub>100R1,2A</sub>.

Ainsi, l'analyse comparative ci-dessus démontre qu'il n'y a pas une valeur seuil universelle du retrait plastique qui conduirait à la fissuration des bétons en cas de dépassement.

En deuxième lieu, pour les bétons B<sub>0R</sub> et Gc<sub>0R</sub> quelques comparaisons avec la littérature peuvent être menées. En effet, quelques auteurs ont étudié le retrait de bétons naturels au très jeune âge et sous des conditions de dessiccation avec vent (RH = 30 à 40 %, V<sub>vent</sub> = 4,8 à 5 m/s, T° = 20 à 22 ° C).

- Turcry and Loukili (2006) mesurent des valeurs de retrait à 4 h, sous vent de 5 m/s de 2000 à 4000  $\mu\text{m/m}$  pour des bétons de type bâtiment ou génie civil
- Slowick et al., (2008) obtiennent une valeur de retrait plastique de l'ordre de 2000  $\mu\text{m/m}$  pour un béton dont E/C = 0,41 et sous un vent de 4,8 m/s
- enfin, Mbemba et al., (2010) mesurent des valeurs de retrait de 1200, 1500 et 2000  $\mu\text{m/m}$  pour des bétons dont le rapport E/C est respectivement 0,35, 0,45, 0,6 sous un vent de 5 m/s.

### 3.3.4.2 Corrélations ouverture de fissure et valeur du retrait plastique

La figure 4-25 représente l'ouverture de fissure caractéristique  $w_k$  en fonction de la valeur de retrait correspondant, c'est-à-dire mesuré au moment où est pris le cliché qui sert à calculer  $w_k$ .

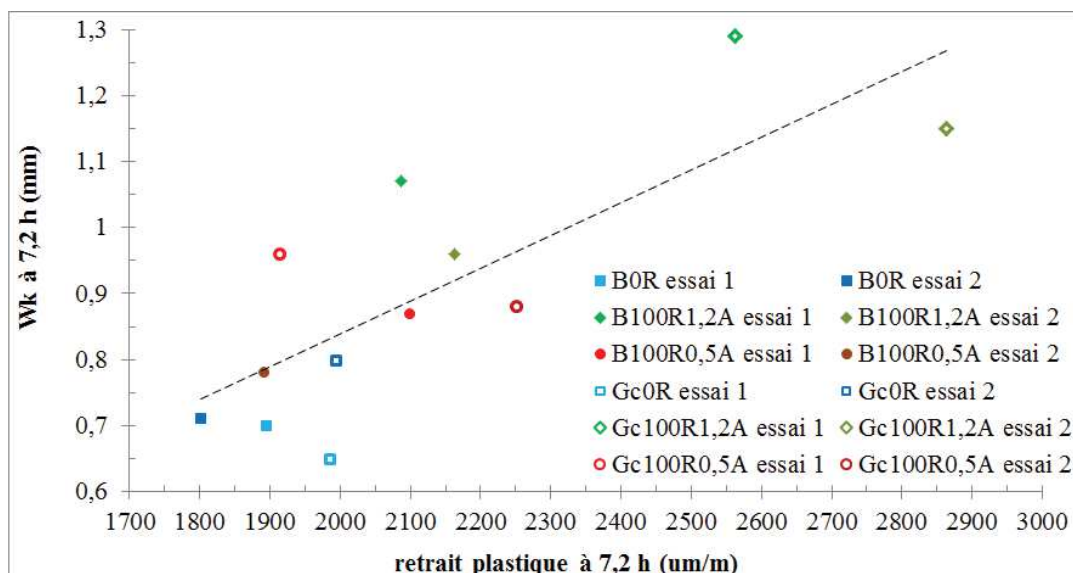


Figure 4- 25 : ouverture de fissure caractéristique  $w_k$  en fonction de la valeur de retrait à 7,2 h  
12 essais relatifs aux bétons  $B_{0R}$ ,  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5A}$ ,  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ ,  $Gc_{100R0,5A}$

La figure 4-25 met en évidence une corrélation globale entre la valeur de l'ouverture de fissure et le retrait : plus la valeur du retrait est grande et plus l'ouverture de fissure sera importante.

Par exemple, les bétons  $B_{0R}$  et  $Gc_{0R}$  qui ont des valeurs de retrait comparables (5 % d'écart) ont des ouvertures de fissures comparables (3 % d'écart).

Même s'il n'y a pas de proportionnalité parfaite, l'ouverture de fissure des bétons recyclés varient en fonction du retrait plastique.

L'aspect aléatoire de la fissuration, de sa mesure et du calcul de  $w_k$  ne permettent pas de dégager une corrélation plus puissante que celle proposée.

## 4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 4

En synthèse du chapitre 4, il est intéressant de revenir sur l'étude de la fissuration (§ 1) et de la coupler avec la notion de pression d'entrée d'air (§ 2 et 3).

### 4.1 Corrélations entrée d'air et fissuration

L'objectif est de comparer les âges et les valeurs de pression capillaire, à la fissuration (âge  $\{t_{fiss}\}$ ) et à l'entrée d'air (âge  $\{t_{Pair}\}$ ).

#### 4.1.1 Age d'entrée d'air et âge de fissuration

Le tableau 4-16 récapitule les âges de fissuration et d'entrée d'air puis calcule le  $\Delta t$  par essai puis en moyenne par béton.

		Age d'entrée d'air : $\{t_{Pair}\}$ (heures)	Age de fissuration : $\{t_{fiss}\}$ (heures)	Ecart entre $\{t_{Pair}\}$ et $\{t_{fiss}\}$ (minutes)
B <sub>0R</sub>	Essai 1	1,67 h (100 mn)	1,67 h (100 mn)	0 mn
	Essai 2	2,17 h (130 mn)	1,84 h (110 mn)	+ 20 mn
B <sub>100R</sub> 1,2A	Essai 1	2,17 à 2,25 h (130-135 mn)	2,32 h (139 mn)	- 4 à 9 mn
	Essai 2	2,08 à 2,17 h (125-130 mn)	2,34h (140 mn)	- 10/15 m
B <sub>100R</sub> 0,5A	Essai 1	1,75 h (105 mn)	1,70 h (101 mn)	+ 4 mn
	Essai 2	1,75 h (105 mn)	1,70 h (101 mn)	+ 4 mn
Gc <sub>0R</sub>	Essai 1	1,67 h (100 mn)	1,72 h (103 mn)	- 3 mn
	Essai 2	1,75 h (105 mn)	1,87 h (112 mn)	- 7 mn
Gc <sub>100R</sub> 1,2A	Essai 1	1,92 à 2,00 h (115-120 mn)	1,83 h (110 mn)	+ 5 à 10 mn
	Essai 2	1,92 h (115 mn)	1,97 h (118 mn)	- 3 mn
Gc <sub>100R</sub> 0,5A	Essai 1	1,50 h (90 mn)	1,35 h (81 mn)	+ 9 mn
	Essai 2	1,42 h (85 mn)	1,17 h (70 mn)	+ 15 mn

Tableau 4- 16 :  $\{t_{Pair}\}$ ,  $\{t_{fiss}\}$ , écarts entre  $\{t_{Pair}\}$  et  $\{t_{fiss}\}$   
12 essais relatifs aux bétons B<sub>0R</sub>, B<sub>100R</sub>1,2A, B<sub>100R</sub>0,5A, Gc<sub>0R</sub>, Gc<sub>100R</sub>1,2A, Gc<sub>100R</sub>0,5A

Pour chaque béton, l'écart entre  $\{t_{Pair}\}$  et  $\{t_{fiss}\}$ , est compris entre -10 et + 12 minutes. Ce faible écart permet d'affirmer que la fissuration intervient approximativement au moment de l'entrée d'air dans le réseau poreux. L'écart le plus important (20 minutes) est constaté pour l'essai 2 du béton B<sub>0R</sub>.

#### 4.1.2 Pression d'entrée d'air et valeur de la pression capillaire à la fissuration

La figure 4-26 représente la pression capillaire mesurée à l'âge  $\{t_{fiss}\}$  en fonction de la pression d'entrée d'air calculée à l'âge  $\{t_{Pair}\}$ .

L'exploitation de cette figure souligne une bonne corrélation pour 11 essais sur douze et pour les six bétons : B<sub>0R</sub>, B<sub>100R</sub>1,2A, B<sub>100R</sub>0,5A, Gc<sub>0R</sub>, Gc<sub>100R</sub>1,2A, Gc<sub>100R</sub>0,5A.

L'essai 2 du béton Gc<sub>100R</sub>0,5A présente une pression capillaire à la fissuration inférieure à la pression d'entrée d'air (120 hPa < 210 hPa). Pour cet essai l'âge  $\{t_{fiss}\}$  est inférieur de 15 minutes à l'âge  $\{t_{Pair}\}$ .

L'analyse des courbes de mesures montre qu'en 15 minutes la pression capillaire de cet essai passe de 120 hPa à 192 hPa. C'est donc le décalage de l'âge de fissuration / âge d'entrée d'air qui implique la différence de valeur de pression capillaire.

Cette justification s'applique aussi à l'autre essai du béton  $Gc_{100R0,5A}$ , à l'essai 1 du béton  $Gc_{100R1,2A}$ , à l'essai 2 du béton  $Gc_{0R}$  et à l'essai 2 du béton  $B_{0R}$ .

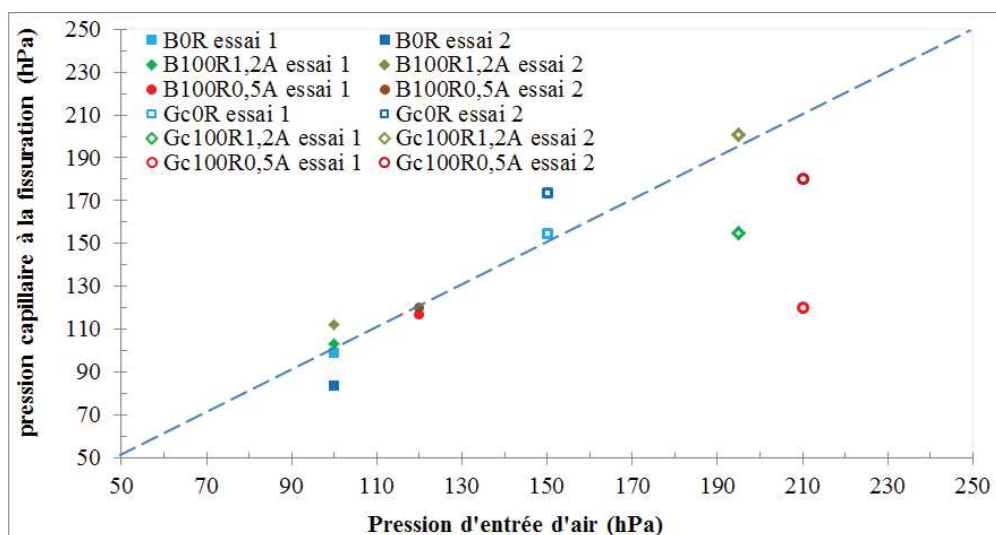


Figure 4- 26 : pression capillaire à la fissuration en fonction de la pression d'entrée d'air  
12 essais relatifs aux bétons  $B_{0R}$ ,  $B_{100R1,2A}$ ,  $B_{100R0,5A}$ ,  $Gc_{0R}$ ,  $Gc_{100R1,2A}$ ,  $Gc_{100R0,5A}$

Au final, les résultats expérimentaux mettent en lumière une bonne corrélation entre l'entrée d'air dans le matériau et la fissuration.

Ce résultat est confirmé par les travaux de (Slowik et al., 2008) qui ont mesuré expérimentalement l'âge de l'entrée d'air dans des bétons et des pâtes de ciment par des mesures de conductivité électrique. Ils identifient l'entrée d'air comme particulièrement à risque pour la fissuration du béton. C'est ensuite confirmé par la modélisation effectuée par (Slowik et al., 2009) et (Slowik and Ju, 2011).

## 4.2 Bilan du chapitre 4

Après le chapitre 3 qui s'est focalisé sur l'étude des transferts hydriques pâte du béton – granulats recyclés, le chapitre 4 avait pour but l'étude de la fissuration et des déformations du béton à l'état plastique.

Cette étude a débuté par l'étude macroscopique couplée de la fissuration puis s'est concentrée sur la compréhension des phénomènes physiques présents qui sont essentiellement la consolidation et le retrait plastique.

Il a été montré que la consolidation et le retrait plastique pouvaient se manifester en concomitance pour les bétons de génie civil ou bien se succéder dans le temps pour les bétons de bâtiment.

L'étude du retrait a démontré qu'il n'y avait pas de valeur seuil « universelle » de déformabilité au-delà duquel la fissuration apparaissait.



En revanche, l'exploitation des résultats des mesures de déformations et de suivi de la pression capillaire dans le temps a mis en lumière que la pression capillaire est le paramètre majeur dont le suivi autorise la compréhension des phénomènes en cours. En particulier, l'utilisation de modèles issus de la mécanique des sols fins cohésifs dé-saturés a facilité l'identification d'une valeur particulière de la pression capillaire appelée « pression d'entrée d'air » qui correspond au moment où la phase gazeuse pénètre dans le matériau poreux et qui est reconnue comme l'initiation de la fissuration. Les valeurs obtenues sont de l'ordre de 100 hPa pour les bétons de bâtiment et de 150 à 200 hPa pour les bétons de génie civil

L'identification des âges et des pressions d'entrée d'air et de fissuration met en évidence que l'entrée d'air correspond à une période à risque pour le matériau en termes de fissuration. Cette affirmation est vraie pour les bétons naturels comme pour les bétons recyclés. Elle est cohérente avec les travaux de (Slowik et al., 2008) (Slowik and Ju, 2011) (Slowik et al., 2009).

Le chapitre 4 a donc identifié la pression capillaire comme le facteur physique clef du béton à l'état plastique et de sa fissuration. Par ailleurs, ce chapitre a fait apparaître les paramètres influençant le développement de cette dépression et par conséquent influençant également la fissuration :

- la consolidation et le ressuage qui par le biais de l'eau ressuée peut apporter une cure au béton et décaler dans le temps le développement de la dépression capillaire. Le ressuage dépend de l'eau présente dans le béton et plus particulièrement de l'eau efficace de la pâte.
- l'absorption des granulats recyclés. Le chapitre 3 a mis en exergue ce paramètre comme majeur dans la gestion de l'eau efficace du béton dès le malaxage, en particulier pour des granulats recyclés initialement partiellement saturés
- le degré de pré-saturation des gravillons recyclés qui impacte directement le potentiel d'absorption des gravillons recyclés dans le malaxeur.

Par conséquent, par effet domino, le degré de pré-saturation des gravillons recyclés va influencer sur le retrait plastique des bétons recyclés et sur leur fissuration.

Maintenant que les transferts hydriques entre pâte et granulats sont connus de même que les mécanismes qui régissent la phase plastique du béton, il va être désormais intéressant de croiser les résultats de manière à aller plus loin dans la compréhension et peut être dans la prévision des phénomènes.

C'est l'objet du chapitre 5 qui va faire appel à quelques modélisations simplifiées afin de poser de nouvelles questions et de faire apparaître de nouvelles pistes de réflexion.

## **CHAPITRE 5 : VERS UNE MODELISATION DU COMPORTEMENT DES BETONS A L'ETAT PLASTIQUE**

Les chapitres 3 et 4 ont développé l'étude expérimentale de bétons recyclés pour comprendre leur comportement à l'état frais.

La première partie de ce chapitre sera relative à l'étude de la perméabilité du béton frais. La perméabilité est la grandeur physique qui régit le transport d'eau (loi de Darcy) en particulier lors du ressuage (Josserand, 2002). Il a été montré au chapitre 4 que l'eau ressuée offre une cure naturelle au béton et impacte le développement de la pression capillaire et le retrait plastique du béton. Il semble donc important de s'intéresser aux valeurs de perméabilité du béton frais.

La deuxième partie consiste à modéliser le matériau béton frais à l'aide de la mécanique des milieux poreux. Cela passe par l'étude des variations volumiques de l'échantillon au cours du temps et par l'identification des paramètres physiques du réseau poreux.

La troisième partie concerne la modélisation des effets hygro-thermiques au sein du béton frais en conditions de dessiccation. En effet, l'étude qui porte sur le couplage séchage-température du béton va montrer comment le changement de phase de l'eau sous l'effet du séchage va conduire à refroidir le béton.

La quatrième et dernière partie permet de faire une articulation avec les conclusions et les perspectives. L'objectif est de corréler la pression capillaire qui gère la fissuration avec des paramètres de formulations.

## 1 MESURES DE LA PERMEABILITE DU BETON FRAIS

Ce paragraphe présente d'une part les résultats de mesures de perméabilités qui ont été effectuées par mesure directe au perméamètre à charge fixe.

D'autre part, une autre approche du calcul des perméabilités est proposée. Elle est basée sur l'étude du gradient de pressions capillaires sur un échantillon de grande hauteur.

Enfin le paragraphe se conclue par la comparaison des valeurs obtenues.

### 1.1 Mesures directes au perméamètre

#### 1.1.1 Cas des sols fins

La perméabilité des sols fins varie en fonction du type de squelette solide du sol (taille des grains, taille des pores etc...) mais également en fonction de la teneur en eau et de l'état hydrique du sol. Celui-ci peut être saturé avec présence d'air occlus ou dans un état funiculaire avec une connectivité de la phase liquide, l'air et l'eau étant distincts (Dysli, 1997).

La figure 5-1 issue du cours de mécanique des sols de (Dysli, 1997) montre l'évolution de la perméabilité de quelques sols fins en fonction du degré de saturation. Par exemple, un sable limoneux voit sa perméabilité être multipliée par 1000 entre un état partiellement saturé  $S_r = 60\%$ , et un état saturé  $S_r = 100\%$

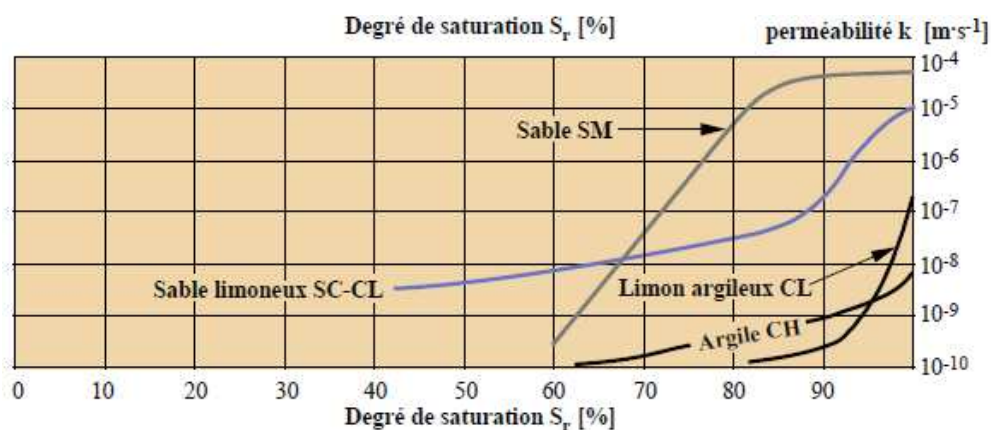


Figure 5- 1 : évolution des perméabilités des sols fins non saturés en fonction du degré de saturation, (Dysli, 1997)

Les perméabilités  $K$  exprimées en  $m/s$  représentent donc des valeurs très variables dont la détermination en laboratoire reste toujours aléatoire et dont les valeurs obtenues relèvent avant tout de l'ordre de grandeur. Pour les sols, un facteur 10 n'est pas rare.

#### 1.1.2 Mesures directes de la perméabilité des bétons frais

Conformément au chap2. § 4, figure 2-31, des mesures de perméabilité des six bétons étudiés ont été réalisées à l'aide d'un perméamètre à charge fixe.

Ce moyen d'essai est constitué d'une cellule normalement utilisée en mécanique des sols de 15,3 cm de diamètre et de 12,7 cm de hauteur placée sous une charge de 1,25 m CE.

Le tableau 5-1 récapitule les principaux temps caractéristiques de l'essai.  $t$  est compté depuis  $t_0$ , origine de l'essai qui coïncide avec l'introduction de l'eau d'ajout dans le malaxeur.

t (min's'')	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
temps de mise en œuvre	6'00"	5'56"	5'30"	5'30"	6'00"	5'36"
temps de début de la mesure	9'00"	12'45"	9'43"	9'54"	10'15"	9'10"
temps d'apparition du régime permanent	18'00"	16'45"	19'43"	10'00"	20'15"	17'10"

Tableau 5- 1 : temps caractéristiques des essais de perméabilité par mesure directe  
 B<sub>0R</sub>, B<sub>100R1,2A</sub>, B<sub>100R0,5A</sub>, Gc<sub>0R</sub>, Gc<sub>100R1,2A</sub>, Gc<sub>100R0,5A</sub>

A compter de l'obtention du régime permanent, les courbes de mesure du débit massique cumulé sont construites et sont reportées sur la figure 5-2. Pour chaque béton, l'origine des temps est le début du régime permanent tel que précisé dans le tableau 5-1.

A partir de ces courbes, il est possible de calculer une pente moyenne qui est homogène avec un débit massique en kg/min. Puis l'application de la loi de Darcy équation Eq(10), chap § 3.2.3.1, permet de déterminer la perméabilité K. Les valeurs calculées sont récapitulées au sein du tableau 5-2.

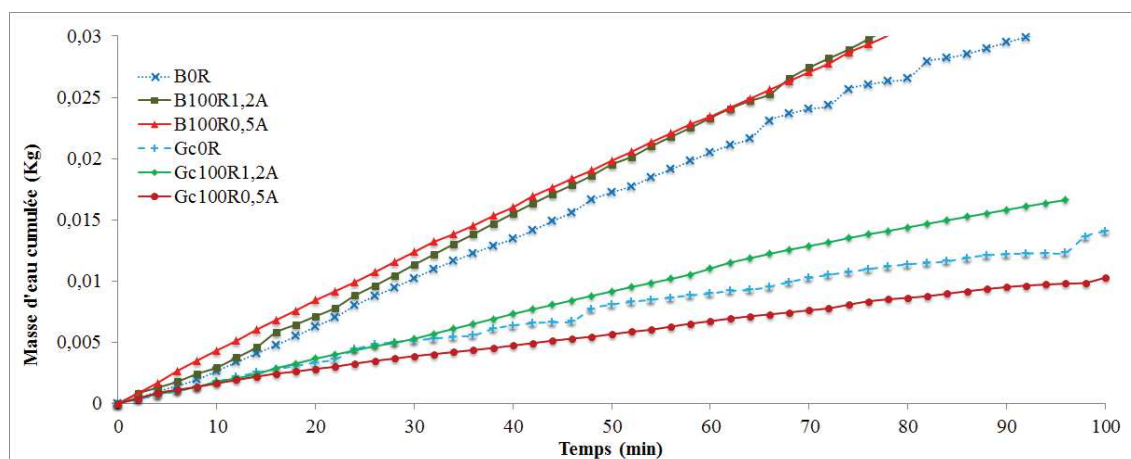


Figure 5- 2 : débit massique cumulé en fonction du temps,  
 bétons B<sub>0R</sub>, B<sub>100R1,2A</sub>, B<sub>100R0,5A</sub>, Gc<sub>0R</sub>, Gc<sub>100R1,2A</sub>, Gc<sub>100R0,5A</sub>

Bétons	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
Débit massique (Kg/min)	$3,31 \cdot 10^{-4}$	$3,95 \cdot 10^{-4}$	$3,75 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$9,64 \cdot 10^{-5}$
V = Q/A (m/s)	$3,00 \cdot 10^{-7}$	$3,58 \cdot 10^{-7}$	$3,40 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-7}$	$1,61 \cdot 10^{-7}$	$8,74 \cdot 10^{-8}$
Gradient $i = \Delta H / \Delta L$	9,84	9,84	9,84	9,84	9,84	9,84
K (m/s)	$3,1 \cdot 10^{-08}$	$3,65 \cdot 10^{-08}$	$3,5 \cdot 10^{-08}$	$1,2 \cdot 10^{-08}$	$1,65 \cdot 10^{-08}$	$8,9 \cdot 10^{-09}$

Tableau 5- 2 : valeurs de perméabilités mesurées au perméamètre à charge fixe.

Les valeurs obtenues sont de l'ordre de  $1 \cdot 10^{-8}$  à  $4 \cdot 10^{-8}$ . Elles sont comparables aux valeurs proposées dans la littérature pour des bétons, (cf 3.2.3.1 du chapitre 1). Il faut toutefois noter qu'en fonction des auteurs, les valeurs de perméabilité peuvent varier d'un facteur dix car elles sont tributaires du pourcentage de pâte très variable entre des pâtes de ciment, des mortiers ou des bétons.

Des travaux antérieurs non publiés de Mbemba et Devillers ont permis de mesurer une valeur de perméabilité de  $1,2 \cdot 10^{-8}$  pour un béton à base de granulats naturels avec un  $E/C = 0,45$  et qui est comparable au béton  $Gc_{0R}$ .

La figure 5-3 met en évidence que la perméabilité croît avec le rapport du rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  initial en sortie de malaxeur. Ces résultats sont conformes avec les résultats obtenus pour des pâtes de ciment (Amziane, 2005). De plus à  $E/L$  donné, la perméabilité des bétons recyclés est plus grande que celle des bétons naturels. Les bétons recyclés ont donc plus d'aptitudes à ressuer que les bétons naturels.

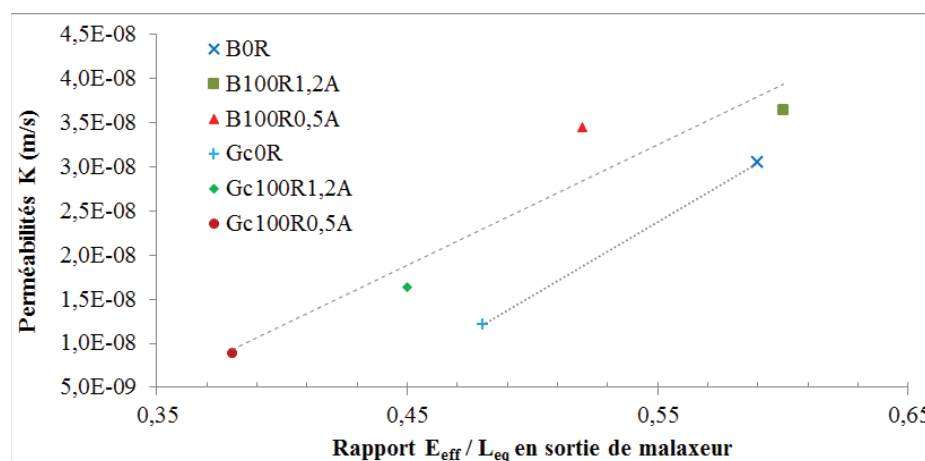


Figure 5- 3 : perméabilités  $K$  (m/s) mesurées au perméamètre à charge fixe en fonction du rapport initial  $E/C$  en sortie de malaxeur

## 1.2 Mesure du gradient de pression capillaire et calcul des perméabilités associées

Mbemba et al., (2013) ont réalisés des essais sur des éprouvettes avec des mesures de pression capillaire à différentes hauteurs, 3, 11 et 19 cm. Ils ont mis en évidence la présence d'un gradient de pressions capillaires qui aura tendance à faire fissurer la partie la plus sèche, donc la surface, car le cœur du matériau encore saturé va s'opposer aux déformations imposées par la surface.

Dans les essais expérimentaux au banc, les capteurs de pression capillaire sont placés à 20, 42 et 64 mm de la surface. Il y a donc 22 mm d'écart entre les capteurs. Si un gradient existe, du fait du faible différentiel de hauteur entre les capteurs la différence de pression est minimale. La différence de valeur mesurée de  $P_c$  qui en résulte est faible et on peut donc douter de l'existence d'un gradient.

Par conséquent, pour les quatre bétons recyclés, des essais complémentaires ont été réalisés sur des éprouvettes 16 x 32 de 320 mm de haut, conformément au descriptif du chap 2. § 2-6. Les cotes de mise en place des capteurs sont échelonnées sur toute la hauteur de l'échantillon.

Au final, pour les quatre bétons recyclés qui ont fait l'objet de ces essais, il a toujours été possible d'exploiter la valeur du capteur supérieur à 20 mm, la valeur du capteur médian à 130 mm, et la valeur du capteur profond à 300 mm. Les gradients de pression capillaire sont calculés entre ces points de mesures.

Sous l'effet du flux de séchage qui est constant, des écoulements d'eau ascendants verticaux sont présents dans l'échantillon. Il en résulte que le gradient de pression capillaire n'est pas linéaire sur la hauteur. L'exploitation des essais permet d'obtenir un gradient moyen en partie supérieure de l'éprouvette entre 20 et 130 mm dans la partie qui est la plus soumise à la dessiccation.

La figure 5-4 donne l'évolution du gradient de pression capillaire pour les quatre bétons recyclés B<sub>100R</sub>1,2A, B<sub>100R</sub>0,5A, Gc<sub>100R</sub>1,2A, Gc<sub>100R</sub>0,5A de 0,25 h jusqu'à 5 h.

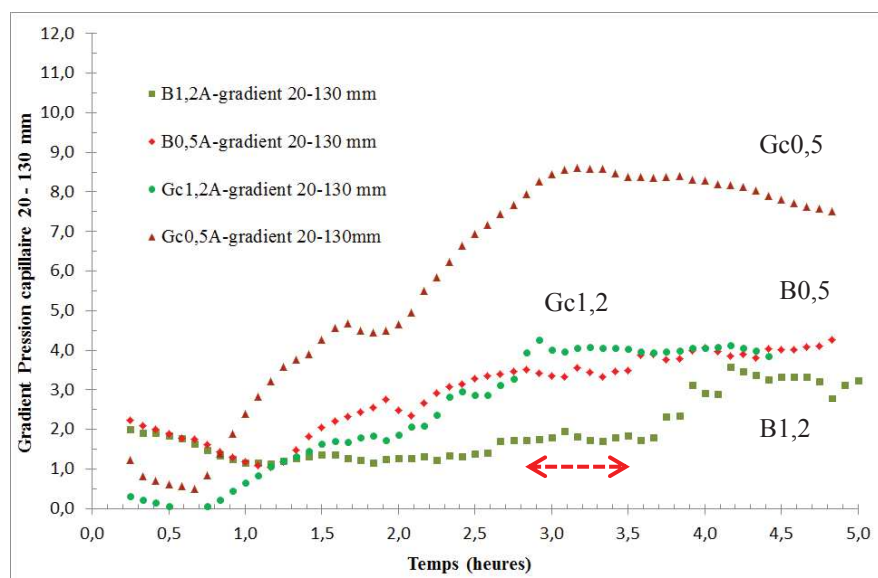


Figure 5- 4 : courbes de gradient de pression capillaire entre les capteurs situés à 20 et 130 mm depuis la face supérieure, pour les 4 bétons recyclés

L'analyse des courbes de la figure 5-4 montre que les valeurs du gradient se stabilisent vers 2,7 à 3,5 heures. Il est à remarquer que la période de stabilité est très courte, de l'ordre d'une heure. En effet, au-delà, le gradient de pression capillaire évolue à nouveau à cause de la prise physique du béton et de la consommation d'eau induite par les réactions d'hydratation (chap 2. §2-8).

Conformément à des travaux de Mbemba et Devillers non publiés, c'est dans cette période de stabilisation du gradient que le calcul de perméabilité doit être effectué en utilisant la loi de Darcy selon l'équation Eq(10). Les valeurs obtenues sont récapitulées au sein du tableau 5-3.

Bétons	B <sub>100R</sub> 1,2A	B <sub>100R</sub> 0,5A	Gc <sub>100R</sub> 1,2A	Gc <sub>100R</sub> 0,5A
Age de calcul (h)	4,2	3,6	3,2	3,2
Gradient $i = \Delta H / \Delta L = V$ (m/s) = constante, car flux de séchage constant	3,47	3,91	4,09	8,59
Perméabilité K (m/s)	$9,53 \cdot 10^{-8}$	$7,67 \cdot 10^{-8}$	$5,91 \cdot 10^{-8}$	$2,65 \cdot 10^{-8}$

Tableau 5- 3 : calcul des perméabilités à partir du gradient des pressions capillaires bétons B<sub>100R</sub>1,2A, B<sub>100R</sub>0,5A, Gc<sub>100R</sub>1,2A, Gc<sub>100R</sub>0,5A

Pour les 4 bétons recyclés, la figure 5-5 souligne la linéarité entre la perméabilité et le rapport E/L.

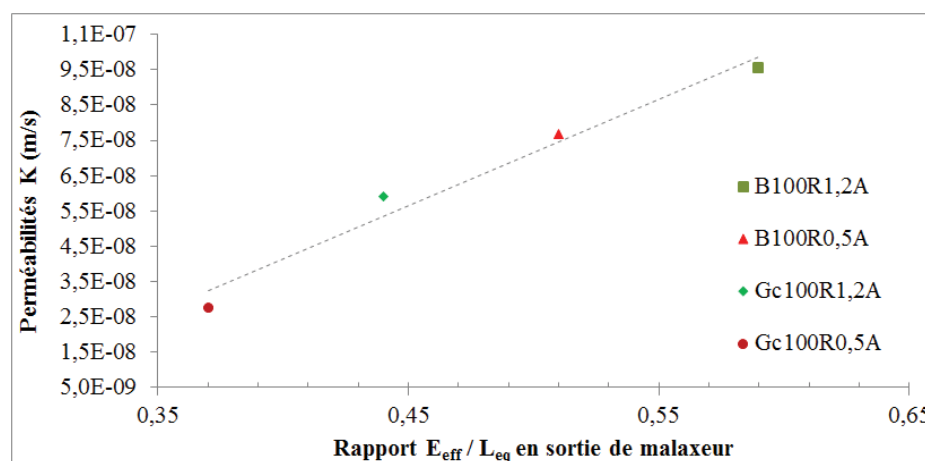


Figure 5- 5 : perméabilités  $K$  (m/s) =  $f(E/L)$ , bétons recyclés B1,2A, B0,5A, Gc1,2A, Gc0,5A

### 1.3 Bilan et comparaisons

Le tableau 5-4 récapitule les valeurs de perméabilité mesurées à l'aide du perméamètre à charge fixe (§ 1.1.2) et calculées à partir des mesures de pression capillaire (§1.1.3). Les ordres de grandeur sont comparables. Toutefois il existe un rapport multiplicateur de 2,2 à 3,6 pour les perméabilités calculées à l'aide du gradient de pressions capillaires qui sont toujours plus grandes.

Cet écart n'est pas important lorsqu'il est relatif à des calculs de perméabilité à partir de deux essais n'ayant rien en commun quant aux phénomènes physiques qu'ils imposent aux échantillons. Pour le perméamètre à charge fixe, l'échantillon subit une consolidation importante. Pour la mesure du gradient, le béton est soumis à un séchage sévère.

De plus, le gradient est de l'ordre de 10 pour les essais au perméamètre à comparer à des valeurs de 3.5 à 8.6 entre les deux points de mesure de la pression capillaire. Lors de travaux antérieurs non publiés, Mbemba et Devillers obtenaient un gradient de l'ordre de 15 pour un béton naturel de génie civil dont le rapport E/C avoisinait 0,45.

Bétons	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
Perméabilité mesurée au perméamètre, K (m/s)	3,1 10 <sup>-8</sup>	3,65 10 <sup>-8</sup>	3,5 10 <sup>-8</sup>	1,2 10 <sup>-8</sup>	1,65 10 <sup>-8</sup>	8,9 10 <sup>-9</sup>
Perméabilité calculée à partir du gradient, K (m/s)	Non mesurée	9,53 10 <sup>-8</sup>	7,67 10 <sup>-8</sup>	Non mesurée	5,91 10 <sup>-8</sup>	2,65 10 <sup>-8</sup>

Tableau 5- 4 : récapitulatif des valeurs de perméabilités mesurées au perméamètre et calculées à partir des pressions capillaires

L'analyse du tableau 5-4 montre que la perméabilité des bétons recyclés frais est plus importante que celles des bétons naturels de référence. Seul le béton Gc<sub>100R0,5A</sub> déroge à cette règle.

Les bétons recyclés sont des bétons plus sensibles au ressuage. La formulation devra être étudiée en conséquence.

## 2 MODELISATION DU RETRAIT PLASTIQUE A PARTIR DE LA PRESSION CAPILLAIRE

### 2.1 Variations volumiques des bétons sous séchage

Ce paragraphe a pour objectif de comparer les variations volumiques du béton avec le volume de perte d'eau par évaporation au cours du temps pour les différents bétons étudiés.

La courbe de variation volumique du béton est calculée par composition des déformations mesurées verticalement et horizontalement conformément à l'équation Eq(25).

$$(\epsilon_{\text{déformation verticale}} + \epsilon_{\text{retrait Horizontal/X}} + \epsilon_{\text{retrait Horizontal/Y}}) \times L \times l \times H \text{ (cm}^3\text{)} \quad \text{Eq (25)}$$

où : le terme dans la parenthèse est la trace du tenseur des déformations et L, l, H sont respectivement la longueur, la largeur et la hauteur du moule en centimètres (30 x 30 x 8,4 cm).

Le volume de perte d'eau par évaporation au cours du temps est calculée conformément à l'équation Eq(26) ci-dessous :

$$\Delta V_{w \text{ évaporée}} = 1000 \cdot J \cdot t \cdot A \text{ (cm}^3\text{)} \quad \text{Eq (26)}$$

où  $\Delta V_{w \text{ évaporée}}$  : valeur théorique de volume d'eau évaporée, J est le flux d'évaporation surfacique, (Kg / m<sup>2</sup>.h) récapitulé au chap 3. § 1-2, t est le temps d'exposition au vent, A est l'aire de l'échantillon soumis à la dessiccation.

#### 2.1.1 Bétons de bâtiment

Les figures 5-6 et 5-7 représentent les courbes  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$  pour les deux bétons B<sub>100R1,2A</sub> et B<sub>100R0,5A</sub>.

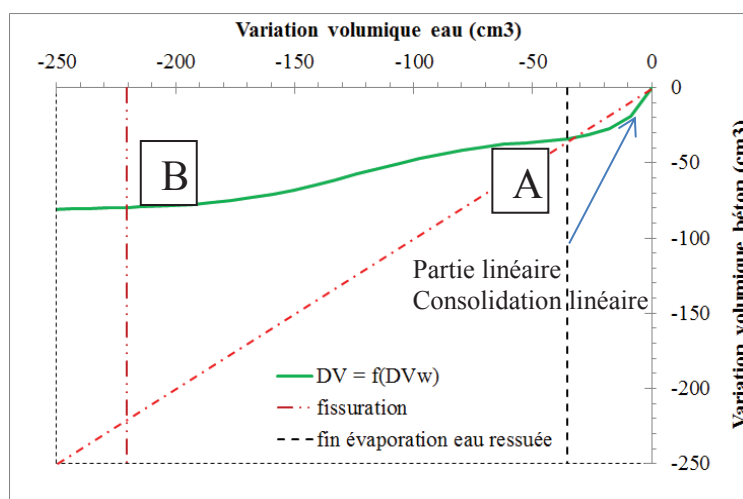


Figure 5- 6 : courbe  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$ , béton B<sub>100R1,2A</sub>

L'analyse de la courbe 5-6 fait apparaître différents domaines et points caractéristiques :

- entre 0 et quelques dizaines de cm<sup>3</sup> : la courbe  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$  se situe au-dessous de la droite  $y = x$  c'est-à-dire que la variation volumique du béton est supérieure à la perte d'eau par évaporation. Ce résultat est également mis en évidence par (Slowik et al., 2008) pour des pâtes de ciment



- point A : intersection de la droite et de la courbe
- point B : la courbe  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$  change de pente et devient sub horizontale, ce qui traduit que  $\Delta V_{\text{béton}}$  se stabilise alors que  $\Delta V_{\text{eau}}$  continue d'évoluer.

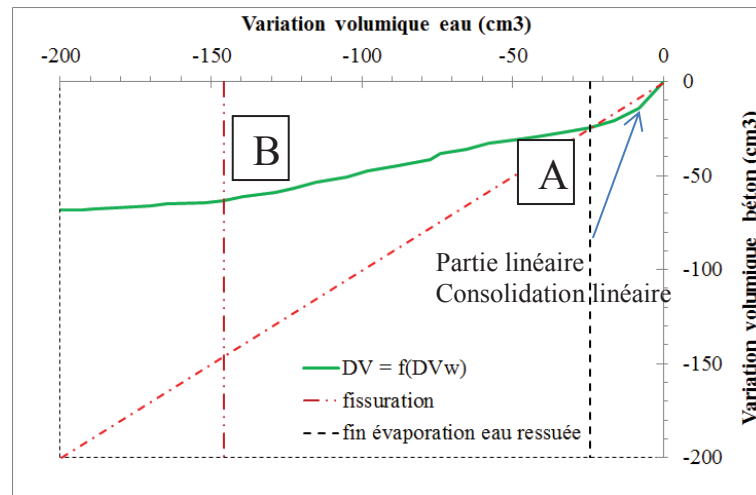


Figure 5- 7 : courbes  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$ , béton B<sub>100R</sub>0,5A

Le béton B<sub>100R</sub>0,5A (figure 5-7) se comporte comme le béton B<sub>100R</sub>1,2A. Le béton naturel B<sub>0R</sub> a un comportement similaire au béton B<sub>100R</sub>0,5A.

Le premier domaine des courbes  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$  des figures 5-6 et 5-7 fait apparaître le ressuage qui conduit à la formation d'une pellicule d'eau en surface. Cette eau protège le matériau de la dessiccation. Cette quantité d'eau va être évaporée par le flux séchant jusqu'au point A, intersection de la courbe  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$  et de la droite  $y=x$ . A l'origine, la courbe qui est linéaire est représentative de la consolidation primaire accompagnée du ressuage.

L'âge correspondant à la fin de l'évaporation de l'eau de ressuage peut se lire sur la figure 5-8. Il est de 0,52 h pour le béton B<sub>100R</sub>0,5A et de 0,62 h pour le béton B<sub>100R</sub>1,2A.

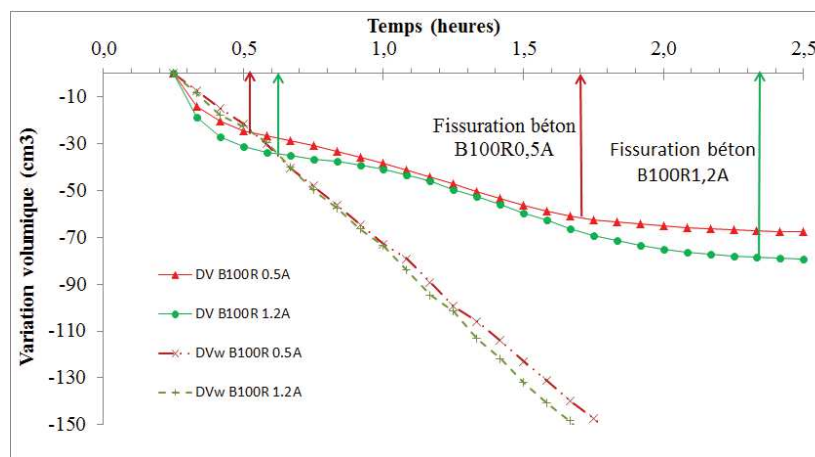


Figure 5- 8 : courbes  $\Delta V_{\text{béton}} = f(t)$  et  $\Delta V_{\text{eau}} = f(t)$ , bétons B<sub>100R</sub>1,2A et B<sub>100R</sub>0,5A

Les courbes de variation volumique du béton sont quasi linéaires jusqu'au temps de fissuration, point B, puis deviennent sub-horizontales au-delà.

### 2.1.2 Bétons de génie civil

Les figures 5-9 et 5-10 représentent les courbes  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$  pour les deux bétons Gc<sub>100R1,2A</sub> et Gc<sub>100R0,5A</sub>.

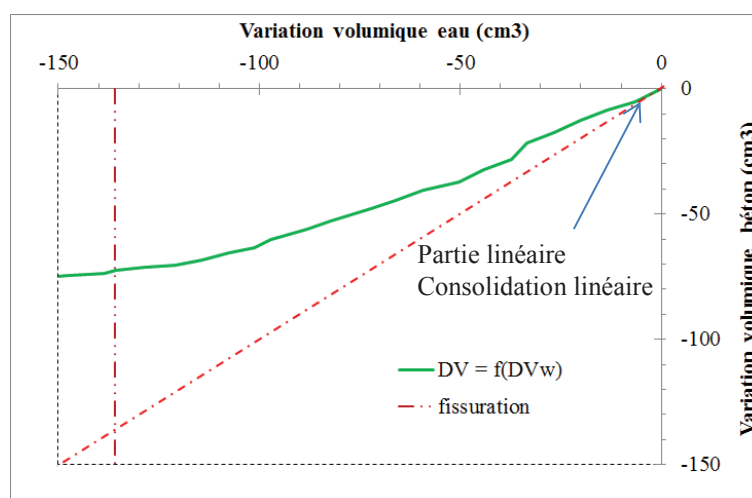


Figure 5- 9 : courbe  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$ , béton Gc<sub>100R1,2A</sub>

Pour le béton Gc<sub>100R1,2A</sub>, au début de la période de séchage, la courbe  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$  est confondue avec la droite  $y=x$ . Slowik et al. (2008) ont également observé ce résultat pour des bétons. Le béton Gc<sub>0R</sub> a une courbe proche de celle du béton Gc<sub>100R1,2A</sub>.

Ce résultat signifie que dans un premier temps, pendant une dizaine de minutes, le débit de ressuage est égal au flux de séchage, il y a un équilibre entre les deux flux. Puis très vite, des ménisques se forment dans le réseau poreux et la dépression capillaire se développe dans le béton comme exposé aux § 2 et 3 du chapitre 4.

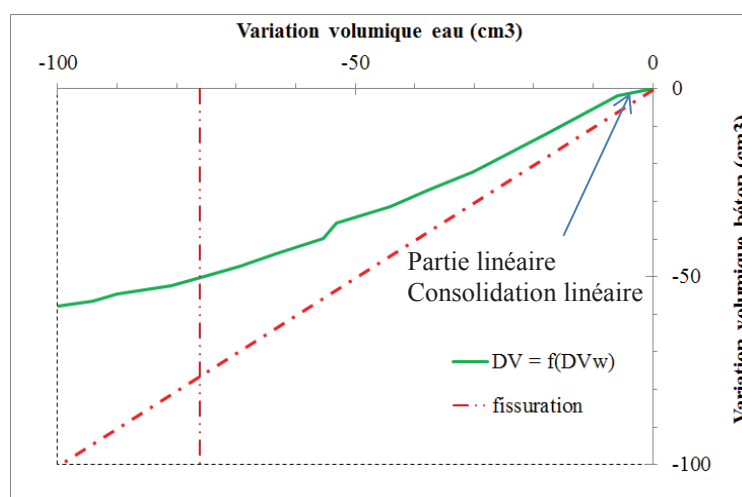


Figure 5- 10 : courbes  $\Delta V_{\text{béton}} = f(\Delta V_{\text{eau}})$ , béton Gc<sub>100R0,5A</sub>

Pour le béton Gc<sub>100R0,5A</sub>, dès le début de l'essai, la variation volumique du béton reste inférieure à la variation volumique d'eau. Les ménisques se forment donc dès le départ et les pressions capillaires se développent dès le début de la période de séchage.

### 2.1.3 Estimation connexe du temps d'évaporation de l'eau ressuée des bétons recyclés de bâtiment

Conformément à (Powers, 1968) et (Josserand, 2002) à un instant  $t$ , la mesure de la quantité d'eau ressuée peut s'obtenir par différence entre la hauteur initiale de béton et la hauteur mesurée du squelette. Cette quantité d'eau superficielle de ressuage est à comparer à la quantité d'eau perdue par évaporation.

La hauteur d'eau théorique de ressuage (mm) obtenue peut être calculée selon l'équation Eq (27) et la valeur théorique d'eau évaporée sous l'effet des flux de séchage de chaque béton calculée selon l'équation Eq (28).

$$\Delta H_w = H_i (1 - \varepsilon_v) \quad \text{Eq (27)}$$

Où  $\Delta H_w$  : valeur théorique d'eau de ressuage à l'instant  $t$ ,  $H_i$  : hauteur initiale du béton (84 mm) et  $\varepsilon_v$  : déformation verticale mesurée à l'instant  $t$ ,

$$H_w \text{ évaporée} = J \cdot t \text{ (mm)} \quad \text{Eq (28)}$$

Où  $H_w \text{ évaporée}$  : valeur théorique d'eau évaporée,  $J$  est le flux d'évaporation surfacique, (Kg/m<sup>2</sup>/h) récapitulé au chap 3. § 1-2,  $t$  est le temps d'exposition au vent.

Le calcul du point d'équilibre est donné par  $\Delta H_w = H_w \text{ évaporée}$ . Il traduit l'âge de fin d'évaporation de l'eau ressuée. Le tableau 5-5 récapitule l'âge de ce point d'équilibre et le compare à l'étude de la variation volumique du squelette en fonction du temps (figure 5-8 du § 2.1). Les valeurs obtenues sont cohérentes.

	Age du Point d'équilibre (h) $\Delta H_w = H_w \text{ évaporée}$	Age où $\Delta V_{\text{béton}} = \Delta V_{\text{eau}}$ Courbes $\Delta V_{\text{béton}} = f(t)$ (figure 5-8)	Ecart
B <sub>100R1,2A</sub>	0,58	0,62	0,04 h (2,5 mm)
B <sub>100R0,5A</sub>	0,49	0,52	0,03 h (2 mm)

Tableau 5- 5 : comparaison de l'âge d'évacuation de l'eau ressuée par étude des variations volumiques du béton et par estimation de la quantité d'eau ressuée évaporée

## 2.2 Le retrait plastique en fonction de la pression capillaire

Les figures 5-11 et 5-12 présentent les valeurs de retrait plastique en fonction de la pression capillaire atteinte dans le béton frais pour les bétons de bâtiment et pour les bétons de génie civil.

Les parties du chapitre 2 § 5.3 et du chapitre 4 § 3.3.3 ont montré que le retrait était bien un phénomène volumique et isotrope.

Ce résultat est repris ici pour la construction des courbes de retrait en fonction de la pression capillaire.  $\varepsilon$  est la trace du tenseur des déformations est calculée conformément à l'équation Eq(29).

$$\begin{aligned} d\varepsilon &= (\varepsilon_{\text{déformation verticale}} + \varepsilon_{\text{retrait Horizontal}/X} + \varepsilon_{\text{retrait Horizontal}/Y}) \quad \text{Eq (29)} \\ &= 3 \cdot \varepsilon_{\text{déformation moyenne de retrait horizontal}} \end{aligned}$$

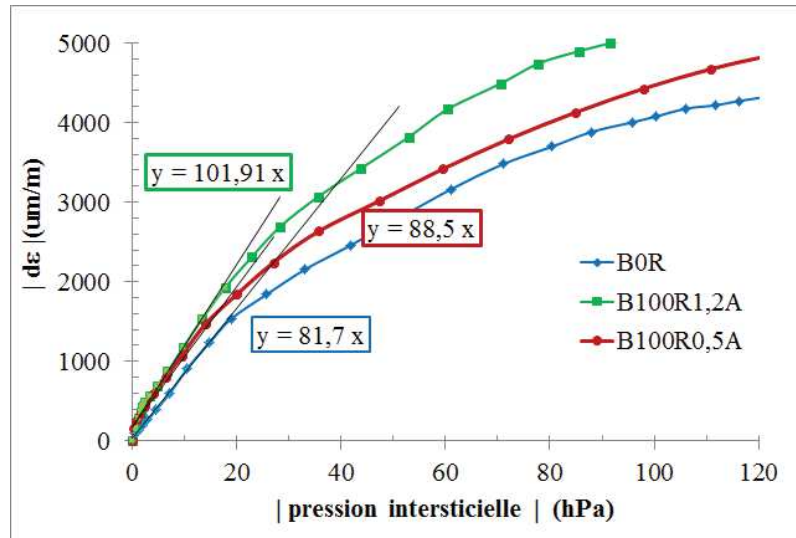


Figure 5- 11 : courbes de retrait en fonction de la pression capillaire des trois bétons de bâtiment

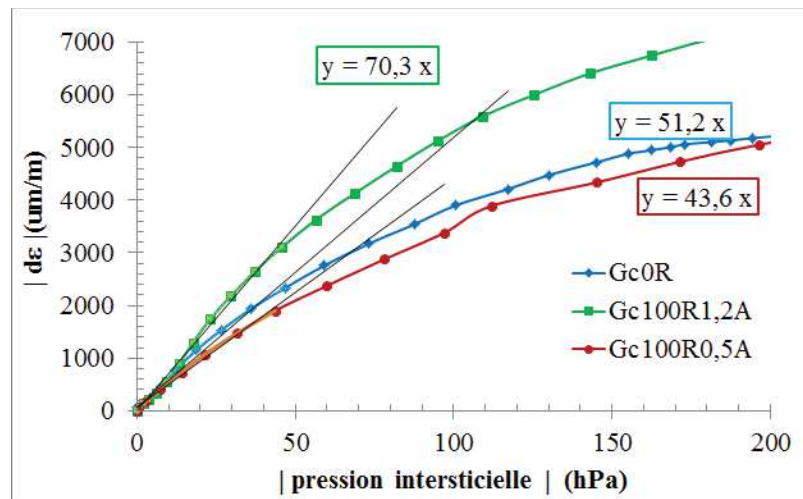


Figure 5- 12 : courbes de retrait en fonction de la pression capillaire des trois bétons de génie civil

Dans un milieu poreux non saturé, il est possible d'écrire un ensemble de deux équations faisant intervenir d'une part les variations de contraintes et de pression, d'autre part les variations de déformations et de masse. Cet ensemble de lois macroscopiques peut être écrit sous la forme simplifiée de l'équation Eq(30) (Baroghel-Bouny et al., 1999).

$$d\sigma = K_0 \cdot d\varepsilon + b_l(p_c) \cdot dp_c - dp_g \tag{Eq (30)}$$

$$dp_c = -M \left[ -b_l(p_c) d\varepsilon + \frac{dm_l}{\rho_l} \right]$$

Dans le cas d'essais en conditions drainées, où le retrait est libre et où le béton est saturé, l'équation Eq(30) se simplifie encore et devient l'équation Eq(31) ci-dessous.

En effet,  $b_l$  (coefficient de Biot) vaut 1 car le matériau est saturé,  $d\sigma = 0$  car le retrait est libre et  $dp_g$  (phase gazeuse) = 0 car  $p_g$  est constant et égale à la pression atmosphérique.

$$dp_c = -K_0 d\varepsilon. \tag{Eq (31)}$$

Où  $\Delta\varepsilon$  est la variation volumique de retrait plastique,  $dp_c$  est la variation de pression interstitielle et  $K_o$  le module de compressibilité volumique en conditions drainées.

L'équation locale Eq (31) peut être intégrée sur le volume de l'échantillon car les mesures de déplacements (et les déformations calculées) sont des valeurs moyennées sur la hauteur de l'échantillon et car la pression capillaire est une pression hydrostatique au vu des mesures effectuées.

Il en résulte la valeur du coefficient  $K_o$  est définie expérimentalement sur les courbes 5-11 et 5-12 qui est donc égale à l'inverse de la pente à l'origine des courbes de retrait en fonction de la pression capillaire.

Le tableau 5-6 récapitule pour les six bétons étudiés les valeurs du coefficient de compressibilité  $K_o$  de chaque béton.

Bétons	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
Valeur du coefficient $K_o$ ( $10^6$ MPa)	122	98	112	196	143	227

Tableau 5- 6 : récapitulatif des valeurs de modules de compressibilité volumique  $K_o$

L'analyse du tableau 5-6 montre que les coefficients  $K_o$  sont plus importants pour les bétons de génie civil que pour les bétons de bâtiment. Cela signifie que pour une même variation de pression capillaire, le retrait mesuré sera plus fort pour les bétons de bâtiment.

D'autre part, les coefficients  $K_o$  des bétons recyclés pré-saturés à 0,5A sont plus grands que ceux des bétons naturels témoins contrairement aux bétons pré-saturés à 1,2A qui sont du même ordre que les bétons naturels de référence.

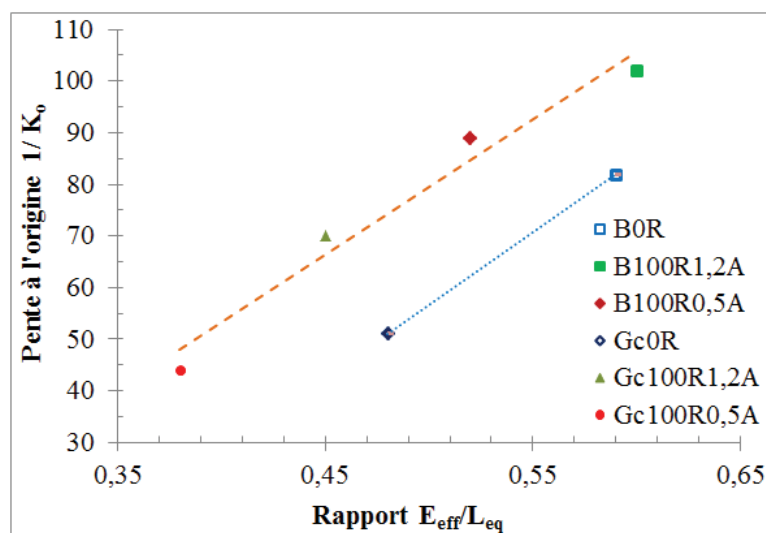


Figure 5- 13 : courbe récapitulative donnant  $K_o$  en fonction du rapport  $E/L$ .

La figure 5-13 fait apparaître que la quantité d'eau efficace (rapport  $E/L$ ) est un paramètre qui impacte fortement les caractéristiques du milieu poreux et en particulier la réponse en déformation (retrait plastique) sous l'effet du développement de la pression du fluide (pression capillaire). Plus le rapport  $E/L$  augmente, plus le coefficient de compressibilité augmente.

### 3 EFFET DU SECHAGE SUR LA TEMPERATURE DU BETON FRAIS

L'objectif est de modéliser le transfert d'eau et de chaleur au sein du béton soumis au séchage. Le paragraphe permettra de comparer les mesures effectuées avec une modélisation qui s'appuie sur un modèle unidimensionnel réalisé à l'aide du logiciel WUFI.

#### 3.1 Modèles présentés

Les calculs numériques de transferts couplés température / humidité au sein du béton étudié ( $B_{0R}$ ) ont été réalisés avec le logiciel WUFI développé par le Fraunhofer Institut Bauphysik de Holtzkirchen en Allemagne. Ce logiciel est normalement utilisé pour l'étude des transferts d'humidité et de chaleur au sein de parois de bâtiments.

Les deux modèles utilisés sont présentés sur la figure 5-14 ci-dessous.

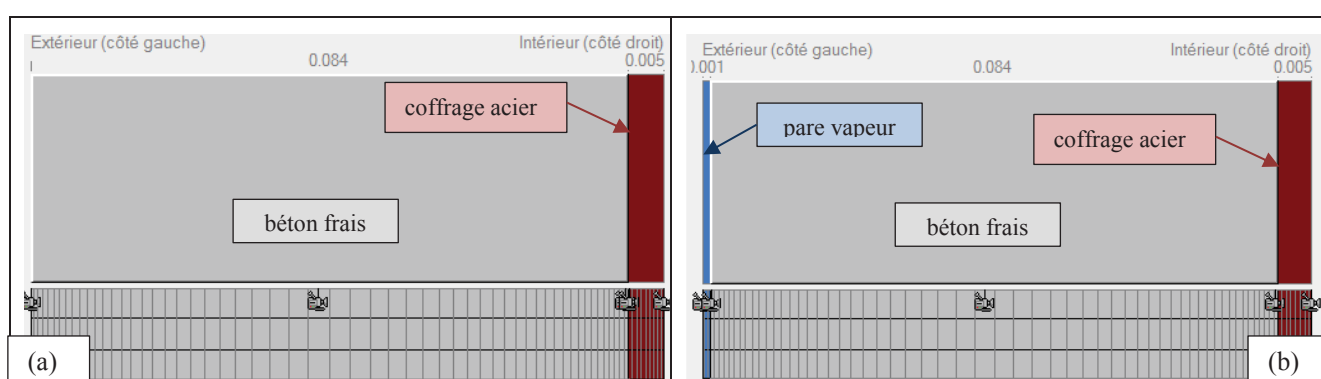


Figure 5- 14 : (a) modèle avec climat extérieur sans vent ;  
(b) modèle en conditions endogènes (présence d'un pare vapeur en surface)

La géométrie est unidirectionnelle et fidèle au moule d'étude du retrait libre :

- un coffrage métallique de 5 mm d'épaisseur
- une épaisseur de béton frais de 84 mm
- pour le modèle en conditions endogènes, un pare vapeur étanche correspondant au capot mis en place sur le moule pendant l'essai

Les conditions initiales des matériaux sont conformes à celles qui sont mesurées lors de l'essai de référence du 21 mars relatif au béton  $B_{0R}$  :

- température initiale du béton frais de 20,1 °C
- teneur en eau volumique initiale de 180 Kg d'eau par m<sup>3</sup> de béton.

Les conditions aux limites sont cohérentes avec les conditions aux limites dans la salle lors de l'essai de référence du 21 mars relatif au béton  $B_{0R}$  :

- pour l'essai en conditions endogène :
  - ◆ climat extérieur correspondant à l'ambiance dans le tunnel alors que le vent souffle à 8m/s : température de 22 °C et RH = 45 %
  - ◆ climat intérieur correspondant à l'ambiance de la salle : température de 20°C et RH = 50 % dans la salle.

- pour l'essai en conditions de dessiccation (sans vent) :
  - ♦ climat extérieur correspondant à l'ambiance de la salle car il n'y a aucun vent : température de 20 ° C et RH = 50 %
  - ♦ climat intérieur correspondant à l'ambiance de la salle : température de 20°C et RH = 50 % dans la salle.

### 3.2 Principes de modélisation et équations

Pour le modèle unidirectionnel proposé, le béton frais est considéré comme un matériau poreux et indéformable.

Les phénomènes thermiques pris en compte sont la conduction thermique et le changement de phase de l'eau, liquide – gaz.

Les mécanismes de transport pris en compte sont la diffusion de vapeur d'eau et la conduction capillaire d'eau.

Les phénomènes suivants ne sont pas pris en compte :

- le séchage convectif du au vent
- le rayonnement en courte ou grande longueur d'onde
- le transport convectif de chaleur par un flux d'air n'est également pas pris en compte car il est rarement unidimensionnel.
- le transport convectif de vapeur d'eau par flux d'air est négligé.
- les transports d'eau dus aux forces de gravitation ou à des effets osmotiques ou électrocinétiques ne sont pas pris en compte.

Le système est soumis à des équations couplées, température – hygrométrie, qui sont à la base du logiciel WUFI (Künzel, 1995).

Dans ces équations, les termes de stockage sont situés à gauche et les termes de transport à droite.

La première équation, Eq (32), représente le bilan de chaleur et la deuxième équation, Eq(33), représente le bilan de masse d'eau.

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + L_v \nabla \left( \frac{\mu}{\delta_a} \nabla(HR \cdot p_{sat}) \right) \quad \text{Eq (32)}$$

$$\frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = \nabla \left( D_{ws} \nabla (HR) + \frac{\mu}{\delta_a} \nabla(HR \cdot p_{sat}) \right) \quad \text{Eq (33)}$$

En unidirectionnel, ces équations peuvent se simplifier et s'écrire Eq(34) et Eq(35) :

$$\rho_0 \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu}{\delta_a} \frac{\partial}{\partial x} (HR \cdot p_{sat}) \right) \quad \text{Eq (34)}$$

$$\frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{ws} \frac{\partial HR}{\partial x} + \frac{\mu}{\delta_a} \frac{\partial}{\partial x} (HR \cdot p_{sat}) \right) \quad \text{Eq (35)}$$

$\rho_0$  est la masse volumique apparente sèche en  $\text{Kg/m}^3$ ,  $c$  est la capacité calorifique massique en  $\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ ,  $T$  est la température en  $\text{K}$ ,  $t$  le temps en  $\text{s}$ ,  $\lambda$  la conductivité thermique en  $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,  $L_v$  (2256) la chaleur latente de changement de phase en  $\text{J.Kg}^{-1}$ ,  $\delta_{\text{air}}$  le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air en  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ,  $\mu$  le facteur de résistance à la diffusion,  $HR$  l'humidité relative,  $p_{\text{sat}}$  la pression de vapeur saturante en  $\text{Pa}$ ,  $w$  la teneur en eau volumique en  $\text{kg/m}^3$  et  $D_{\text{ws}}$  la conductivité hydraulique en  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  (homogène à la perméabilité en  $\text{m}^2/\text{s}$ ).

### 3.3 Données de base et calculs préliminaires

Ce paragraphe récapitule les principales données d'entrées de la modélisation à l'aide du logiciel WUFI.

	$\rho_0$ ( $\text{Kg/m}^3$ )	$C$ ( $\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ )	$\lambda$ ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	$\mu$ --	$D_{\text{ws}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Porosité (%)
Pare-vapeur	--	2300	2,3	$1,5 \cdot 10^6$	0	0,1 %
Acier	7850	500	50	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-20}$	0,1 %
Béton frais <sup>42</sup>	2181	1071	2,3	10	$3 \cdot 10^{-8}$	18.8 %

Tableau 5- 7 : propriétés hygrothermiques des différents matériaux utilisés

Pour l'acier, les données sont issues de la bibliographie générale et usuelle des matériaux. Les données relatives au pare vapeur sont fournies par la bibliothèque matériaux du logiciel WUFI.

Pour le béton frais, le calcul de  $C$  et  $\lambda$  est réalisé par homogénéisation des caractéristiques des composants, eau, granulats ciment à partir des données fournies par (Horai and Simmons, 1969) et (Bentz, 2007). La figure 5-15 explicite le calcul de  $\lambda$  pour un béton frais à granulats calcaires et comprenant 29 % de pâte environ.

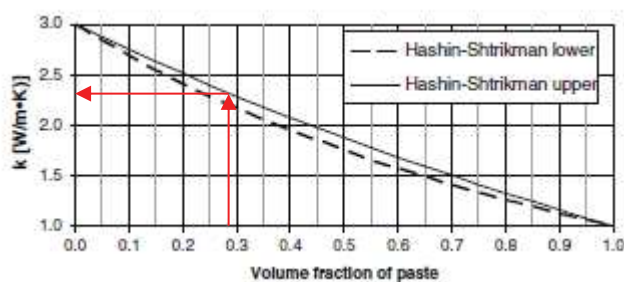


Figure 5- 15 : valeurs de conductivité thermique calculées selon la formule d'homogénéisation de Hashin-Shtrikman pour des bétons en fonction du pourcentage de pâte (Bentz, 2007)

La courbe teneur en eau volumique ( $\text{Kg/m}^3$ ) fonction de l'humidité relative ( $HR$  %) est choisie conformément à la courbe 5-16. La teneur en eau est exprimée en teneur en eau volumique ( $\text{Kg/m}^3$ ). L'humidité relative  $RH$  (%) peut être reliée à la pression capillaire à l'aide de la loi de Kelvin, équation Eq(9).

<sup>42</sup> Valeurs issues d'un calcul par homogénéisation à partir des composants du béton étudié.



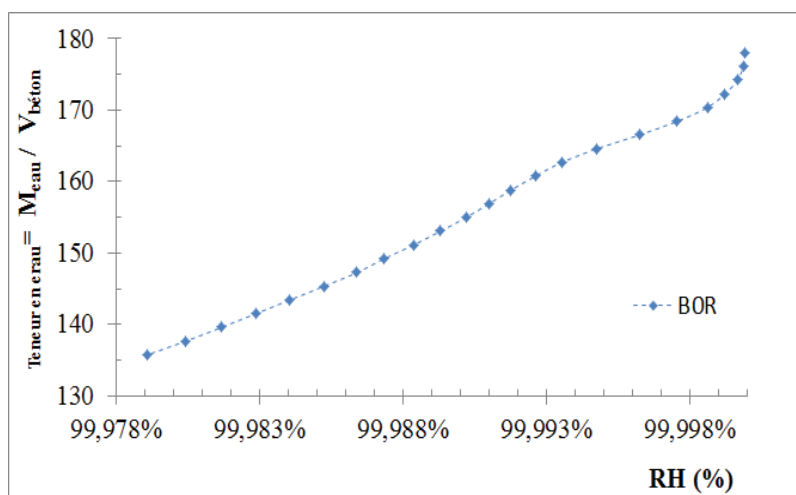


Figure 5- 16 : courbe teneur en eau ( $\text{Kg/m}^3$ ) =  $f(\text{RH})$ , béton  $B_{0R}$

### 3.4 Résultats et discussions

Les résultats d'un calcul théorique avec des conditions aux limites en températures dans le tunnel et dans la salle (cf §3.1) sont présentés sur la figure 5-17 pour l'essai en conditions endogènes et sur la figure 5-18 pour l'essai en conditions de dessiccation sans vent.

Chaque figure présente la courbe de température mesurée à cœur du béton à mi-hauteur de l'échantillon et la température calculée à l'aide du logiciel Wufi au même endroit.

Les résultats de mesures ou de calculs donnent une valeur RH faiblement variable et proche de la valeur de saturation ( $\text{RH} = 100\%$ ) pour l'essai en conditions endogènes ou bien en dessiccation sans vent. Le béton frais reste funiculaire sur les deux premières heures.

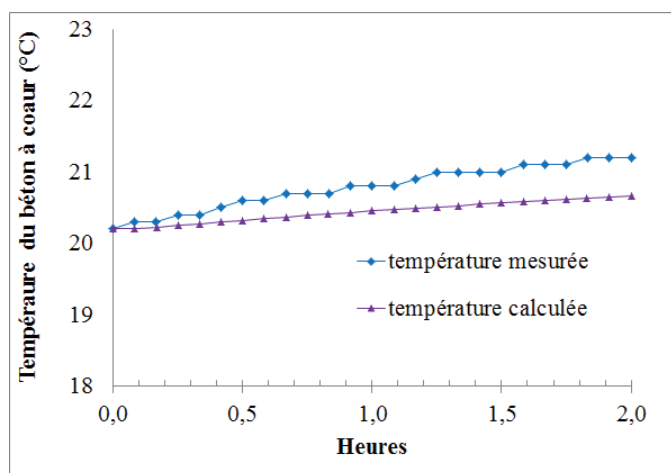


Figure 5- 17 : température mesurée et température calculée pour le béton  $B_{0R}$  en conditions endogènes

En conditions endogènes, compte tenu de la température de l'air dans le tunnel égale à  $22^\circ\text{C}$  et en l'absence de tout échange convectif, la température du béton croît linéairement sur les deux courbes. Au bout de 2 heures, la température mesurée est égale à  $21,1^\circ\text{C}$  et la température calculée est égale à  $20,95^\circ\text{C}$ . L'écart est faible.

Le flux de séchage calculé est de l'ordre de 0,20 à comparer au flux mesuré de l'ordre de 0,15 à  $0,17 \text{ Kg/m}^2/\text{h}$ , valeur comparable à la valeur 0,2 proposée par (Mbemba, 2010).

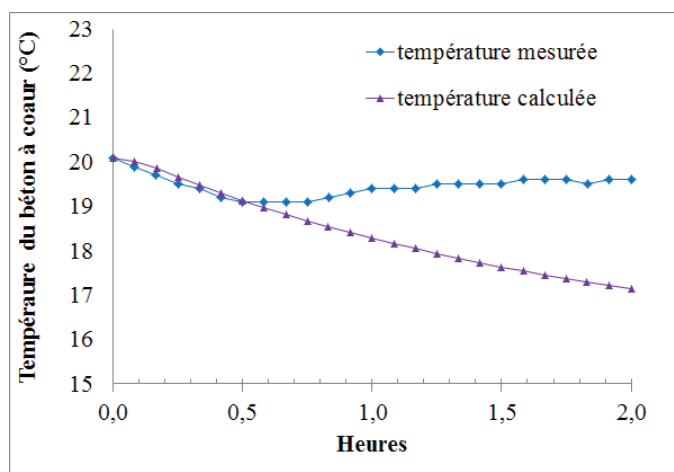


Figure 5- 18 : température mesurée et température calculée pour le béton B0R en conditions de dessiccation

En conditions de dessiccation et sans vent, durant la première demi-heure, la température diminue en dessous de la température ambiante de 20°C. Les courbes « mesure » et « calcul » sont même confondues pendant cet intervalle. Ce phénomène est dû au séchage qui induit le changement de phase de l'eau en vapeur d'eau à la surface. Ce changement de phase consomme des calories dans le béton, en surface et à coeur.

Au-delà de la première demi-heure, la courbe « mesure » se stabilise puis vers une heure croît linéairement en suivant une pente quasiment parallèle à la courbe du béton en conditions endogènes (figure 5-19). La courbe « calcul » continue de décroître car elle ne prend pas en compte certains effets qui sont probablement dus à la chimie du béton.

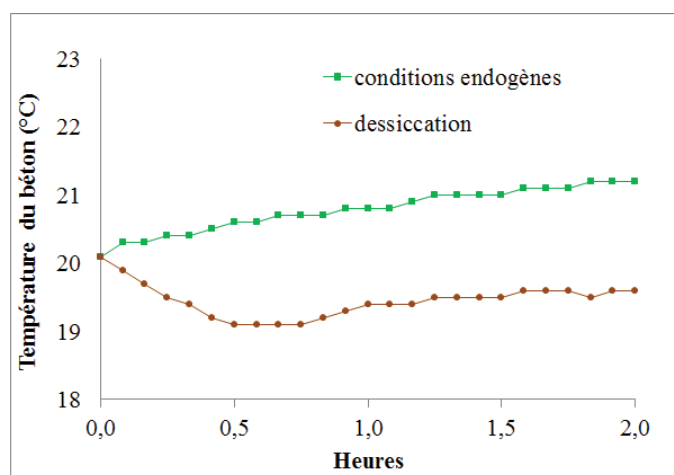


Figure 5- 19 : températures mesurées pour le béton B0R en conditions endogènes et de dessiccation

Pour un béton témoin naturel, ces mesures et calculs mettent donc en évidence qu'il existe un couplage entre le séchage convectif et la température du béton (figure 5-18). Cette chute de température amène un décalage de 0,7 h environ entre l'élévation de la température au sein d'un béton en conditions endogènes ou bien en conditions de sous dessiccation.

## 4 PRESSION D'ENTREE D'AIR ET PARAMETRES DE FORMULATION

### 4.1 Détermination du diamètre de pores à l'entrée d'air

Il a été montré au chapitre 4 que la fissuration intervenait à l'entrée d'air. Les valeurs de pression d'entrée d'air sont déterminées au § 2. Elles sont rappelées dans le tableau 5-5. L'utilisation inverse de la loi de Laplace équation Eq(8), permet de déterminer la dimension des pores critiques lorsque la phase gazeuse pénètre dans le matériau poreux. Il est considéré conformément à (Slowik et al., 2008) que les pores sont cylindriques. L'application de la loi de Laplace conduit à l'équation issue du chap 1. § 3.3.2.2, Eq(36) ci-dessous.

$$P_c = \frac{2 \sigma \cos \theta}{r} \quad \text{Eq (36)}$$

$r$  est le rayon des pores en mètre,  $P_c$  la pression capillaire en Pascal et  $\sigma$  la tension interfaciale air/eau à 20 ° C en N/m.

Le tableau 5-7 donne le résultat du calcul du diamètre des pores concernés par l'entrée de la phase gazeuse dans le réseau poreux et par application de l'équation Eq(33).

	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
Pression d'entrée d'air (hPa)	100	100	120	150	190-200	220
Diamètre des pores (µm)	29	29	24	19	15	14

Tableau 5- 8 : valeurs de la pression d'entrée d'air et diamètres de pores correspondants.

La figure 5-15 illustre les valeurs calculées dans le tableau 4-16 pour les bétons B<sub>0R</sub>, B<sub>100R1,2A</sub>, B<sub>100R0,5A</sub>, Gc<sub>0R</sub>, Gc<sub>100R1,2A</sub>, Gc<sub>100R0,5A</sub> et schématise la loi de Laplace qui donne la pression capillaire en fonction de l'inverse du rayon des pores, équation Eq(33).

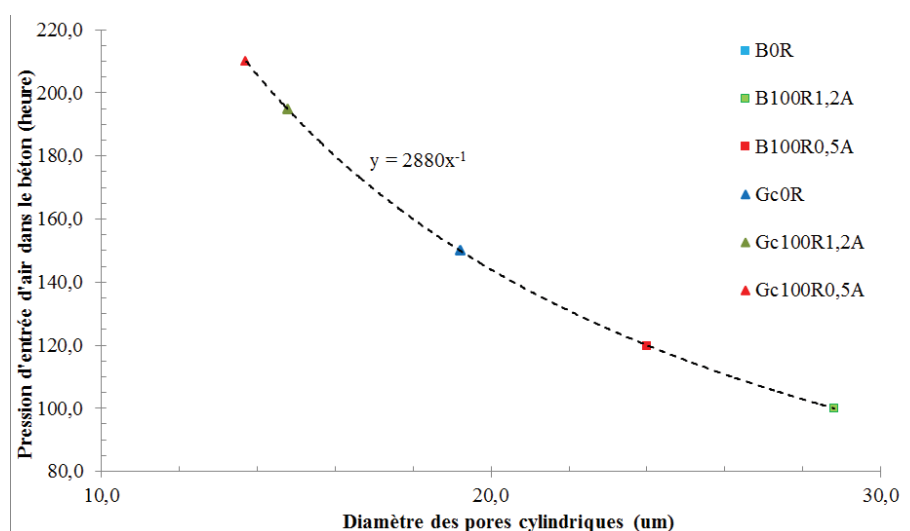


Figure 5- 20 : loi de Laplace dans le cas des bétons et valeurs mesurées pour les six bétons étudiés

Les calculs précédents montrent qu'au moment de l'entrée d'air, il existe une porosité au sein de laquelle la phase gazeuse pénètre. Le diamètre des pores concernés est de 25 à 30 µm pour les bétons de bâtiment et de 15 à 20 µm pour les bétons de génie civil.

Ces valeurs de porosité sont cohérentes avec la macroporosité de plusieurs dizaines de micromètres qui dans les bétons durcis est représentative des restes de la porosité des bétons à l'état frais, (Baroghel-Bouny, 1994).

## 4.2 Corrélation diamètres de pores et paramètres de formulation

Maintenant, il paraît intéressant de vérifier par le calcul s'il est possible de retrouver un ordre de grandeur cohérent des diamètres de pore de la pâte des bétons de bâtiment et de génie civil à partir de quelques paramètres de formulation et en particulier, le diamètre du plus gros grain et la compacité de la pâte.

La détermination du diamètre maximum ( $d_{max}$ ) du plus gros grain de la pâte passe par la connaissance du diamètre maximal ( $d_{max}$ ) du ciment, du filler calcaire et des fines du sable.

- pour le ciment, 9 analyses granulométriques lasers ont été réalisés. Il en résulte une valeur de  $d_{max}$  du ciment égale à 111 microns
- pour le filler calcaire, la fiche fournisseur précise  $d_{max} = 100$  microns, (annexe 1)
- pour le sable, conventionnellement, la fraction inférieure à 125 microns (3% du sable, annexe 1) est considérée comme faisant partie de la pâte.

Il en résulte une valeur  $d_{max} = 125$  microns à considérer pour la pâte de tous les bétons.

L'application de la formule des empilements granulaires avec effet de l'inclusion granulat arrive à la notion d'épaisseur maximale de pâte (EMP) applicable au béton, (De-Larrard François, 1999). EMP représente la distance entre deux gros grains d'un empilement aléatoire (DAO, 2012) tel que représenté sur la figure 5-16.

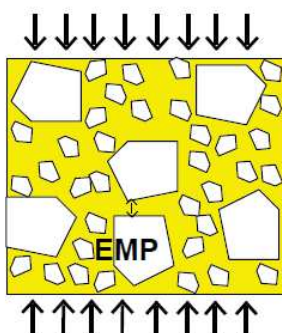


Figure 5- 21 : notion d'EMP pour un béton (De-Larrard François, 1999)

Si la pâte est elle aussi considérée comme un empilement aléatoire, il est possible de calculer une valeur de distance entre grains, conformément à l'équation Eq(37) qui s'inspire du calcul de l'EMP selon (De-Larrard François, 1999).

$$dist = d_{max} \left( 3 \cdot \sqrt{\frac{0,6311}{\omega_c}} - 1 \right) \quad \text{Eq (37)}$$

dist est la distance maximale entre grains de la pâte et  $\omega_c$  défini par l'équation Eq(38).

$$\omega_c = \frac{V_{solide\ pâte}}{V_{solide\ pâte} + V_{eau\ pâte} + V_{air}} \quad \text{Eq (38)}$$

La valeur 0,6311 est la compacité du ciment avec adjuvant donnée par (Bernier, 2004).

Cette valeur forfaitaire ne prend pas en compte la distribution granulométrique réelle de la pâte ni la finesse du ciment.

Le tableau 5-8 récapitule les distances entre grains calculées selon l'équation Eq(37).

	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
V <sub>solide pâte</sub>	113	112	112	127	138	138
V <sub>solide pâte</sub> + V <sub>eau pâte</sub> + V <sub>air</sub>	289	306	292	291	315	299
ω <sub>c</sub>	0,39	0,37	0,38	0,44	0,44	0,46
Dist (μm)	22	25	22	16	16	14

Tableau 5- 9 : distance maximale entre grains de la pâte de ciment pour les 6 bétons étudiés

Le tableau 5-9 compare le diamètre des pores concernés par l'entrée d'air au moment de la fissuration avec la distance maximale entre plus gros grains de la pâte du béton.

	B <sub>0R</sub>	B <sub>100R1,2A</sub>	B <sub>100R0,5A</sub>	Gc <sub>0R</sub>	Gc <sub>100R1,2A</sub>	Gc <sub>100R0,5A</sub>
Diamètres des pores (tableau 5-8) (μm)	29	29	24	19	15	14
Dist (μm)	22	25	22	16	16	14

Tableau 5- 10 : comparatif de la taille des pores au moment de l'entrée d'air avec la distance maximale entre plus gros grains de la pâte de ciment

Il est constaté que :

- les ordres de grandeurs de la porosité de la pâte calculée par l'équation de Laplace et à partir de la théorie des empilements granulaires sont comparables
- l'écart entre les deux familles de bétons (bâtiment et génie civil) est conservé
- au sein d'une même famille de bétons, il n'y a pas d'écart notable entre béton témoin et bétons recyclés.

Les calculs réalisés mettent en évidence que les pores qui sont concernés lors de l'entrée d'air dans le matériau sont les plus gros pores de la pâte de ciment. Toutefois, cette démarche ne prend en compte qu'une porosité de pâte et avec des hypothèses simplifiées : pas de prise en compte de la finesse du ciment ni de la distribution granulométrique. Or, des distributions granulométriques différentes conduisent à des pressions d'entrée d'air différentes : exemple d'une suspension de cendres volantes et une pâte de ciment qui conduisent à des pressions de 55 et 40 kPa selon (Slowik et al., 2008).

De plus, Slowik et al (2008) précise que les valeurs de pression d'entrée d'air sont comparables dans le béton (10 kPa) et dans la pâte de ciment (40 kPa) correspondante. Ils justifient ce résultat en précisant que les pores qui contrôlent l'entrée d'air dans le béton sont bien ceux de la pâte.

Le passage d'un matériau à l'autre ne semble donc pas si évident. En effet, si les bétons ont des pressions d'entrée d'air plus petites que la pâte de ciment correspondante, cela signifie que pour des bétons, l'air pénètre dans des pores de diamètre plus grand. Peut-être que ces pores sont disposés à l'interface pâte-granulats, au droit de l'auréole de transition où la porosité peut être plus importante.

## 5 BILAN DU CHAPITRE 5

Après les chapitres 3 et 4 qui se sont focalisés sur l'étude des transferts hydriques pâte du béton–granulats recyclés, et sur l'étude du retrait plastique et de la fissuration qui lui est associée, le chapitre 5 a pour objectif de compiler les résultats obtenus pour proposer des modélisations simplifiées qui permettent de mieux comprendre les phénomènes en jeu et de soulever quelques axes de réflexion.

Cette étude débute par la mesure de la perméabilité des bétons frais à l'aide de deux méthodes différentes. Il apparaît que les deux méthodes donnent des ordres de grandeur de perméabilité comparables. Par ailleurs, il n'y a pas de différence notable des valeurs de perméabilité entre bétons d'une même famille mais à E/L constant, les bétons recyclés semblent présenter une perméabilité plus grande.. Enfin, les perméabilités des bétons de bâtiments sont environ 3 fois plus fortes que celles des bétons de génie civil.

Le suivi des variations volumiques du béton en fonction des variations volumiques de l'eau a permis de mettre en évidence le comportement « ressuant » de certains bétons de bâtiment et de « quantifier » l'eau ressuée en surface. Ces résultats qui sont comparés aux calculs de quantité d'eau évaporée complètent les temps caractéristiques obtenus dans le chapitre 4.

La modélisation du retrait plastique en fonction de la pression capillaire montre que tous les bétons n'ont pas le même réponse en déformations à une même variation de pression capillaire. Les bétons de bâtiment vont manifester entre 1,5 à 2 fois plus de retrait que les bétons de génie civil, à variation de pression capillaire identique. En revanche, à la fissuration, les bétons de génie civil vont atteindre une valeur de pression de près de l'ordre de 200 hPa soit près du double de celle des bétons de bâtiment.

L'étude de l'évolution de la température du béton naturel  $B_{OR}$  soumis au séchage montre qu'il existe un couplage hygrothermique séchage-température du béton. L'évaporation de la vapeur d'eau en surface implique un changement de phase de l'eau liquide ce qui consomme des calories et conduit à un refroidissement du béton. Cet effet thermique pourrait retarder le démarrage de l'hydratation du béton soumis à la dessiccation. Cet effet n'est pas observé lorsque les essais sont réalisés en conditions endogènes.

Enfin, il est démontré que les pores affectés par l'entrée d'air dans le béton, matériau poreux au moment de la fissuration semble correspondre aux plus gros pores de la pâte du béton dont le diamètre a été calculé à l'aide d'un modèle d'empilement aléatoire.

Page laissée intentionnellement blanche.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette recherche s'inscrit dans le contexte scientifique des projets RECYBETON et ECOREB et étudie les bétons recyclés et des bétons naturels de référence de ces projets. Elle se focalise sur l'étude des bétons frais et sur la maîtrise du retrait plastique en conditions de dessiccation sévère.

### 1 CONCLUSIONS

L'exploitation des données expérimentales a permis de comparer le comportement des bétons recyclés à celui des bétons naturels et de mesurer l'impact du degré de pré-saturation des granulats recyclés sur le comportement au jeune âge des bétons recyclés.

L'originalité de la démarche adoptée est liée à l'étude de l'absorption des granulats et des transferts hydriques granulats recyclés-pâte dans le béton. Il en résulte que :

- les gravillons recyclés qui sont initialement partiellement pré-saturés complètent leur absorption dans le malaxeur ce qui modifie le rapport E/C initial et impacte la quantité d'eau efficace dans le béton
- pour des bétons recyclés pauvres en eau, les granulats peuvent se désorber lorsqu'ils sont soumis à un fort séchage par vent de 8m/s. Dans ces conditions d'essais, il semblerait donc possible de mobiliser un potentiel de « cure interne » offert par les granulats recyclés.

La première conséquence de l'absorption des granulats recyclés sur le rapport E/C initial est la modification de l'eau efficace du béton entre l'entrée et la sortie du malaxeur. Cette diminution de la quantité d'eau efficace, influe sur la quantité de pâte ce qui se traduit par une baisse de la rhéologie en fonction du temps, parfois forte comme pour le béton GC<sub>100R0,5A</sub>.

La deuxième conséquence des transferts hydriques granulats-pâte du béton concerne les valeurs de résistance mécanique à 28 jours des bétons recyclés durcis :

- l'absorption des granulats recyclés de certains bétons dont les granulats sont initialement partiellement saturés amène une baisse du rapport E/L conduisant à de meilleures résistances comparativement aux bétons dont les granulats recyclés sont initialement totalement pré-saturés
- à E/L égal, les bétons recyclés présentent des résistances mécaniques plus faibles que les bétons témoins naturels. Ces résultats sont conformes aux dires de la littérature abondante sur le sujet qui met en avant les caractéristiques mécaniques inférieures des granulats recyclés
- dans le cas particulier du béton GC<sub>100R0,5A</sub>, l'association d'un rapport E/L faible et d'un dosage plus important en ciment conduit à obtenir un béton recyclé plus résistant que le béton naturel de référence.

En deuxième lieu, l'étude des déformations des bétons au très jeune âge, consolidation-ressuage et retrait plastique a conduit à des résultats originaux.



En effet, il a été démontré que la quantité d'eau ressuée qui dépend notamment de la perméabilité à l'état frais, (valeur 2 à 3 fois plus grande pour les bétons riches en eau tels que les bétons de bâtiment), peut impacter fortement sur tous les phénomènes à suivre comme l'étude du retrait plastique. Par conséquent, cette eau de ressuage, lorsqu'elle existe, fournit une cure naturelle protectrice des bétons à l'état plastique. Tant que le flux séchant n'a pas consommé cette eau, il n'y a pas de développement de la dépression capillaire au sein du béton et donc pas de manifestation notable du retrait plastique.

On en déduit la chronologie des phénomènes physiques des essais et cela permet l'identification de quelques âges caractéristiques tels que : « fin de consolidation linéaire », « démarrage de la dépression capillaire », « âge d'entrée d'air » et « âge de fissuration ».

Ces résultats ont permis de classer les six bétons testés, 2 naturels et 4 recyclés en deux familles qui diffèrent par la chronologie des déformations du béton. La première famille concerne les bétons de bâtiments, qui ressuent et qui voient les phénomènes de consolidation et de retrait se succéder dans le temps. La deuxième famille est relative aux bétons de génie civil, qui ne ressuent pas et où les phénomènes de consolidation et de retrait sont concomitants.

A E/L constant, la plus grande perméabilité du béton recyclé peut le conduire à ressuier plus que le béton naturel. Le temps d'évaporation de l'eau ressuée justifie un décalage dans le temps de l'apparition de la fissure initiale, exemple du béton recyclé B<sub>100R1,2A</sub>. Si les gravillons recyclés sont totalement pré-saturés, une même variation de pression capillaire induira un retrait plus fort pour le béton recyclé et une ouverture de fissure plus importante.

Lorsque l'eau superficielle est évaporée, les dépressions capillaires se développent plus ou moins vite en fonction des familles de béton pour atteindre une valeur seuil appelée « pression d'entrée d'air ». Elle a été déterminée par l'application de modèles de sols cohésifs et par la construction des courbes caractéristiques des bétons. Les valeurs obtenues sont de l'ordre de 100 à 120 hPa pour les bétons de bâtiment et de 150 à 220 hPa pour les bétons de génie civil. Pour les six bétons étudiés, il a été mis en lumière que l'initiation de la fissuration se corrélait bien, en âge comme en valeur de pression, à l'entrée d'air dans le réseau poreux.

L'effet principal et visible du développement des dépressions capillaires est le retrait plastique. Pour une même variation de dépression capillaire, premièrement, les bétons recyclés manifestent un retrait plus grand que les bétons naturels de référence, deuxièmement les bétons de bâtiments présentent un retrait plus important que les bétons de génie civil. Il n'y a pas de valeur seuil « universelle » de déformabilité ou de retrait au-delà de laquelle la fissuration intervient quel que soit le béton étudié. En revanche, au moment de la fissuration, les valeurs de pression capillaire sont proches de la pression d'entrée d'air, valeur seuil de l'ordre de 100 à 200 hPa en fonction des bétons. Enfin, l'ouverture de fissure suit approximativement la valeur de retrait plastique mesurée à l'âge correspondant.

La corrélation entre la taille des pores calculée par la loi de Laplace à la fissuration et un calcul de distance entre gros grains basé sur le concept de l'EMP proposé par De Larrard semble montrer que les pores impliqués par l'entrée d'air dans le milieu poreux à la fissuration sont les plus gros pores de la pâte du béton.

Les premières modélisations hygrothermique appliquées au béton naturel B<sub>0</sub>R ont confirmé les mesures de températures des bétons en conditions endogènes et de dessiccation. Le changement de phase de l'eau en surface du béton induit par le séchage consommerait des calories qui sont prises au sein du béton ce qui conduirait à un refroidissement de l'échantillon soumis à la dessiccation comparativement à l'échantillon sous conditions endogènes. Cet effet thermique pourrait impacter le démarrage de l'hydratation et amener des conséquences sur le retrait endogène qui se manifesterait lors de la prise.

Quelques résultats de cette recherche pourront intéresser les professionnels de la production de béton et modifier leur pratique. En particulier, les recommandations suivantes peuvent être proposées :

- la maîtrise de l'eau efficace des bétons recyclés de chantier doit passer par une parfaite connaissance de la teneur en eau des gravillons recyclés en entrée de malaxeur. En centrale, il faudra probablement traiter les gravillons recyclés comme les sables et prévoir un contrôle continu de la teneur en eau pour une bonne maîtrise de l'eau efficace.
- en conditions réelles, les temps de malaxage usuellement prévus en centrale, de l'ordre de 60 s et les quantités en jeu lors d'une gâchée, environ 1 m<sup>3</sup>, peuvent amener des effets d'échelles en comparaison des essais de laboratoire. Il faudra donc vérifier, que les conclusions de cette étude relatives à l'absorption des gravillons recyclés dans le béton et dans le malaxeur en particulier, sont bien transposables.
- les conditions de fabrication des bétons recyclés sur chantier seront à mettre au point finement pour être certains d'avoir des bétons dont les granulats sont stables vis-à-vis des transferts hydriques. Le rapport E/L doit être maîtrisé car il influe sur l'ouvrabilité qui fondamentale pour la mise en œuvre des bétons dans les coffrages, et il impacte les résistances mécaniques à 28 jours qui engagent la responsabilité de l'entreprise de travaux et de son fournisseur de béton
- lorsque les bétons recyclés (ou non d'ailleurs) sont mis en œuvre dans des conditions environnementales difficiles ils sont soumis à une forte dessiccation. C'est le cas de dallages, de planchers de bâtiments ou bien de dalles d'ouvrages d'art soumis au vent et au rayonnement solaire. La corrélation pression d'entrée d'air-mesures in situ comme le propose Slowik pourrait donner un fondement clair au besoin de cure. Ce travail peut donc aider à déterminer plus finement les besoins et les conditions de cures pour maîtriser la fissuration de retrait plastique dans des situations environnementales défavorables pour les bétons recyclés de chantier.

## 2 BESOINS EN RECHERCHE ET PERSPECTIVES

L'étude proposée dans ce rapport pourrait être améliorée pour aller plus loin dans l'exploitation des résultats obtenus :

- premièrement, il est souhaitable de travailler sur des formulations de bétons recyclés mais aussi naturels dont l'ouvrabilité soit plus stable dans le temps et qui soient conformes à la norme EN 206-1 sur ce sujet

- deuxièmement, il serait intéressant de réaliser les mêmes essais avec E/L constant, c'est-à-dire avec correction de l'eau d'ajout pour vérifier comment se comporteraient ces bétons recyclés en comparaison de bétons dont les gravillons sont totalement initialement saturés.
- troisièmement, l'étude est à compléter par un travail similaire relatif à des bétons intégrant aussi des sables recyclés, peut-être à hauteur d'un taux de substitution de l'ordre de 30 %, en complément de gravillons recyclés dont le taux de substitution serait suffisamment fort et peut être proche de 50 à 60 %
- quatrièmement, l'étude de la fissuration a utilisé des caméras HD qui ont permis l'automatisation des mesures. En revanche, le post-traitement des clichés et photos est resté manuel. Il est possible d'aller plus loin en mettant au point un protocole de traitement d'images plus performant. L'utilisation de la corrélation d'images pourrait donner accès aux champs de déplacements en surface des échantillons.
- cinquièmement, la prédiction de la fissuration (et de l'entrée d'air) à partir de certains critères de formulation est à pousser en avant. Il serait intéressant de vérifier sur d'autres formulations que les pores en jeu lors de l'entrée d'air dans le milieu poreux sont bien les plus gros pores de la pâte du béton. il faudrait également s'intéresser à la finesse du ciment et à son impact dans la formule du modèle d'empilement aléatoire.
- sixièmement il pourrait être intéressant de vérifier si le réservoir d'eau que représentent les granulats recyclés peut être mobilisé à plus long terme comme source de « cure interne » dans l'auto-dessiccation des bétons durcis à faible E/C

Les mesures de perméabilité du béton à l'état frais ont été réalisées par deux méthodes différentes : par mesure directe au perméamètre à charge fixe et par calcul à l'aide de la loi de Darcy à partir du gradient de pression mesuré. En premier lieu, il serait souhaitable de tester la robustesse des mesures vis-à-vis du gradient. En deuxième lieu, il serait intéressant de construire un modèle numérique qui exploite la loi de Darcy dans le matériau et qui peut être calé grâce aux mesures faites. Le but serait de prévoir la quantité d'eau ressuée disponible en surface, eau qui va offrir une cure naturelle au béton et décaler d'autant le démarrage des dépressions capillaires.

L'étude du béton frais comme un matériau poreux peut servir de base pour des essais expérimentaux sur la cure des bétons recyclés. Cette campagne pourrait associer essais de laboratoires complémentaires, et ouvrages expérimentaux instrumentés dans des conditions proches des conditions du chantier. La détermination de la pression d'entrée d'air expérimentalement et par le biais de modèles numériques hygrothermiques à construire peut être corrélé à des mesures in situ comme le propose Slowik. La cure peut alors être déclenchée lorsque les dépressions capillaires atteignent un seuil proche de la pression d'entrée d'air moyennant le coefficient de sécurité adaptée.

L'étude du couplage séchage-température du béton est à poursuivre sur les bétons recyclés. Le logiciel utilisé, WUFI, qui est adapté à l'étude des parois de bâtiment, permet de prendre en compte des pluies (cure à l'eau) un ensoleillement mais pas de vent convectif. Il faut peut-être envisager un travail complémentaire sur le logiciel Comsol qui peut, à priori et à vérifier, prendre en compte un séchage convectif. Ce travail de modélisation serait à corrélérer avec des essais de laboratoires complémentaires et des essais in situ, tels que développés ci-dessus.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Abdo, J. 2012. Ciments. Techniques de l'ingénieur. 0-17 p.
- ACI 308R01, committee 308. 2001. Guide to Curing Concrete. American-Concrete-Institute. 1-31 p.
- ACI305R-91. 1999. ACI Manual on concrete practice part 2 "Construction practices and inspection pavements." American-Concrete-Institute.
- ACI555R-01. 2001. Removal and reuse of hardened Concrete. American-Concrete-Institute.
- Acker, P, Torrenti, J-M, Guérinet, M. 2008. La maîtrise de la fissuration au jeune âge : condition de durabilité des ouvrages en béton, ENPC. 29 p.
- Acker, P, Ulm, F-J. 2001. Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements. Nucl. Eng. Des. 203: 143–158.
- Alaejos, P, Sanchez, M, Dapena, E, Vazquez, E, AL, E. 2004. Spanish regulations for the use of RCA in the production on structural concrete. In: RILEM, Conf on the Use of Recycled materials in building and Structures., p 0–15.
- Amziane, S. 2005. Contribution à l'étude des matériaux cimentaires à l'état frais. Mémoire de HDR.
- Amziane, S. 2006. Setting time determination of cementitious materials based on measurements of the hydraulic pressure variations. Cem. Concr. Res. 36: 295–304.
- Aregba, W, Jomaa, W, Puiggali, J. 1990. Une approche du séchage de matériaux fortement déformables. Rev. Phys. appliquée 25: 1161–1175.
- ASTM C1579. 2006. Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete. ASTM, editor.
- Barcelo, L. 2001. Influence de la caractéristique des ciments sur la structuration et le comportement dimensionnel des matériaux cimentaires au jeune âge. Thèse de Doctorat.
- Barcelo, L, Boivin, S, Acker, P, Toupin, J, Clavaud, B. 2011. Early age shrinkage of concrete back to physical mechanisms. Concr. Sci. Eng. 3: 85–91.
- Barluenga, G, Hernández-Olivares, F. 2007. Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC. Cem. Concr. Res. 37: 1624–1638.
- Baroghel-Bouny, V. 1994. Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyse, interprétations. Thèse de Doctorat.
- Baroghel-Bouny, V, Mainguy, M, Lassabatere, T, Coussy, O. 1999. Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials. Cem. Concr. Res. 29: 1225–1238.
- Belhamri, L, Remache, A. 2008. Modélisation du séchage par convection. Rev. des Energies Renouvelables CISM-08: 289–297.

- Belin, P, Habert, G, Thiery, M, Roussel, N. 2013. Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates. *Mater. Struct.* 47: 1451–1465.
- Bello, L. 2014. Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons légers autoplaçants durables. Thèse de Doctorat.
- Bendimerad, A, Roziere, E, Loukili, A. 2015. Combined experimental methods to assess absorption kinetics of natural and recycled aggregates. *Mater. Struct.* 48: 3557–3569.
- Bentz, DP. 2007. Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement pastes. *Mater. Struct.* 40: 1073–1080.
- Bernier, G. 2004. Formulation des bétons. *Techniques de l'ingénieur.* 28 p.
- Bernier, G. 2006. Pression interstitielle dans les bétons frais. In: AUGC 2006. La grande Motte.
- Berredjem, L, Arabi, N. 2009. Les matériaux de démolition une source de granulats pour béton: formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recyclés. In: 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET. Oran (Algérie), p 255–262.
- Bisschop, J. 2002. Early Age Cracking in Cementitious Systems,. *Evol. solid Behav. Rilem Publ:* 27–36.
- Boshoff, WP, Combrinck, R. 2013. Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete. *Cem. Concr. Res.* 48: 34–39.
- Bouasker, M, Mounanga, P, Khelidj, A, Coué, R. 2008. Déformations endogènes de pâtes de ciment au très jeune âge. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 12: 347–365.
- Bravo, M, de Brito, J, Pontes, J, Evangelista, L. 2015. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Constr. Build. Mater.* 77: 357–369.
- Bresson, A. 2006. Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge. Thèse de doctorat.
- Bruto, J, Alves, F. 2010. Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. *Mater. Struct.* 43: 35–51.
- Bullard, JW, Jennings, HM, Livingston, R a., Nonat, A, Scherer, GW, Schweitzer, JS, Scrivener, KL, Thomas, JJ. 2011. Mechanisms of cement hydration. *Cem. Concr. Res.* 41: 1208–1223.
- Butler, LJ, West, JS, Tighe, SL. 2014. Towards the classification of recycled concrete aggregates: influence of fundamental aggregate properties on recycled concrete performance. *J. Sustain. Cem. Mater.* 3: 140–163.
- Cabrera, J., Cusens, A., Brookes-Wang, Y. 1992. Effect of superplasticizers on the plastic shrinkage of concrete. *Mag. Concr. Res.* 44: 149–155.
- Cáceres Salazar, EG. 2006. Modélisation du séchage d'un milieu poreux saturé déformable : prise en compte de la pression du liquide. Thèse de doctorat.
- Castro, J, Keiser, L, Golias, M, Weiss, J. 2011. Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures. *Cem. Concr. Compos.* 33: 1001–1008.

- Chakradhara Rao, M, Bhattacharyya, SK, Barai, S V. 2010. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Mater. Struct.* 44: 205–220.
- Charonnat, Y. 2012. Fabrication du béton hydraulique. *Techniques de l'ingénieur*. 39 p.
- Chemkhi, S. 2008. Séchage d'un milieu déformable non saturé : modélisation du couplage hygromécanique. Thèse de doctorat.
- Corinaldesi, V, Moriconi, G. 2010. Recycling of rubble from building demolition for low-shrinkage concretes. *Waste Manag.* 30: 655–9.
- Cortas, R. 2012. Nouvelle approche expérimentale pour la maîtrise de la fissuration du béton jeune : influence de la nature et de la saturation des granulats. Thèse de doctorat.
- Cortas, R, Rozière, E, Loukili, A. 2010. Effet du taux de saturation des granulats sur le retrait du béton. In: AUGC, editor. XXVIII eme rencontres universitaires de Génie Civil. La Bourboule, p 642–651.
- Cortas, R, Rozière, E, Staquet, S, Hamami, a., Loukili, a., Delplancke-Ogletree, M-P. 2014. Effect of the water saturation of aggregates on the shrinkage induced cracking risk of concrete at early age. *Cem. Concr. Compos.* 50: 1–9.
- Cudeville, A. 2011. Recycler le béton. *Pour-la-science* 408: 17–18.
- Cusson, D, Hoogeveen, T. 2006. Preventing autogeneous shrinkage of high-performance concrete structures by internal curing. In: S.P. Shah Symposium on measuring Monitoring and Modeling Concrete Properties. Alexandroupolis, Greece, p 1–8.
- Daïan, JF. 2012. Equilibre et transferts en milieux poreux. 464 p.
- DAO, D-T. 2012. (Multi-) recyclage du béton hydraulique. Thèse de doctorat.
- De-Larrard François. 1999. Structures granulaires et formulation des bétons. LCPC. 411 p.
- De-la-Varga, I, Castro, J, Bentz, D, Weiss, J. 2012. Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash. *Cem. Concr. Compos.* 34: 1001–1008.
- Devillers, P, El Youssoufi, S. 2009. Comportement hydromécanique de sols non saturés : identification du coefficient de Biot. *Hermès-Lavoisier J. X*: 1–13.
- Djerbi Tegguer, a. 2012. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Constr. Build. Mater.* 27: 112–116.
- Domingo, a., Lázaro, C, Gayarre, FL, Serrano, M a., López-Colina, C. 2009. Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. *Mater. Struct.* 43: 1147–1160.
- Douara, T., Benhoua, M, Nezergui, B. 2009. Caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels. In: 1st international Conference on sustainable Built environment Infrastructures in Developing countries., p 289–294.
- Dysli, M. 1997. Cours de mécanique des sols. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 79 p.
- Ettxeberria larranaga, M. 2004. Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete. Thèse de doctorat.

- Etxeberria, M, Vázquez, E, Mari, a., Barra, M. 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* 37: 735–742.
- European Commission DG ENV. 2011. Service contract on management of construction and demolition waste - SR1 - Final report task 2. 232 p.
- Festa, J, Dreux, G. 2007. Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8 eme édit. Eyrolles. 411 p.
- Fredlund, DG, Xing, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.* 31: 521–532.
- Fujiwara, T. 2008. Effect of Aggregate on Drying Shrinkage of Concrete. *J. Adv. Concr. Technol.* 6: 31–44.
- Garcia Boivin, S. 1999. Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène. Thèse de doctorat.
- Golias, M, Castro, J, Weiss, J. 2012. The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing. *Constr. Build. Mater.* 35: 52–62.
- Goyeneche, M. 2001. Etude du transport d'humidité par écoulement de film lors du séchage d'un milieu capillaro-poreux. Thèse de doctorat.
- Haejin, K. 2009. Crushed returned concrete aggregate in new concrete : characterization, performance, modeling, specification and application. Thèse de doctorat.
- Hafid, H. 2012. Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles. Thèse de doctorat.
- Hammer, TA. 2007. Deformations , strain capacity and cracking of concrete in plastic and early hardening phases. Thesis for the degree doctor philosophiae.
- Hansen, TC. 1992. Recycling of demolished Concrete and Masonry. 159 p.
- Hansen, TC, Boegh, E. 1985. Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete. *ACI J.* 09-10: 648–652.
- Hasaba, S, Mitsunori, K, Kazuyuki, T, Kunio, T. 1981. Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregates. *Japan Concr. Inst.* 3: 55–60.
- Henkensiefken, R, Bentz, D, Nantung, T, Weiss, J. 2009. Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions. *Cem. Concr. Compos.* 31: 427–437.
- Holt, E, Leivo, M. 2004. Cracking risks associated with early age shrinkage. *Cem. Concr. Compos.* 26: 521–530.
- Holt, EE. 2001. Early age autogenous shrinkage of concrete. 197 p.
- Horai, K, Simmons, G. 1969. Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Earth Planet. Sci. Lett.* 6: 359–368.
- El Houssain, R, Picandet, V, Amziane, S. 2007. Perméabilité des pâtes de ciment à l' état frais. In: 25 eme rencontres de l'AUGC. Bordeaux, p 23–25.
- Hu, C. 2010. Rhéologie des bétons fluides. Thèse de doctorat.

- IREX. 2002. Résultats et recommandations du projet national Calibé.
- J.Estefane de Iliveira, M, Silveira de Assis, C, Tavares de Mattos, J. 2004. Recycled aggregate standardization in brazil. In: RILEM Conf on the Use of Recycled materials in building and Structures.
- Jensen, O, Hansen, P. 2001a. Water-entrained cement-based materials. I. Principles and theoretical background. *Cem. Concr. Res.* 31: 647–654.
- Jensen, OM, Hansen, PF. 2001b. Autogenous deformation and RH-change in perspective. *Cem. Concr. Res.* 31: 1859–1865.
- Josserand, L. 2002. Ressuage des bétons hydrauliques. Thèse de doctorat.
- Josserand, L, Coussy, O, de Larrard, F. 2006. Bleeding of concrete as an ageing consolidation process. *Cem. Concr. Res.* 36: 1603–1608.
- Josserand, L, Ildefonse, J-P, de Larrard, F. 2002. Perméabilité à l'eau des suspensions granulaires. Application au ressuage du béton frais. *Bull. des Lab. des Ponts Chaussées* 4463: 61–70.
- Kohno, K, Okamoto, T, Isikawa, Y, Sibata, T, Mori, H. 1999. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete. *Cem. Concr. Res.* 29: 611–614.
- Korre, A, Durucan, S. 2009. Life Cycle Assessment of Aggregates. London. 36 p.
- Kou, S. 2006. Reusing recycled aggregates in structural concrete. Thèse de doctorat.
- Kou, S, Poon, C, Etxeberria, M. 2011. Cement & Concrete Composites Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cem. Concr. Compos.* 33: 286–291.
- Kovler, K, Roussel, N. 2011. Properties of fresh and hardened concrete. *Cem. Concr. Res.* 41: 775–792.
- Kronlof, A, Leivo, M, Pekka, S. 1995. Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and craking of fresh mortar. *Cem. Concr. Res.* 25: 1747–1754.
- Künzel, HM. 1995. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and two-dimensional calculation using simple parameters . 1-65 p.
- Lalesev, M, Radonjanin, V, Marinkovic, S. 2010. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability* 2: 1204–1225.
- Laneyrie, C, Beaucour, A, Noumowé, A. 2014. Evaluation des méthodes de caractérisation des granulats naturels appliquées aux recyclés: mesures de masses volumiques et d'absorption d'eau. 18 p.
- Laplante, P, Boulay, C. 1994. Evolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tous premiers âges. *Mater. Struct.* 27: 596–605.
- Laurindo, J., Prat, M. 1995. Numerical and experimental network study of evaporation in capillary porous media : drying rates. *Chem. Eng. Sci.* 25: 2257–2269.
- LE, T. 2015. Absorption des granulats recyclés. Thèse de doctorat.
- Leemann, A, Nygaard, P, Lura, P. 2014. Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete. *Cem. Concr. Compos.* 46: 1–7.



- Leonard, A. 2002. Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration. Thèse de doctorat.
- Li, X. 2008. Recycling and reuse of waste concrete in China. *Resour. Conserv. Recycl.* 53: 36–44.
- Lothenbach, B, Le Saout, G, Gallucci, E, Scrivener, K. 2008. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cem. Concr. Res.* 38: 848–860.
- Loukili, A, Chopin, D, Khelidj, A, Touzo, J Le. 2000. A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history. *Cem. Concr. Res.* 30: 915–922.
- M.Aissoun, B. 2011. Étude de l'influence des caractéristiques des granulats sur la performance des bétons fluides à rhéologie adaptée. Thèse de doctorat.
- Malešev, M, Radonjanin, V, Marinković, S. 2010. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability* 2: 1204–1225.
- Mbemba, E. 2010. Influence du vent et de la cure sur le comportement des bétons au très jeune âge. Thèse de doctorat.
- Mbemba, E, Devillers, P, Buisson, C, Ahmed, L. 2013. Influence of mix design parameters and drying conditions on cracking. 1–15.
- Mefteh, H, Kebaïli, O, Oucief, H, Berredjem, L, Arabi, N. 2013. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *J. Clean. Prod.* 54: 282–288.
- Monge, J. 2007. Fissuration des Mortiers en Couches Minces - Effets de l'Hydratation, du Séchage et de la Carbonatation. Thèse de doctorat.
- Mukai, T, Koizumi, H. 1979. Study on reuse of waste concrete for aggregate of concrete. In: *Energy and Resources Conservation in Concrete Technology, Japan–US Co-operative Science Programme*, San Francisco., p 12.
- Nam, V, Cassagnabère, F, Mouret, M. 2014. Evolution de la rhéologie du béton frais en fonction du pourcentage et de l'état de pré-saturation des granulats recyclés, et en fonction du malaxage Thème 2. Toulouse. 42 p.
- Neville, AM. 2000. Propriétés des bétons, 1ere. Eyrolles, E, editor. 824 p.
- Newlands, MD, Paine, KA, Dhir, RK, Vemuri, NA. 2008. effect of new generations of concrete on early-age shrinkage. Dundee. 84 p.
- NF EN 1097-6. NF EN 1097-6 Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau. AFNOR, editor.
- NF EN 12350-2. NF EN 12350-2 Essais pour béton frais Partie 2 : Essai d'affaissement. AFNOR, editor.
- NF EN 12350-6. NF EN 12350-6 Essais pour béton frais - Partie 6 : masse volumique. AFNOR, editor.
- NF EN 12350-7. NF EN 12350-7 Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité. AFNOR, editor.

- NF EN 12620+A1. 2008. NF EN 12620+A1 Granulats pour béton. AFNOR, editor.
- NF EN 193-3. NF EN 193-3 Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité. AFNOR, editor.
- NF EN 1997-1:2001. NF EN 1997 : 2011 ciment – partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. AFNOR, editor.
- NF EN 206/CN. NF EN 206/CN Béton - Spécification ,performance, production et conformité. AFNOR, editor.
- NF EN 933-11. NF EN 933-11 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 11 : Essai de classification des granulats recyclés. AFNOR, editor.
- NF EN12390-3. NF EN 12390-3 Essais pour béton durci Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes. AFNOR, editor.
- NF P 18-404. NF P 18-404 Bétons Essais d'étude, de convenance et de contrôle Confection et conservation des éprouvettes. AFNOR, editor.
- NF P 18-454. NF P 18-545 Granulats - Eléments de définition, conformité et codification. AFNOR, editor.
- Nguyen, TD. 2013. Etude de la zone d'interphase "granulats calcaires poreux-pâte de ciment" : influence des propriétés physico-mécaniques des granulats; conséquences sur les propriétés mécaniques du mortier. Thèse de doctorat.
- Nguyen, TD, Le Saoût, G, Devillers, P, Garcia-diaz, É. 2014. The effect of limestone aggregate porosity and saturation degree on the interfacial zone. 1–13.
- Nonat, A. 2008. L'hydratation des ciments. ENPC. 25 p.
- Ollivier, J-P, Torrenti, J-M. 2008. La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert. ENPC. 133 p.
- Otsuki, N, ASCE, M, Miyazato, S, Yodsudjai, W. 2003. influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. J. Mater. Civ. Eng. 15: 443–451.
- Pepe, M. 2014. A conceptual model to design recycled aggregate concrete for structural applications1; thèse de doctorat.
- Peron, H, Hueckel, T, Laloui, L, Hu, LB. 2009. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification. Can. Geotech. J. 46: 1177–1201.
- Pertué, A. 2008. Etude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune âges. Thèse de doctorat.
- Picandet, V, Rangeard, D, Perrot, A, Lecompte, T. 2011. Permeability measurement of fresh cement paste. Cem. Concr. Res. 41: 330–338.
- PN RECYBETON. 2011. RECYclage complet des BETONs. 54 p.
- Pons, G, Torrenti, J-M. 2008. Retrait et fluage. In: L'ENPC, P de, editor. La durabilité des bétons, ENPC., p 46.
- Poon, C-S, Chan, D. 2006. The use of recycled aggregate in Hong Kong. Resour. Conserv. Recycl. 50: 293–305.

- Poon, CS, Kou, SC, Lam, L. 2006. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Mater. Struct.* 40: 981–988.
- Poon, CS, Shui, ZH, Lam, L, Fok, H, Kou, SC. 2004. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cem. Concr. Res.* 34: 31–36.
- Powers, T. 1968. Physical structure of paste. J.Wiley. 392-416 p.
- Powers, T., Bromnyard, T. 1946. Studies of the physical Properties of Hardened portland Cement Paste. *J. Proc.* 43: 101–132.
- Powers, T., Copeland, L., Mann, H. 1959. Capillary Continuity or discontinuity in cement pastes. *J. PCA Res. Dev. Laboratories* 1,2: 38–48.
- Qiao, P, Chen, F. 2012. Enhanced performance of recycled aggregate concrete with atomic polymer technology. Thèse de doctorat.
- Quebaud, M. 1996. Caractérisation des granulats recyclés. Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats. Thèse de doctorat.
- Radocea, A. 1994. A model of plastic shrinkage. *Mag. Concr. Res.* 46: 125–132.
- Radocea, A. 1991. A new method for studying bleeding of cement paste. *Chalmers Tek. Hogsk.* 5: 15.
- Radocea, A. 1992. A study on the mechanism of plastic shrinkage of cement-based materials. Thèse de doctorat.
- Radocea, A. 1990. Water pressure in fresh and young cement paste. *Nord. Concr. Res.* 9: 145–159.
- Rafaï, N. 2008. Les composants de la matrice cimentaire (rappels et interactions) cement matrix compounds (reminders and interactions). *Ciments, Plâtres* 890: 60–66.
- Roussel, N, Coussot, P. 2006. Ecoulements d'affaissement et d'étalement. *Rev. Eur. Génie Civ.* 10: 25–44.
- Roziere, E, Cortas, R, Loukili, A. 2015. Cement & Concrete Composites Tensile behaviour of early age concrete : New methods of investigation. *Cem. Concr. Compos.* 55: 153–161.
- Ryu, J. 2002. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. *Mag. Concr. Res.* 54: 7–12.
- Salager, S. 2006. Influence de la température sur le comportement hydrique de milieux poreux partiellement saturés. XXIV rencontres Univ. Génie Civ.: 8.
- Salgues, M. 2013. Modélisation des effets structuraux des réactions sulfatiques internes : application aux barrages en béton. Thèse de doctorat.
- Sanchez de Juan, M, Alaejos Gutierrez, P. 2004. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. In: RILEM Conf on the Use of Recycled materials in building and Structures., p 0–9.
- Sanchez de Juan, M, Alaejos Gutiérrez, P. 2004. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. In: RILEM Conf on the Use of Recycled materials in building and Structures., p 0–9.

- Sánchez de Juan, M, Alaejos Gutiérrez, P. 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* 23: 872–877.
- Sarkis, M, Arnaud, M, Escadeillas, G. 2002. Coefficient de dilatation thermique d'un mortier frais. 3: 415–420.
- Scherer, GW. 1990. Theory of Drying. *J. Am. Ceram. Soc.* 73: 3–14.
- Sedran, T. 2013. Mise au point des formules de béton de référence. 35 p.
- Silva, RV, de Brito, J, Dhir, RK. 2015. Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* 77: 327–339.
- Sivakumar, a., Santhanam, M. 2007. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. *Cem. Concr. Compos.* 29: 575–581.
- Slowik, V, Hübner, T, Schmidt, M, Villmann, B. 2009. Simulation of capillary shrinkage cracking in cement-like materials. *Cem. Concr. Compos.* 31: 461–469.
- Slowik, V, Ju, JW. 2011. Discrete modeling of plastic cement paste subjected to drying. *Cem. Concr. Compos.* 33: 925–935.
- Slowik, V, Schmidt, M, Fritzsche, R. 2008. Cement & Concrete Composites Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. 30: 557–565.
- Soroushian, P, Ravanbakhsh, S. 1998. control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibers. *ACI Mater. J.* July - Aug: 429–435.
- Stefan, L. 2009. Étude expérimentale et modélisation de l'évolution des propriétés mécaniques au jeune âge dans les matériaux cimentaires. Thèse de doctorat.
- Tam, VWY, Gao, XF, Tam, CM. 2005. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cem. Concr. Res.* 35: 1195–1203.
- Taylor, HF. 1997. *Cement Chemistry*, Second edition, 2eme édit. Press, A, editor. Ltd, Thomas Telford. 475 p.
- Tegguer, AD, Nguyen, TD. 2011. Effet des granulats recyclés sur le retrait endogène des mortiers au très jeune âge. In: XXIX Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011., p 381–390.
- Toma, G. 1999. Comportement des bétons au jeune âge.
- Torrenti, JM. 2012. Du béton frais au béton durci. *Techniques de l'ingénieur.* 15 p.
- Turcry, P. 2004. Retrait et fissuration des bétons autoplaçants. Influence de la formulation. Thèse de doctorat.
- Turcry, P, Loukili, A. 2006. evaluation of plastic shrinkage cracking of Self-Consolidating Concrete. *ACI Mater. J.* 103-M30: 272–279.
- Uno, PJ. 1998. Plastic shrinkage Cracking and Evaporation Formulas. *ACI Mater. J.* 95: 365–375.
- Wittmann, F. 1976. On the action of capillary pressure in fresh concrete. *Cem. Concr. Res.* 6: 49–56.



- Xiao, J, Li, W, Fan, Y, Huang, X. 2012. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). *Constr. Build. Mater.* 31: 364–383.
- Yamine, J. 2007. Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations , propriétés rhéologiques , physico-chimie et propriétés mécaniques. Thèse de doctorat.
- Yang, K-H, Chung, H-S, F.Ashour, A. 2008. Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Mater. J.* 05-06: 289–296.
- Yang, K-H, Kim, Y-S. 2005. An Evaluation of Slump Loss for Elapsed Time and Mechanical Behavior of the Recycled aggregate Concrete Mixed with Blast-Furnace Slag. *J. Archit. Inst. Korea* 4: 117–124.
- Yong, PC, Teo, DC. 2009. Utilisation of Recycled Aggregate as Coarse Aggregate in Concrete. *UNIMAS E-Journal Civ. Eng.* 1: 1–6.
- Yrjanson, W. 1989. Recycling of portland cement concrete pavement synthesis of highway practice 154. 54 p.
- Zeitschrift, A, Link, P, Dienst, E, Eth, E. 1968. Fissures de retrait se formant avant la fin de prise. *Bull. du Cim.* 11: 6.
- Zhao, Z. 2014. Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication de mortiers. Thèse de doctorat. 072.
- Zhao, Z, Remond, S, Damidot, D, Xu, W. 2015. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Constr. Build. Mater.* 81: 179–186.
- Zhao, Z, Remond, S, Damidot, D, Xu, W. 2013. Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates. *J. Sustain. Cem. Mater.* 2: 186–203.

## ANNEXES

## ANNEXE 1 : FICHES MATERIAUX


Ciment :

<b>FICHE TECHNIQUE</b>			
<b>Fabriqué à ROCHEFORT</b>			
Mise à jour du 27/02/2012			
<b>Ciment Portland au calcaire</b>			
NF EN 197-1/A1	<b>CEM II/A-L 42,5 N</b>	01/09/2001	
N° de certificat : 0333-CPD-4304			
CE+NF	<b>CEM II/A-L 42,5 N CE CP2 NF</b>	27/01/1997	
NF P15-318	Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint	CP2	
Disponibilités :      Vrac			
<b>COMPOSITION DÉCLARÉE (en %)</b>			
<u>Constituant</u>		<u>Régulateur de prise</u>	
Clinker (K) .....	87	Gypse .....	3,4
Laitier de haut-fourneau (S) .....	-	Anhydrite .....	-
Schiste calciné (T) .....	-	Autre sulfate de calcium .....	-
Sulfate de calcium (Cs) .....	-	<u>Additif</u>	
Pouzzolanes naturelles (P) .....	-	Agent de mouture HEA 252 .....	0,04
Cendres volantes siliceuses (V) .....	-	Sulfate ferreux .....	0,25
Cendres volantes calcaïques (W) .....	-		
Calcaires (L ou LL) .....	11		
Constituants secondaires .....	2		
<b>RESISTANCES A LA COMPRESSION (en MPa)</b>			
1 jour .....	-	2 jours .....	29
		7 jours .....	-
		28 jours .....	53
<b>CARACTÉRISATION PHYSIQUE</b>			
<b>Sur poudre</b>		<b>Sur pâte pure</b>	
<b>Sur mortier</b>			
Masse volumique (en g/cm <sup>3</sup> ) .....	3,09	Besoin en eau (en %) .....	27,9
Surface massique (en cm <sup>2</sup> /g) .....	3700	Stabilité (en mm) .....	1,1
Indice de clarté .....	59,6	Début de prise (en min) .....	150
Chal. hydr. 41h (en J/g) .....			
-			
<b>CARACTÉRISATION CHIMIQUE</b>			
PAF	INS	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>
K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	S <sup>-</sup>	Cl
CO <sub>2</sub>	CaO <sub>lim</sub>	Na <sub>2</sub> O eq actif	
5,1	1,0	18,7	4,9
3,7	62,6	1,3	2,7
0,68	0,17	0,05	0,04
4,7	1,5	0,59	
Composition potentielle du clinker :			
C3A	7,9	C3S	61
C4AF	12		

La reproduction partielle ou intégrale de ce document est interdite sans accord préalable de notre part.  
 Les résultats faisant l'objet du présent document sont basés sur des valeurs moyennes et sont donnés à titre purement  
 indicatif. Étant susceptibles de varier dans les limites autorisées par les normes correspondantes, ils ne sauraient engager  
 la responsabilité de Holcim France ou Holcim Belgique.

**Filler calcaire :**



**Fiche technique**

**Betocarb® HP - OG**

**SITE:** ORGON, France (certifié ISO 9001)

**DESCRIPTION DU PRODUIT:** Addition calcaire sélectionnée pour bétons hydrauliques et filler pour bétons hydrauliques hautes performances (EN 12620).  
Produit particulièrement adapté aux bétons de parement et architectoniques (essai LG\_007).  
Ce produit est de catégorie A selon la norme NF P 18-508.

**COMPOSITION TYPE DE LA ROCHE:**

CaCO <sub>3</sub>	98.8	%
Carbonates totaux	99.1	%
Chlorures	0.001	%
Sulfates	0.001	%
Soufre total	0.005	%
Matières organiques	0.01	%
Essai au bleu de méthylène	0.3	g/kg
Alcalins équivalents	0.005	%
Silice totale	0.1	%
Réactivité aux alcalins	NR	

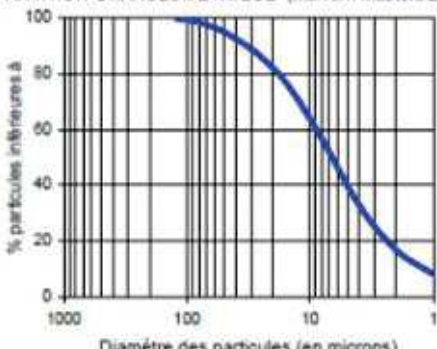
**CARACTERISTIQUES TYPES DU PRODUIT:**

<b>Granulométrie:</b>		
- Particules < 2 mm	100	%
- Particules < 0.125 mm	100	%
- Particules < 0.063 mm	97	%
- Surface spécifique Blaine	462	m <sup>2</sup> /kg
Blancheur CIE L*	95	
Indice d'activité à 28 jours	0.79	
Taux d'humidité départ usine	0.2	%
Densité	2.7	g/ml
Densité apparente tassée	1.5	g/ml

**CARACTERISTIQUES GENERALES DU PRODUIT:**

**APPLICATIONS PRINCIPALES:**  
Béton auto-plaçant  
Béton prêt à l'emploi  
Éléments préfabriqués architectoniques  
Applications spéciales  
- Béton projeté

**REPARTITION GRANULOMETRIQUE (Malvern Mastersizer 2000):**



**CONDITIONNEMENT STANDARD:**

- VRAC
- SAC (papier) de 25 kg sur palette

Les informations contenues dans cette fiche technique ne concernent que le matériel spécifique mentionné et ne concernent pas l'utilisation conjointement avec tout autre matériel ou dans tout procédé. Les informations fournies dans le présent document se basent sur des données techniques qui, à la connaissance de Omya, sont fiables, toutefois Omya ne fournit aucune garantie de complétude ou d'exactitude de ces informations, et Omya n'assume aucune responsabilité résultant de leur utilisation ou vis-à-vis de toutes réclamations, pertes ou dommages subis par une tierce partie. Toute personne recevant ces informations doit exercer son jugement propre en ce qui concerne leur utilisation appropriée et il incombe à l'utilisateur d'évaluer si le matériel convient (y compris en matière de sécurité) pour un usage particulier avant d'en faire usage.

édition : 29.03.2012  
Product information :  
106.03.01\_FR\_CORP/PROG  
032012\_14\_F  
version : 9

**Granulats :****Granulats Nord Est / Champagne Ardennes**

Fiche Technique Produit		Mise à jour du : 03/01/2012	FTP Q2L442 A10 112
Usine de production	Classe granulats	Elaboration	
Givet CE	6.3 / 20 Cal CL - NF	Concassé Lavé	
Norme	Article	Code	
NF P 18545	10 : Bétons hydrauliques	A sauf Soufre en B	
Nature pétrographique			
Calcaire			

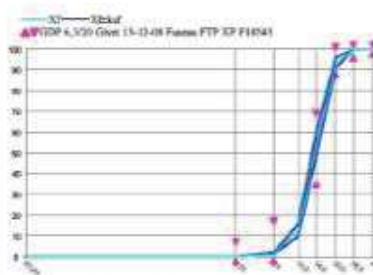
**PARTIE NORMATIVE**

Nom	Symbole	Voi	Voi	u	Voi - u	Voi + u	La	La	e	e / 3,3
20	40 mm	100	100							
1.4D	38 mm	98	100	1	97	100				
D	20 mm	99	99	3	95	100				
D-1.4	14 mm	37	67	6	31	73	25	70	30	9.08
d	6.3 mm	0	15	5	0	20				
d/2	3.15 mm	0	5	1	0	8				
0.063	0.063 mm	0	1.5	0.3						
FI	FI		30	4		34				
LA	LA		30	3		33				
Ab	Ab		2.5	0.3		2.8				
Impuretés prohibées	IP		0.1							
Teneur en soufre tot	S%		1	0.1		1.1				
Boulettes d'argile	Arg		1							
MBf	MBf		10	3		13				
Teneur en fines	F		1.5	0.3		1.8				

**PARTIE INFORMATIVE (k=1.25)**

Du 07/07/2011 au 14/12/2011

Nom	Symbole	Maxi	Xf + ksf	Xf	sf	Xf - ksf	Mini	No val
40	40.0	100.00	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	34
20.0	20.0	100.00	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	34
20.0	20.0	98.00	96.40	93.80	2.80	91.40	88.80	34
14.0	14.0	66.10	60.20	54.60	4.40	49.10	46.60	34
6.3	6.3	3.30	2.40	1.90	0.50	1.30	1.10	34
3.15		0.90	0.60	0.40	0.10	0.30	0.20	34
63 µm	0.063	0.90	0.40	0.30	0.10	0.20	0.10	34
Aplatissement	FI	14.0		10.7			7.8	5
Teneur en eau	w	3.5	3.7	3.0	0.5	0.4	0.3	34
Teneur en fines	f	0.61	0.41	0.29	0.09	0.17	0.14	34



Date	Nom de l'essai	Norme essai	Symbole	Valeur
25/01/11	Abs d'eau (%)	NF EN 1097-6 articles 7	WA24	0.57
05/04/11	Alcalins solubles (%)	LPC n°37	Na2O eq	0.0012
21/11/11	Aplatissement (%)	NF EN 933-3	FI	10.9
04/10/11	Boulettes d'Argile (%)	XP P 18-545 10-1-6	BA	0.01
04/04/11	Chlorure total (pot) (%)	NF EN 1744-1 art 8	C	0.0340
04/10/11	Impuretés prohibées (%)	XP P 18545 3-42	IP	0.01
05/10/11	LA-MDE (%)	PIB 545 9 1	%	40
05/10/11	Los Angeles (°)	NF EN 1097-3 article 5	LA	21
04/04/11	Matière toxique	NF EN 1744-1 art 15.1	Couleur	0.024
05/10/11	Micra-Dreval (°)	NF EN 1097-1	MDE	19
25/01/11	MV absolue 0.63 - µ s (trms)	NF EN 1097-6 articles 7	MVA (Absol)	2.74
31/03/11	MV réelle - µ s (trms)	NF EN 1097-6 articles 7	pod	0.00
25/01/11	MV réelle saturé 0.63 - µ s	NF EN 1097-6 articles 8	MV5	2.71
04/04/11	Qualification Alcali	FD PIB-543		NR
04/04/11	Soufre total (%)	NF EN 1744-1 article 11	S	0.590

	Éditée par : Granulats Nord Est / Champagne Ardennes - Aux trois Fontaines - 08600 - Givet	Tél : 03.24.42.85.48 Fax : 03.24.42.85.50
--	--	--





## Granulats Nord Est / Champagne Ardennes

Annexe des caractéristiques de la  
Fiche Technique ProduitMise à jour du : 03/01/2012  
FTP Q2L442 A10 112

Unité de production	Classe granulats	Elaboration
Givet CE	6.3 / 20 Cal CL - NF	Concassé Lavé
Norme	Article	Code
NF P 18545	10 : Bétons hydrauliques	A sauf Soufre en B

COMPTAGE PETROGRAPHIQUE					Date pétrographie 11/03/2010	
SIE	QUARTZ	CALCAIRE	GRANITOÏDE	GRES	AUTRE	
1	0	98.1	1	0	0.5	

CHIMIE											Date chimie 04/04/2011	
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Perte au f	
6.98	1.77	0.88	46.57	3.47		0.07	0.47	0.10	0.03	< L.D.	39.19	

Détail: Analyse granulométrique								Du 07/07/2011 au 14/12/2011	
	63 µm	3.15	6.3	10.0	14.0	20.0	28.0	40	
Maximum	0.60	0.90	3.30	21.70	66.10	98.00	100.00	100.00	
NF - k cf	0.40	0.60	2.40	15.30	60.20	96.40	100.00	100.00	
cf	0.10	0.10	0.50	2.40	4.40	2.00	0.00	0.00	
NF	0.30	0.40	1.90	13.30	54.60	93.90	100.00	100.00	
NF - k cf	0.20	0.30	1.30	10.20	49.10	91.40	100.00	100.00	
Minimum	0.10	0.20	1.10	10.30	46.60	88.80	100.00	100.00	

Observations  
Organisme certificateur : AFNOR Certification  
11 rue Francis Pressensé  
F-93571 La Plaine Saint Denis Cedex

	Éditée par : Granulats Nord Est / Champagne Ardennes - Aux trois Fontaines - 08600 - Givet	Tél : 03.24.42.85.46 Fax : 03.24.42.85.50
--	--	--



## Granulats Nord Est / Champagne Ardennes

## Fiche Technique Produit

Mise à jour du : 03/01/2012

FTP Q2L270 A10 112

Usine de production	Classe granulière	Elaboration
Givet CE	4 / 10 Cal CL - NF -	Concassé Lavé
Noms	Article	Code
P 18-545	10 : Bétons Hydrauliques	A sauf Soufre et Aplatissement en B
Nature pétrographique		
Calcaire		

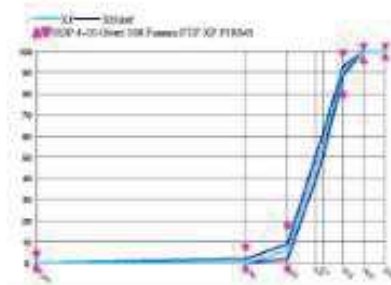
## PARTIE NORMATIVE

Noms	Symbole	Vu	Vu	u	Vu - u	Vu + u	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	s	s / 3,3
2D	20 mm	100	100							
14D	14 mm	98	100	1	97	100				
D	10 mm	94	99	5	77	100	80	99	15	
4	4 mm	0	15	5	0	30	0	20	15	
4/2	2 mm	0	5	1	0	6				
Fines	0.063 mm		1,3	0,3		1,3				
Aplatissement	A		35	4		39				
Absorption	Ah		2,5	0,5		3				
Los Angeles	LA		30	3		33				
Cal	F		2							
Soufre	S		1	0,1		1,1				
Sulfates	AS		0,2	0,15		0,35				

## PARTIE INFORMATIVE (k=1,25)

Du 07/07/2011 au 14/12/2011

Noms	Symbole	Mini	XF+ Inf	XF	cf	XF - Inf	Mini	3σ val
20.0	2D	100.00	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	19
14.0	14D	100.00	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	19
10.0	D	94.40	93.30	91.30	1.70	88.20	88.00	19
4.00	4	13.80	9.30	6.00	2.60	2.80	3.40	19
2.00	4/2	4.80	3.10	0.80	1.00	0.00	0.30	19
63 µm	0.063	0.70	0.60	0.40	0.10	0.20	0.10	19
Aplatissement	FI	16.3		16.1			13.3	7
Teneur en eau	w	3.6	3.2	1.9	1.9	0.6	0.4	19
Teneur en fines	f	0.72	0.56	0.37	0.15	0.19	0.10	19



Date	Noms de l'essai	Norme essai	Symbole	Valeur
24/01/11	Abs d'eau (%)	NF EN 1097-6 article 7	WA24	0,67
04/04/11	Alcalins volatiles (%)	LPC n°37	Na2O eq	0,0012
14/12/11	Aplatissement (%)	NF EN 933-3	FI	16,7
18/09/11	Boulettes d'Argile (%)	XP P 18-545 10-1-6	BA	0,01
04/04/11	Chlorure d'eau (ppm) (%)	NF EN 1744-1 art 8	C	0,0240
18/09/11	Impuretés prohibées (%)	XP P 18-545 1-42	Imp	0,01
03/10/11	LA+MDE (%)	P18 545 6.1	%	40
03/10/11	Los Angeles (.)	NF EN 1097-2 article 5	LA	31
03/10/11	Micro-Densité (.)	NF EN 1097-1	MDE	19
24/01/11	MV absolue 0.63 - µ a (t/m3)	NF EN 1097-6 article 7	MVA (Absol)	2,74
24/01/11	MV réelle - µ rd (t/m3)	NF EN 1097-6 article 7	pod	2,69
24/01/11	MV réelle autres 0.63 - µ ra	NF EN 1097-6 article 8	MVS	2,71
04/04/11	Qualification Alcali	FD P18-545	NE	
04/04/11	Soufre total (%)	NF EN 1744-1 article 11	S	0,360
04/04/11	Sulfates dans acide (%)	NF EN 1744-1 article 12	AS	0,013

	Éditée par : Granulats Nord Est / Champagne Ardennes - Aux trois Fontaines - 08600 - Givet	Tél : 03.24.42.85.46 Fax : 03.24.42.85.50
--	--	--



## Granulats Nord Est / Champagne Ardennes

Annexe des caractéristiques de la  
Fiche Technique ProduitMise à jour du : 03/01/2012  
FTP Q2L270 A10 112

Usine de production	Classe granulométrie	Elaboration
Givet CE	4 / 10 Cal CL - NF -	Concassé Lavé
Noms	Article	Code
P 18-545	10 : Bétons Hydrauliques	A sauf Soufre et Aplatissement en B

COMPTAGE PETROGRAPHIQUE	Date pétrographie 18/01/2010
-------------------------	------------------------------

CHIMIE	Date chimie 11/03/2010										
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MnO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	PIOT	Perte au f
6,86	1,77	0,88	46,57	3,47		0,07	0,47	0,10	0,03	- I.D.	39,39

Détail: Analyse granulométrique	Du 07/07/2011 au 14/12/2011								
	63 µm	2,00	4,00	8,5	7,1	10,0	14,0	20,0	
Maximum	0,70	4,80	13,80	52,20	61,30	84,40	100,00	100,00	
Nf - k nf	0,60	2,10	9,30	50,40	60,40	83,30	100,00	100,00	
nf	0,10	1,00	2,60	4,20	4,50	1,70	0,00	0,00	
Nf	0,40	0,80	6,00	41,10	14,70	91,30	100,00	100,00	
Nf - k nf	0,20	0,00	2,80	39,80	49,00	88,20	100,00	100,00	
Minimum	0,10	0,30	3,40	37,60	46,70	88,00	100,00	100,00	

## Observations

Organisme de certification : AFNOR Certification  
11 avenue de Francis de Pressensé  
93571 Saint Denis La Plaine  
Cedex

	Editée par : Granulats Nord Est / Champagne Ardennes - Aux trois Fontaines - 08600 - Givet	Tél : 03.24.42.85.48 Fax : 03.24.42.85.50
--	--	--



LAFARGE

Fiche Technique de Produit

Engagement du 01/01/2012 au 30/06/2013

Page 1/1, imprimé le Jeudi 12 Avril 2012

Producteur : Sandrancourt  
Granulats : 0/4 SC L NF

**Partie contractuelle**  
*Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage*

Classe granulaire	0	4	Norme NF P 18-545 Article 10 - EN 12620+A1	Code Code A
-------------------	---	---	--	----------------

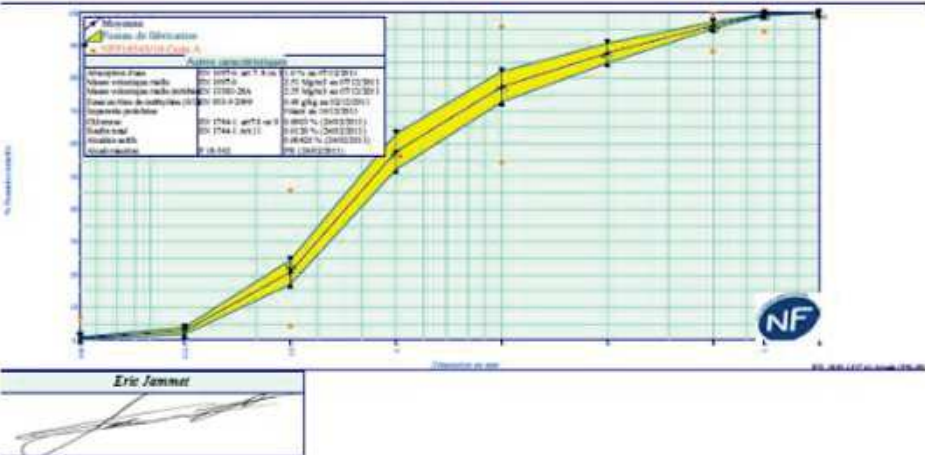
  

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	20	FM	SE10	f
Etendue e	6		40		40		10				0.6		6
V.S.S.+U			40		96		100				2.95		11.00
V.S.S.	6.0		45		95		99				2.90		10.00
V.S.I.			5		55		89	95	100		2.20	85.0	
V.S.I.-U			4		54		87	94			2.05		
Ecart type max			12.12			12.12					0.18		

**Partie informative**  
*Résultats de production*

du 01/07/11 au 27/12/11

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	FM	SE10	f
Maximum	1.5	5	29	70	88	94	99	100	100	2.90	94.0	1.00
Inf. (tolérances)	0.9	4	24	63	82	91	97	100	100	2.73	85.5	0.93
Moyenne Xf	0.7	3	21	58	77	88	96	100	100	2.57	83.0	0.70
Sup. (tolérances)	0.4	2	17	52	73	85	95	99	100	2.41	80.5	0.47
Minimum	0.3	1	14	49	70	82	94	99	100	2.21	80.0	0.40
Ecart-type	0.19	0.8	2.9	4.4	3.7	2.4	0.8	0.1	0.0	0.130	2.00	0.185
Nombre de lectures	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	95	184



Systeme de gestion de la qualité - ISO 9001:2008 - LAFARGE GRANULATS - Sandrancourt - 01/07/11 - 27/12/11

**Superplastifiant :****MC-PowerFlow 3140**Conforme NF EN  
934.1/2

Superplastifiant/haut réducteur d'eau très performant reposant sur la dernière technologie polymérique

**Propriétés du produit**

- Réduction d'eau importante.
- Faible dosage.
- Très bon maintien de la rhéologie.
- Dispersion rapide dans le béton.
- Faible cohésion.
- Bonne stabilité des bétons autoplaçants et autorivelants.
- Bonne compatibilité avec les entaineurs d'air.
- Ne contient pas de chlorures.

**Domaines d'application**

- Béton prêt à l'emploi.
- Adapté pour l'association avec les ciments composites.
- Bétons très fluides.
- Béton autoplaçant (BAP)

**Indications de mise en œuvre****Consignes d'utilisation**

MC-PowerFlow 3140 est un superplastifiant synthétique qui repose sur la dernière technologie MC des polycarboxylatether (PCE).

Le mécanisme actif particulier permet la fabrication de bétons à faible teneur en eau avec des qualités de mise en œuvre excellentes. Les caractéristiques visées du béton frais sont généralement obtenues avec de faibles dosages

MC-PowerFlow 3140 se mélange rapidement et de manière homogène dans le béton et développe son effet fluidifiant. Ainsi, les cadences de productions rapides sont assurées.

MC-PowerFlow 3140 est conçu pour obtenir de longs maintiens de rhéologie. Les pertes de consistance souvent constatées avec les superplastifiants conventionnels peuvent être

réduites de manière considérable dans la plupart des cas. Une correction ultérieure de la consistance par un ajout de fluidifiant sur le chantier n'est plus nécessaire dans la majorité des cas.

Généralement, même si le maintien de la rhéologie est important, les temps de prise et de développement des résistances mécaniques sont normaux. Dans les cas isolés, un léger effet retardateur peut se produire en fonction du dosage et de la température.

La combinaison particulière des matières actives permet la fabrication de bétons stables sans risque de ségrégation sur toute la plage de consistance.

MC Chimie SARL - Z.I. mi-plaine - 29/31, rue des Frères Lumière - F-69740 Genas  
Tel. +33-4-78 90 24 36 - Fax: +33-4-78 90 11 99 - www.mc-chimie.fr



MC-Powerflow 3140 peut être combiné dans le béton avec beaucoup d'autres adjuvants MC. Pour les cas particuliers, veuillez contacter nos conseillers spécialisés dans la technologie du béton.

L'ajout de MC-PowerFlow 3140 au béton est effectué pendant le mélange. La meilleure efficacité est obtenue lors du dosage après l'ajout d'eau. Cependant le dosage dans l'eau de gâchage est également possible. Nous recommandons de choisir

la durée du mélange de manière à ce que l'adjuvant puisse pleinement produire son effet fluidifiant pendant l'opération de mélange.

Dans le cas d'un dosage sur le chantier en citerne, il convient de respecter la norme en vigueur.

Veuillez respecter les "Consignes générales d'application d'adjuvants pour béton".

#### Propriétés techniques du MC-Powerflow 3140

Paramètres	Unité	Valeur	Observation
Densité	Kg/L	env. 1,06	valeur moyenne
Plage de dosage recommandée	%	0,2 à 3,0	du poids de ciment
Teneur max. en chlorure	% de masse	≤ 0,10	
Teneur max. en alcalins	% de masse	≤ à 1,5	
Extrait sec.	%	29,8-31,8	(methode infrarouge)
pH		4,5-6,5	

#### Caractéristiques produit du MC-Powerflow 3140

Type d'adjuvant	Superplastifiant haut réducteur d'eau: EN 934-2 T3.1/3.2
Désignation (appellation) de l'adjuvant	MC-Powerflow 3140
Couleur	Marron
Forme	Liquide
Certificat de conformité	DIN EN ISO 9001 / DIN EN 934-1/2/6 0754-CPD-02-1065.2
Organisme homologué	MPA, Karlsruhe
Contrôle de la production en usine selon DIN EN ISO 9001 / DIN EN 934-1/2/6	
Forme de la livraison	Fûts de 200 Kg Container de 1000 Kg

**Annotation :** Les informations données dans la présente fiche technique sont basées sur notre expérience en toute bonne foi, mais sans engagement. Elles sont à adapter aux ouvrages respectifs, aux objectifs d'utilisation et aux exigences locales spécifiques. Dans ces conditions, nous garantissons l'exactitude de ces informations dans le cadre de nos conditions de vente et de livraison. Toute recommandation faite par nos collaborateurs et s'écartant des informations contenues dans nos fiches techniques sera valable uniquement à condition d'avoir été confirmée par écrit. De manière générale, les règles de l'art officiellement reconnues sont applicables.

Edition 09/09. Le présent imprimé a été révisé sur le plan technique. Les versions publiées antérieurement ne sont plus valables et ne doivent plus être utilisées. Toute nouvelle révision technique annule et remplace la précédente version.

MC Chimie SARL . Z.I. mi-plaine . 29/31, rue des Frères Lumière . F-69740 Genas  
Tel. +33-4-78 90 24 36 . Fax: +33-4-78 90 11 99 . [www.mc-chimie.fr](http://www.mc-chimie.fr)

## ANNEXE 2 : COURBES DE RETRAIT PLASTIQUE

Cette annexe fournit les courbes brutes des mesures de retrait plastique dans les deux directions, perpendiculairement et parallèlement au sens du vent.

### Bétons composés de gravillons naturels :

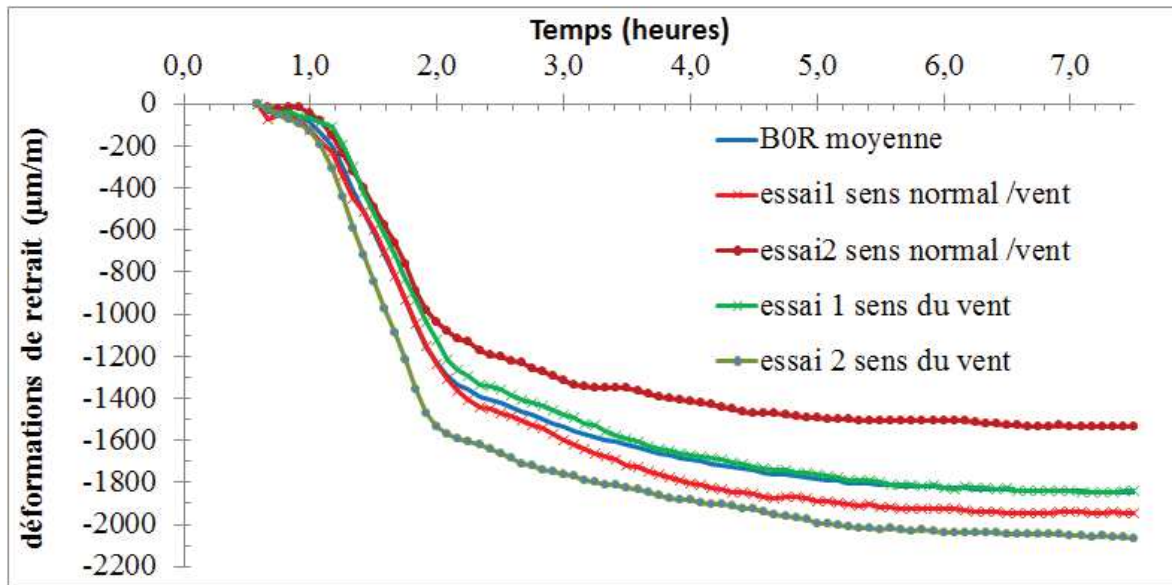


Figure 1 : déformations horizontales de retrait libre en fonction du temps, B0R

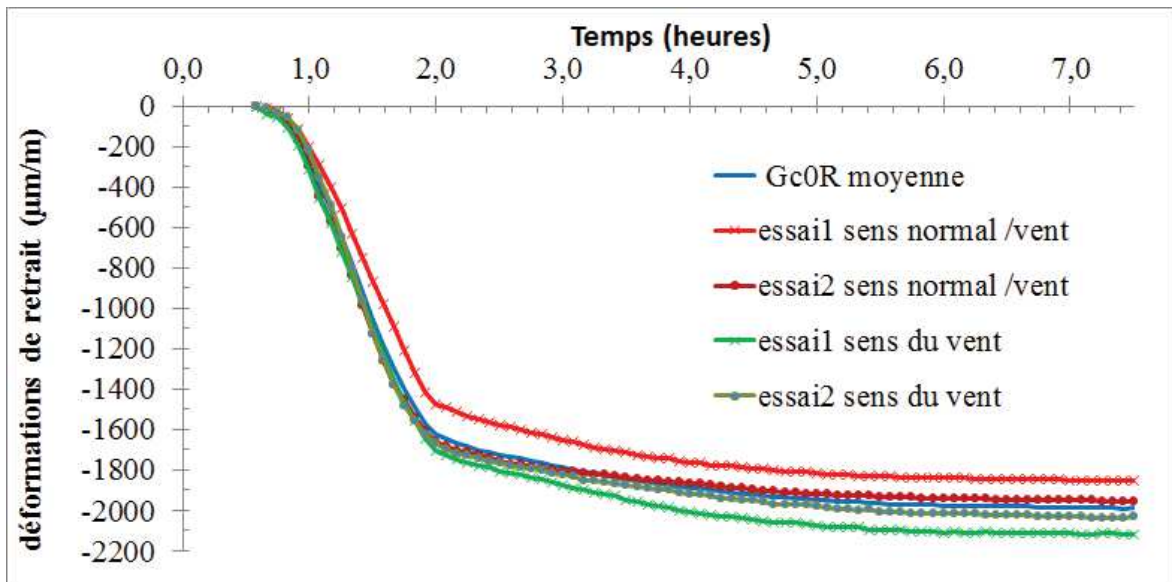
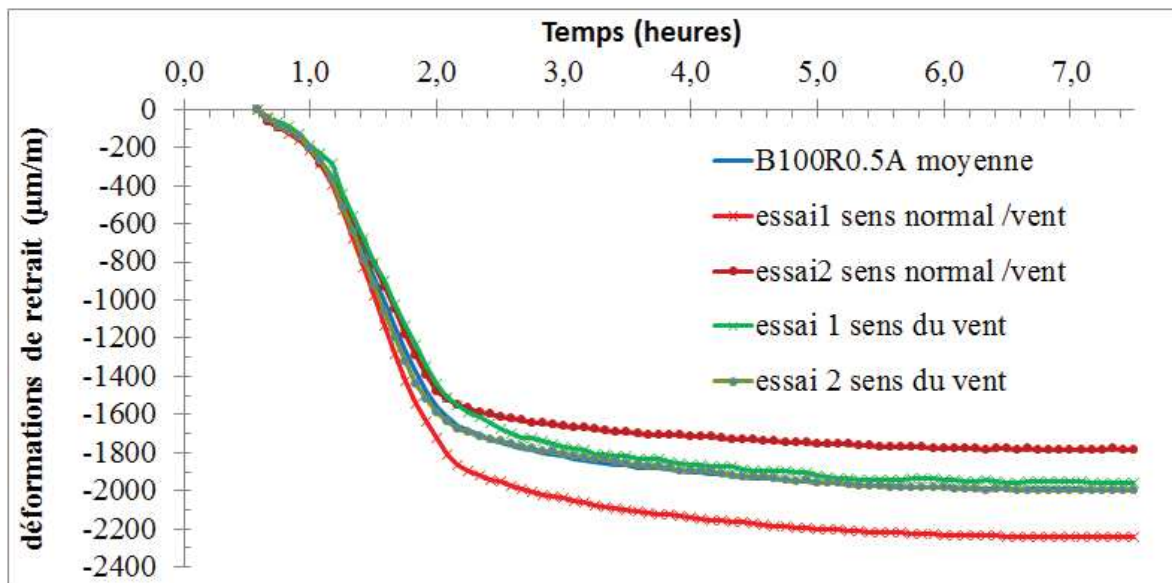
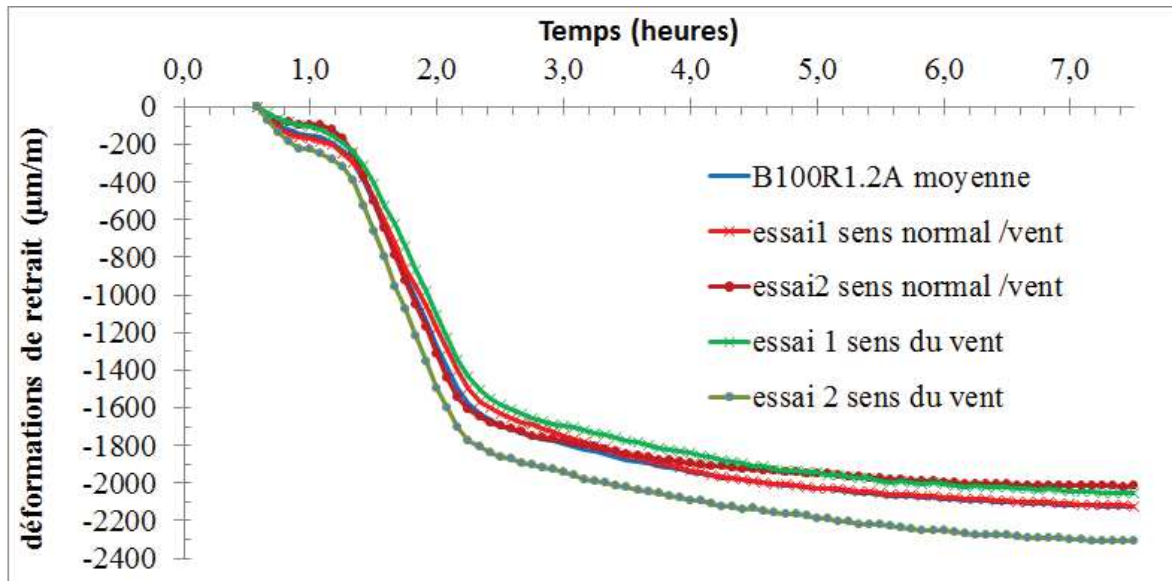


Figure 2 : déformations horizontales de retrait libre en fonction du temps Gc<sub>0R</sub>

**Bétons recyclés :**



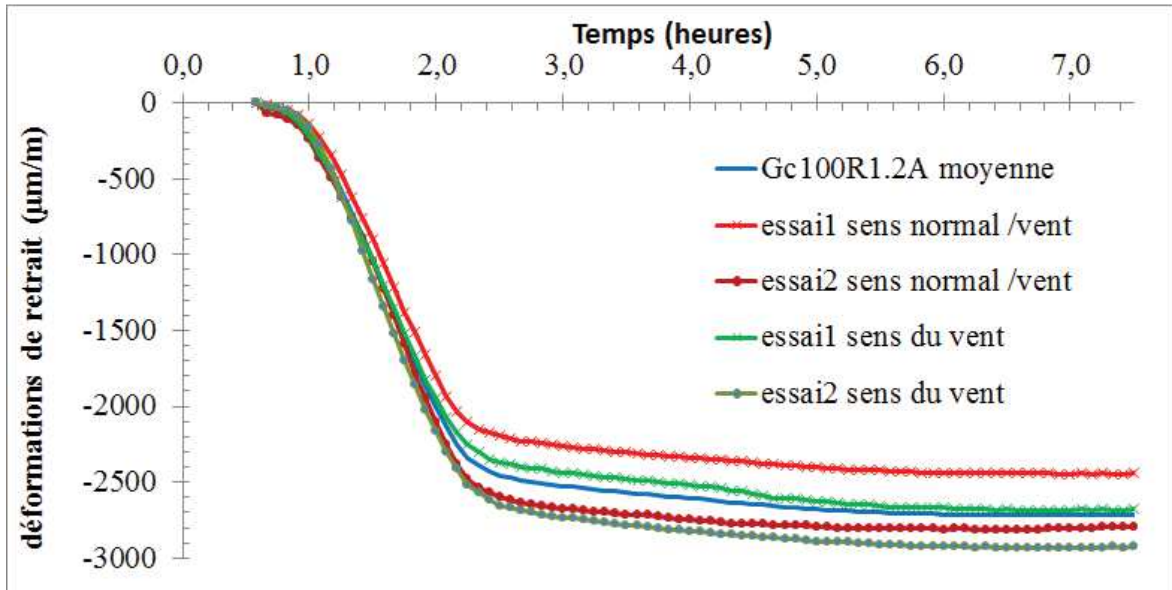


Figure 5 : déformations horizontales de retrait libre en fonction du temps Gc100R1.2A

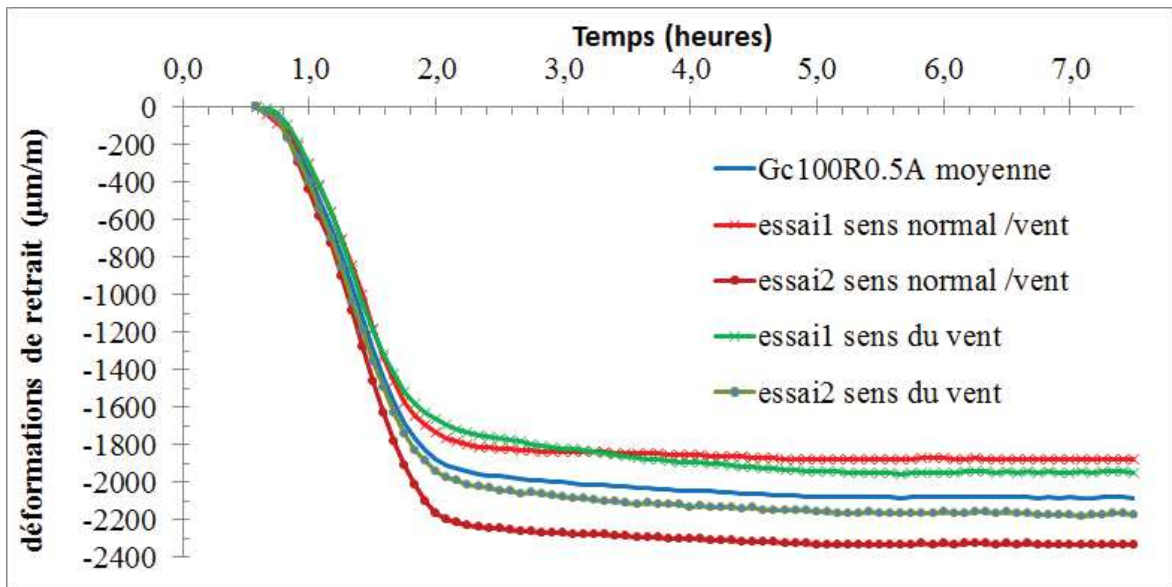


Figure 6 : déformations horizontales de retrait libre en fonction du temps Gc100R0.5A

### ANNEXE 3 : COURBES DE DERIVEES DES PRESSIONS CAPILLAIRES EN FONCTION DU TEMPS

Cette annexe fournit les courbes des dérivées de la pression capillaire en fonction du temps pour les six bétons étudiés. Ces courbes représentent les valeurs moyennes des trois mesures effectuées au sein des moules de retrait libre soumis à la dessiccation.

#### Bétons composés de gravillons naturels :

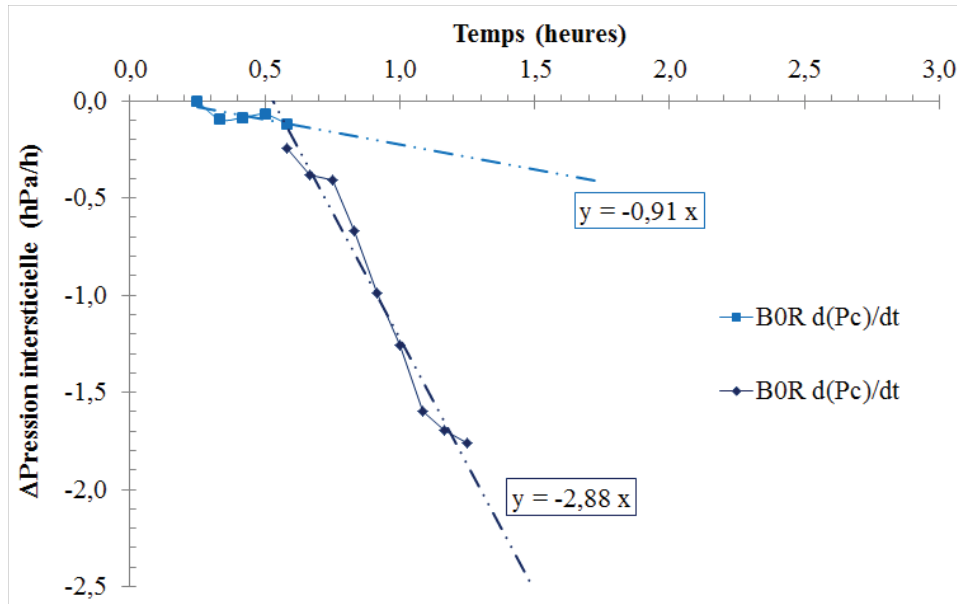


Figure 7 : courbes de la dérivée de la pression capillaire en fonction du temps,  $t < 2 \text{ h } 00$ , béton  $B_{0R}$

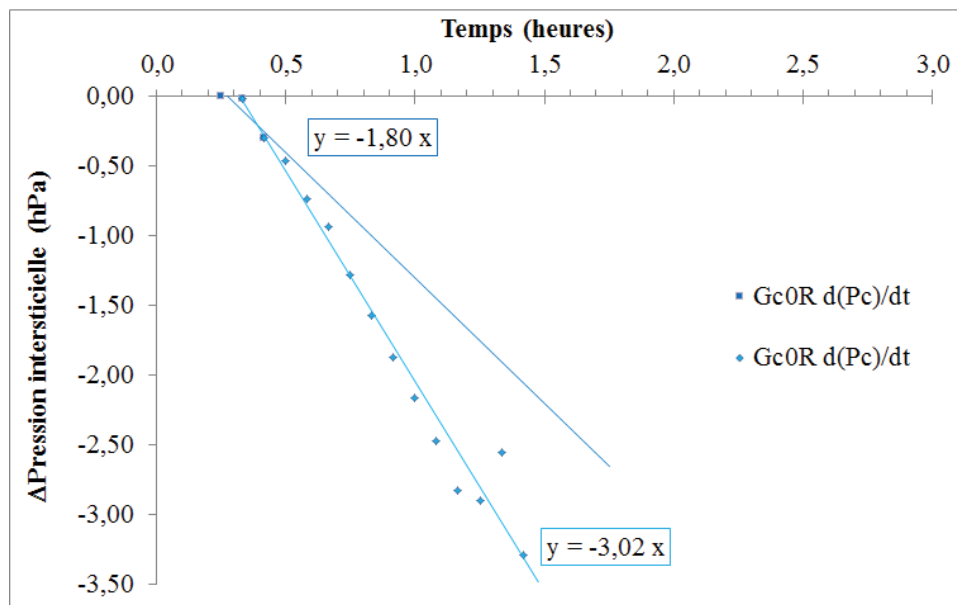


Figure 8 : courbes de la dérivée de la pression capillaire en fonction du temps,  $t < 2 \text{ h } 00$ , béton  $G_{C0R}$

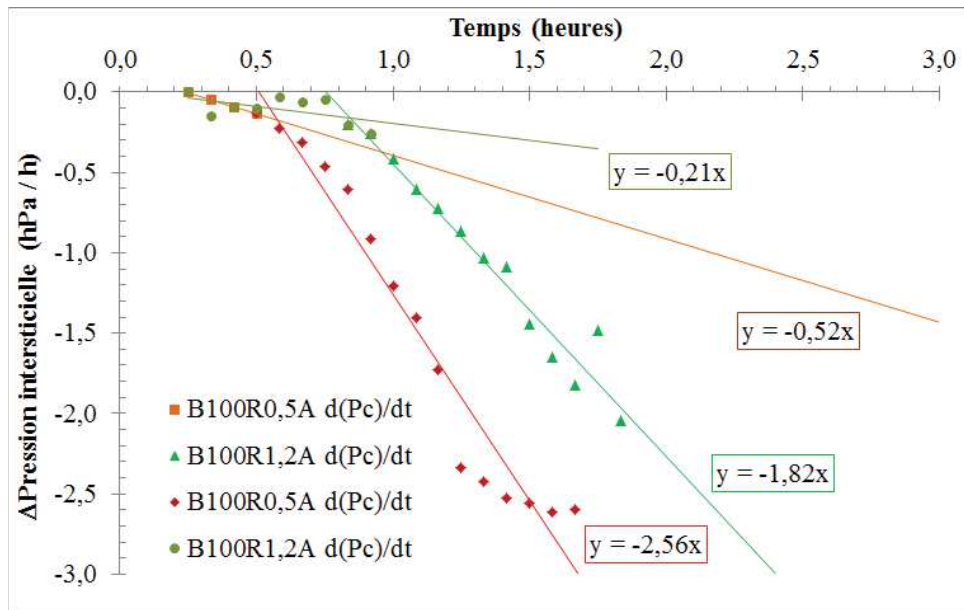
**Bétons recyclés :**

Figure 9 : courbes de la dérivée de la pression capillaire en fonction du temps,  $t < 2 \text{ h } 00$ , bétons  $B_{100R1,2A}$  et  $B_{100R0,5A}$

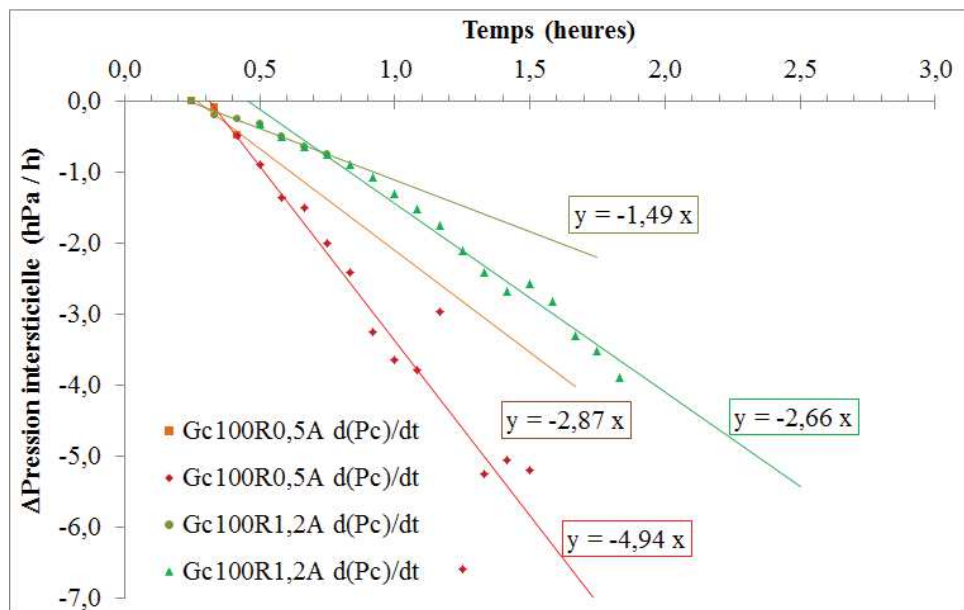


Figure 10 : courbes de la dérivée de la pression capillaire en fonction du temps,  $t < 2 \text{ h } 00$ , bétons  $Gc_{100R1,2A}$  et  $Gc_{100R0,5A}$