



ISSN : 1270-9840

SÉRIE BIMESTRIELLE **N° 2-3/2013**(anciennement : Annales de l'I.T.B.T.P.,
Revue créée en 1948)

AOÛT 2013

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Serge KEBABTCHIEFF

RÉDACTION**Rédacteur en chef**François BUYLE-BODIN,
université de Lille**Représentant****l'Association Française
de Génie Civil AFGC**Jean-Marc TANIS (EGIS),
président du CABruno GODART (LCPC), président du Comité
des Affaires GénéralesPatrick GUIRAUD (Cimbéton),
vice-président du CAG

Thierry KRETZ (SETRA),

Président du Comité Scientifique et Technique

Représentant l'Association**Universitaire de Génie Civil AUGC**Fabrice GATUINGT
(ENS Cachan)

Président du CA

Christophe PETIT, président du conseil
scientifique

Hélène CARRÉ (université de Pau),

chargée du prix jeunes
chercheurs René Houpert**Représentant le LCPC**

Jean-Luc CLÉMENT, direction scientifique

Représentant la SMA-BTP et le GIS MRGenCi

(maîtrise des risques en génie civil)

Vincent MELACCA

**Représentant l'Union des Ingénieurs et
Scientifiques Francophones UISF**

Élie ABSI, président

Gilbert GIACOMONI (École des Mines de Paris),
responsable des publicationsFrançois BOUVIER, ingénieur ECP, architecte
et urbaniste**ABONNEMENT :**

Editions ESKA

<http://www.eska.fr>

12, rue du Quatre-Septembre - 75002 PARIS

Tél. : 01 42 86 55 65 - Fax : 01 42 60 45 35

FABRICATION : AGPA EDITIONS

4, rue Camélinat - 42000 Saint-Etienne

Tél. : 04 77 43 26 70 - Fax : 04 77 41 85 04

E-mail : agpaedit@wanadoo.fr

PUBLICITÉ - À la rédaction**IMPRESSION :**

sommaire

éditorial

31^{es} rencontres universitaires de l'AUGC Cachan, 29-31 mai 2013

Environnement et Construction durable

Eurocode 2 : Application aux bétons à graviers recyclés	7
<i>George WARDEH, Elhem GHORBEL</i>	
Durabilité des réparations des ouvrages en béton armé avec des mortiers modifiés par des polymères	13
<i>Inès Léana TCHETGNIA NGASSAM, Sandrine MARCEAU, Thierry CHAUSSADENT</i>	
Incorporation de fines de béton de démolition dans la fabrication de mortier par substitution du ciment	19
<i>L. NELFIA, P-Y. MAHIEUX, Ph. TURCRY, Y. AMINE, Ouali AMIRI</i>	
Performance hydrique de bétons de chanvre : effet de l'enduit sur leur capacité de régulateurs hydriques	26
<i>Florence COLLET, Sylvie PRETOT, Christophe LANOS</i>	
Investigation expérimentale et modélisation multi-échelle des propriétés thermiques des bétons incorporant des Matériaux à Changement de Phase (MCP)	33
<i>Sarra DRISSI, Anissa EDDHAHAK, Sabine CARÉ, Jamel NÉJI, Johan COLIN</i>	

Matériaux

Développement de composites à matrice minérale et à renfort textile	39
<i>Marie MICHEL, Jean AMBROISE</i>	
Des pistes de recherche pour diminuer la viscosité des bétons à hautes performances	46
<i>Julie HOT, Nicolas ROUSSEL</i>	
Étude de l'ouvrabilité et des propriétés mécaniques de mortiers à base de sable recyclé	53
<i>H. GOMART, E. GHORBEL, G. WARDEH</i>	
Influence du séchage sur les propriétés d'adhérence d'un mortier adjuvanté par un éther de cellulose	60
<i>T. MAUROUX, Ph. TURCRY, F. BENBOUDJEMA, A. AIT-MOKHTAR, B. RUOT</i>	

abstracts — résumés	4
annonces de colloques	66
bulletin d'abonnement	2
recommandations aux auteurs	84



Photos de couverture : les auteurs
Crédits photos : les auteurs



BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner aux *Éditions ESKA*

12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS

Tél. 01 42 86 55 65 – Fax 01 42 60 45 35

Nom

Raison sociale.....

Adresse

Code postal Ville Pays

Je m'abonne pour l'année **2013** (6 numéros/an) à la revue « *Annales du BTP* » :

- ☐ Tarif FRANCE individuel (TTC) : **237 €** ☐ Tarif ETRANGER individuel (HT) : **285 €**
☐ Tarif FRANCE institution (TTC) : **296 €** ☐ Tarif ETRANGER institution (HT) : **341 €**

Je joins : ☐ Un chèque bancaire à l'ordre des Editions ESKA
☐ Un virement bancaire aux Editions ESKA -
 BNP Paris - Champs Elysées - 30004-00804 - Compte 000101399.56

* 2-3/2013

LISTE DES ANNONCEURS

ANNALES DES MINES :	2 ^e et 3 ^e de couverture
CONEXPO-CON/AGG 2014	4 ^e de couverture
ANNONCES DE COLLOQUES :	GFHN 2013, p. 66-75
	8 ^{es} Journées Fiabilité des matériaux et des structures, p. 76-77
	Colloque « Le Pont », p. 78-79
	AFGC, BFUP 2013, p. 80-81
	Lavoisier, p. 82

éditorial

31^{es} Rencontres universitaires de l'AUGC, ENS de Cachan, 29-31 Mai 2013

Thème général : « De l'expérimentation à la modélisation en Génie Civil »

Un peu plus de 31 ans après que l'assemblée constituante de l'Association Universitaire de Génie Civil (avec l'adoption des statuts) se soit réunie à l'ENS de Cachan, nous avons eu le plaisir d'accueillir à nouveau les rencontres de l'AUGC du 29 au 31 Mai 2013.

Plus de 290 participants étaient présents à ces nouvelles rencontres, avec plus de 160 articles publiés dans les actes, ce qui représente une véritable réussite. Pour la première fois, elles étaient précédées par une journée de formation doctorale autour du thème « La fissuration dans les ouvrages de Génie Civil », suivie par plus de 70 participants.

Ces rencontres ont comporté plusieurs manifestations :

- Une réunion scientifique couvrant l'ensemble des thèmes de recherche de la communauté du Génie Civil afin de permettre à tous les chercheurs de présenter leurs travaux. Les présentations ont ainsi concerné des thèmes, tels que l'environnement, la construction, les infrastructures et les bâtiments durables, les matériaux, les structures, la physique du bâtiment, etc ;
- Des présentations en sessions plénières sur des projets de Génie Civil de grande envergure et des problématiques d'intérêts scientifiques majeurs : la maquette EDF Veerors d'une enceinte de confinement à l'échelle 1/3, la haute efficacité énergétique et la ligne grande vitesse Tours/Bordeaux ;
- Le prix Jeunes Chercheurs "René HOUPERT", qui offrent aux doctorants la possibilité d'exposer leurs travaux de thèse à l'ensemble de la communauté universitaire et professionnelle du Génie Civil et, ainsi, de faire connaître une partie des activités de leur laboratoire d'accueil. Ainsi, 23 doctorants ont présenté cette année le prix Jeunes chercheurs, remporté par Jean-Benoît KOPP avec une présentation intitulée « Etude de la rupture dynamique de tuyaux polymères utilisés pour le transport du gaz sous moyenne pression » ;
- Le prix du meilleur poster : 32 posters ont été exposés et présentés. Le prix du meilleur poster a été décerné à Hélène CARRE et Izabela HAGER pour le poster dont le titre est « Diagnostic post-incendie d'une structure en béton par colorimétrie » ;
- Trois ateliers pour échanger nos expériences autour de problèmes d'actualité dont les enjeux sont importants pour notre communauté. Cela concerne la réforme profonde de l'agrégation Génie Civil, les outils de calcul et de simulation au service du Génie Civil et enfin le renforcement des liens entre les entreprises et les universités afin d'améliorer la compétitivité des entreprises au regard de la mondialisation.

Ces manifestations reflètent les objectifs de l'Association Universitaire de Génie Civil : contribuer de façon collective à la formation permanente des enseignants du supérieur pour une formation de qualité de nos étudiants, participer à la formation des doctorants et à la diffusion des résultats de nos recherches.

À l'issue des rencontres, sur la base des évaluations et des communications, vous retrouverez les neuf publications à caractère scientifique et technique qui ont été sélectionnées pour ce numéro spécial des Annales du BTP. Ces articles ont pour thème les (éco)-matériaux (développement, propriétés physiques ou mécaniques), l'environnement et la construction durable.

Le comité d'organisation des 31^{es} Rencontres universitaires de l'AUGC

Farid
BENBOUDJEMA

Caroline
DE SA

Aveline
DARQUENNES

résumés — abstracts

ENVIRONNEMENT ET CONSTRUCTION DURABLE**EUROCODE 2 : APPLICATION AUX BÉTONS À GRAVIERS RECYCLÉS**

George WARDEH, Elhem GHORBEL

Ce travail est dédié à l'étude du comportement mécanique des bétons à base de graviers recyclés de classe de consistance S4 et de classe de résistance C35. Quatre formules sont étudiées : le béton de référence, et 3 bétons contenant des graviers recyclés avec les taux de substitution suivants : 30%, 65% et 100%. L'évolution du module d'élasticité, E , de la déformation au pic, ϵ_{c1} et de la contrainte de flexion, f_{t1} , a été étudiée en fonction du taux de substitution. Les résultats montrent que le module d'élasticité ainsi que la résistance à la flexion diminuent alors que la déformation au pic augmente. Un intérêt a été porté sur la validité des expressions analytiques proposées par l'EC2 pour la modélisation du comportement en compression. Les résultats obtenus montrent que ces relations ne prédisent pas de manière satisfaisante les propriétés mécaniques ainsi que la courbe contrainte déformation des 4 formules testées et de nouvelles expressions analytiques ont été proposées. On montre que la relation proposée ($E - f_{c28}$) s'applique à tout type de bétons alors que l'effet de la substitution doit être introduit dans la relation $\epsilon_{c1} - f_{c28}$. Pour la modélisation de la courbe déformation-contrainte, le modèle de Carreira et Chu modifié est mieux adapté.

EUROCODE 2: APPLICATION TO RECYCLED AGGREGATE CONCRETE

This work is devoted to the study of the mechanical behaviour of concrete containing recycled gravel on the basis of S4 class of flowability and a target C35 class of compressive strength. Four formulations were studied, the concrete of reference and three concretes containing recycled gravel with 30%, 65% and 100% replacement ratio. The evolution of the elastic modulus, E , the strain at the peak stress, ϵ_{c1} , the flexural strength, f_{t1} was studied as a function of replacement ratio. The results show that the elastic modulus and the flexural strength decrease while the peak strain increases. The validity of analytical expressions proposed by EC2 is also discussed. The obtained results show that these relationships do not predict adequately the mechanical properties or the stress-strain curve of the four tested materials and new expressions were established. The proposed relationship $E - f_{c28}$ applies to any type of concrete, while the effect of substitution has to be introduced into the $\epsilon_{c1} - f_{c28}$ relationship. For the full stress-strain curve the model Carreira and Chu seems more adequate.

DURABILITÉ DES RÉPARATIONS DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ AVEC DES MORTIERS MODIFIÉS PAR DES POLYMÈRES

Inès Léana TCHETGNIA NGASSAM, Sandrine MARCEAU, Thierry CHAUSSADENT

Les mortiers modifiés par des polymères occupent une place importante dans la gamme de produits de réparation destinés aux

ouvrages d'art. Cette étude vise à comprendre l'influence de la présence de polymère dans ces mortiers sur la qualité des réparations de surfaces en béton, notamment sur leurs propriétés d'adhérence. Deux types de mortiers modifiés ont été formulés en utilisant deux poudres de polymère, du styrène acrylate (SA) et de l'éthylène vinyle acétate (EVA). Les résultats montrent que l'adhérence dépend à la fois du type et de la quantité de polymère utilisé et de l'environnement de cure de la réparation. Elle est optimale à partir 10% de polymère et la contrainte d'adhérence des mortiers contenant de l'EVA est plus élevée que celle des mortiers contenant du SA. Une cure en milieu chaud améliore également l'adhérence.

DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES REPAIRS WITH POLYMER-MODIFIED MORTARS

The polymer-modified mortars have an important place in the range of repair products. The aim of this work is to study the influence of the presence of polymers in these mortars on the quality of repair concrete surfaces, including their adhesion properties. Two types of modified mortars were made using two polymer powders: styrene acrylate (SA) and ethylene vinyl acetate (EVA). The results show that the adhesion depends on both the type and the amount of polymer used and the cure that is applied. It is optimized from 10% of polymer and EVA mortar adhesive strengths are higher than SA mortars ones. A high temperature also improves adhesion.

INCORPORATION DE FINES DE BÉTON DE DÉMOLITION DANS LA FABRICATION DE MORTIER PAR SUBSTITUTION DU CIMENT

L. NELFIA, P-Y. MAHIEUX, Ph. TURCRY, Y. AMINE, Ouali AMIRI

Les enjeux environnementaux et économiques ont amené les acteurs publics et privés à s'associer autour d'un projet ambitieux (projet national Recybéton) visant à valoriser 70% des déchets du BTP inertes d'ici 2020 contre 12% à l'heure actuelle. À ces fins, de nouvelles filières sont envisagées comme par exemple la fabrication de liants composés à base de fines de béton concassé ou broyé. Dans cette thématique, nous avons étudié la faisabilité d'introduire des fines obtenues par concassage d'un béton dans la constitution de mortiers avec trois taux de substitution du ciment (25, 50 et 75%) à travers l'étude de la réactivité, la maniabilité et les résistances mécaniques en compression. Au regard des résultats obtenus, on constate que les fines étudiées peuvent être introduites dans la constitution de liants composés (jusqu'à 25% environ), c'est-à-dire jouer un rôle identique à celui du filler calcaire présent dans les ciments de type CEM II /B-L 32,5 R. Ces premiers résultats encourageants nous poussent à étendre notre démarche de recherche à des bétons de démolition de sites industriels.

REUSE OF FINE CRUSHED CONCRETE IN MORTARS WITH CEMENT SUBSTITUTION

Environmental and economic issues have led public and private stakeholder to join around an ambitious and innovative project to develop 70% of inert construction waste by 2020 compared with only 12% at present [CGDD, 2010]. To increase their

exploitation potential some projects aims to explore opportunities to incorporate waste recycling into design binders by substitution of cement. The purpose follows this theme where we studied the feasibility to incorporate one fine concrete in a mortar constitution by three volumes substitutions of cement. In view of the results, we found that fines concrete can be introduced into the constitution of blended binders (up to 25 %) and so can play a similar role to that of limestone filler in cement CEM II /B-L 32.5 R type. These first results are encouraging and have led us to expand our research approach to demolition concrete from industrial sites.

PERFORMANCE HYDRIQUE DE BÉTONS DE CHANVRE : EFFET DE L'ENDUIT SUR LEUR CAPACITÉ DE RÉGULATEURS HYDRIQUES

Florence COLLET, Sylvie PRETOT, Christophe LANOS

Le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiment influe sur les besoins énergétiques et sur le confort intérieur. Le béton de chanvre est un matériau bio-sourcé dont les principales qualités sont son faible impact environnemental et son comportement hygrothermique. Cette étude traite de la caractérisation dynamique du comportement hydrique de béton de chanvre moulé. Dans un premier temps, l'étude est réalisée sur le matériau seul, puis sur le matériau enduit. Deux types d'enduit intérieur sont considérés : sable-chaux et chanvre-chaux. Les essais sont réalisés selon la méthode définie dans le Nordtest project. Les résultats montrent que le béton de chanvre moulé est un très bon régulateur hydrique ($MBV=1,94 \text{ g}/(\text{m}^2.\%HR)$). Une fois enduit, le béton de chanvre moulé reste bon régulateur hydrique avec un enduit fermé et très bon régulateur hydrique avec un enduit ouvert.

HYDRIC PERFORMANCE OF HEMP CONCRETE: IMPACT OF COATING ON THEIR MOISTURE BUFFERING CAPACITY

The hygrothermal behaviour of building envelopes impacts on energy needs and on indoor comfort. Hemp concrete is a bio-based building material the main qualities of which are its low environmental impact and its hygrothermal behaviour. This study deals with dynamic characterization of hydric behaviour of moulded hemp concrete. In a first step, the study is held on the material itself. Then, the study considers systems made of coated moulded hemp concrete for two kinds of coating: sand-lime and hemp-lime. Results show that moulded hemp concrete has a very good moisture buffer capacity ($MBV=1.94 \text{ g}/(\text{m}^2.\%RH)$). Once coated, hemp concrete remains good hydric regulator (for concentrated coating) and very good hydric regulator (with open coating).

INVESTIGATION EXPÉRIMENTALE ET MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DES BÉTONS INCORPORANT DES MATÉRIAUX À CHANGEMENT DE PHASE (MCP)

Sarra DRISSI, Anissa EDDHAHAK, Sabine CARÉ, Jamel NÉJI, Johan COLIN

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) dans le domaine des bâtiments est une solution attractive contribuant à la réduction de la consommation d'énergie ainsi qu'à l'amélioration du confort thermique. Ce travail est consacré à l'étude des propriétés thermiques des MCP et des bétons modifiés (chaleur spécifique, conductivité thermique). Des techniques expérimentales ont été mises en jeu telles que la calorimétrie

différentielle à balayage (DSC), le Hot Disk et le laser flash. Une modélisation micro-macro est aussi présentée afin de prédire la conductivité thermique des bétons-MCP en se basant sur quelques schémas d'homogénéisation classiques.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MULTI-SCALE MODELING OF THERMAL PROPERTIES OF CONCRETE MODIFIED WITH MICROENCAPSULATED PHASE CHANGE MATERIALS (PCMS)

The use of Phase Change Materials (PCMs) in the building sector is an attractive solution contributing to the reduction of energy consumption as well as the improvement of the thermal comfort. This research is devoted to the study of thermal properties of PCMs and modified concrete (specific heat, thermal conductivity). Experimental techniques were used such as the Differential Scanning Calorimetry (DSC), the Hot Dish and the Laser Flash. Also, a micro-macro modelling is presented in order to predict the thermal conductivity of PCM-concrete using some classic homogenization schemes.

MATÉRIAUX

DÉVELOPPEMENT DE COMPOSITES À MATRICE MINÉRALE ET À RENFORT TEXTILE

Marie MICHEL, Jean AMBROISE

Le CCV (Composite Ciment Verre) est un mélange de micro-béton fluide et de roving de fibres de verre coupées. Une solution de renforcement alternative aux fibres courtes est l'utilisation de renforts textiles. Les TRC (Textile Reinforced Cement or Concrete) sont des matériaux dont le coût matière est très nettement supérieur à celui des bétons traditionnels, ce qui a un impact sur le prix des produits finis. La réduction des coûts passe par la diminution des épaisseurs et par une réduction des cycles de fabrication. Concernant la réduction des cycles de fabrication, l'utilisation des liants à prise rapide tels que les systèmes [CAC – sulfate de calcium – CEM] permet, par le fait de la précipitation rapide d'ettringite, un démoulage en quelques minutes. Les résultats présentés dans cette étude ont pour objectif de montrer les perspectives de développement de composites fabriqués par imprégnation de renforts textiles avec un liant ettringitique. L'accent sera porté sur l'évolution des performances mécaniques à cause du phénomène de carbonatation des ettringites qui peut affecter la durabilité à long terme.

DEVELOPMENT OF TEXTILE REINFORCED CONCRETE

CCV (Composite GRC) is a mixture of micro-fluid concrete and short fiber roving glass. An alternative to reinforcing short fibers is the use of textile reinforcements. The TRC (Textile Reinforced Cement or Concrete) are materials whose material cost is much higher than that of conventional concrete, which has an impact on the price of the finished products. Cost reduction through reduced thickness and reduced manufacturing cycles. On the reduction of production cycles, use fast setting binders such as systems [CAC - calcium sulfate - CEM] allows a demoulding in a few minutes thanks to the rapid precipitation of ettringite. The results presented in this study aims to show the development prospects of composites made by impregnation of textile reinforcements with an ettringite binder. Emphasis will be placed on the development of mechanical performance due to carbonation ettringites phenomenon that can affect the long-term durability.

DES PISTES DE RECHERCHE POUR DIMINUER LA VISCOSITÉ DES BÉTONS À HAUTES PERFORMANCES

Julie HOT, Nicolas ROUSSEL

Depuis quelques années, le béton connaît une période de mutation. Les tendances actuelles concernant la formulation des bétons à hautes performances et à faibles impacts environnementaux montrent que la fraction volumique solide est de plus en plus élevée. Cependant, l'augmentation de la fraction volumique solide a de lourdes conséquences sur la maniabilité de ces nouveaux bétons. Les performances à l'état durci sont certes obtenues mais les modifications de formulation de ces bétons sont difficilement compatibles avec une fluidité importante. Les pistes de recherche permettant de contourner cette difficulté sont nombreuses, notamment grâce à l'emploi de polymères. Le travail présenté ici a donc pour but d'identifier certains mécanismes d'action de ces molécules à l'origine d'une diminution de la viscosité.

HOW TO DECREASE THE VISCOSITY OF HIGH PERFORMANCE CONCRETES

The concrete industry has been undergoing significant change in recent years. Current trends in mix design of high strength and environmentally friendly concretes show that solid volume fraction is progressively increasing. The increase in solid volume fraction has however dramatic consequences on the workability of these new concretes. Although the mechanical performances of hardened concretes are maintained and even improved, the change in mix design is hardly compatible with a good fluidity. To work around this issue, it is possible to use polymers. The article presented here aimed at identifying some potential mechanisms of action of these molecules at the origin of a decrease in viscosity.

ÉTUDE DE L'OUVRABILITÉ ET DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE MORTIERS À BASE DE SABLE RECYCLÉ

H. GOMART, E. GHORBEL, G. WARDEH

Le but de ce travail est d'étudier les propriétés à l'état frais et durci de mortiers de béton équivalent dont une partie du sable naturel a été substituée par du sable recyclé issu de matériaux de déconstruction. Deux séries de mortiers ont été formulées. Pour la première, la composition a été maintenue constante pour chaque taux de substitution en sable recyclé, avec une ouvrabilité variable. La deuxième série a été élaborée de manière à maintenir l'ouvrabilité constante quel que soit le taux de substitution. L'évolution des masses volumiques, de l'air occlus ainsi que du maintien de l'ouvrabilité a été suivie et analysée. Ces derniers résultats montrent que le sable recyclé n'absorbe pas l'eau de façon instantanée. À l'état durci, la microstructure a été étudiée par des mesures de porosité à l'eau et par intrusion de mercure. L'étude de la résistance à la compression et du module d'élasticité dynamique à 28 jours montre que ces résultats sont parfaitement corrélés à la porosité des matériaux.

EFFECTS OF RECYCLED SAND ON WORKABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF MORTARS

The aim of this study is to compare the fresh state properties and the mechanical behaviour of mortars for which a part of the natural sand was replaced by recycled sand coming from deconstruction materials. Two series of mortars were formulated, one where all compounds were hold constant for each substitution ratio of recycled sand, so that the workability is variable; at the opposite, the second series was formulated on the basis of constant workability whatever the replacement ratio was. At fresh state, densities, air content and workability evolution with time were measured. These results show that recycled sand does not absorb water instantaneously. In the hardened state, the microstructure was studied by means of water and mercury intrusion porosity techniques. These results were compared with compressive strength and dynamic modulus of elasticity at 28 days and show a good correlation between mechanical properties and porosity.

INFLUENCE DU SÉCHAGE SUR LES PROPRIÉTÉS D'ADHÉRENCE D'UN MORTIER ADJUVANTÉ PAR UN ÉTHER DE CELLULOSE

T. MAUROUX, Ph. TURCRY, F. BENBOUDJEMA, A. AIT-MOKHTAR, B. RUOT

Les mortiers industriels ont une formulation complexe contenant des polymères comme les éthers de cellulose. On s'intéresse ici à l'influence du séchage sur l'adhérence d'un tel mortier sur un support en béton. Les propriétés du mortier (retrait de séchage, propriétés mécaniques, microstructure) ont été caractérisées et le système mortier / support a été étudié avec des essais d'arrachement et un suivi de la fissuration due au retrait. Alors que la cure a un effet bénéfique sur l'hydratation et sur les propriétés mécaniques du mortier, le retrait de séchage augmente lorsque la cure est prolongée, contrairement à ce qu'on observe classiquement chez les bétons. Dans le cas d'un support sablé, il en résulte une fissuration à l'interface et une moindre adhérence du mortier sur le support, quand il est décoffré plus tardivement. Une hypothèse est formulée pour expliquer l'influence de la cure sur le retrait.

EFFECT OF DRYING ON ADHESION PROPERTIES OF A MORTAR WITH CELLULOSE ETHER ADDITION

Industrial mortars have complex mix-design with polymers such as cellulose ether. The present paper deals with the influence of drying on the adhesion of a mortar on a concrete substrate. The properties of the studied mortar (drying shrinkage, mechanical properties, microstructure) were measured and the system 'mortar on substrate' was studied by means of pull-off tests and the cracking of the interface due to shrinkage was monitored. While curing has a benefic effect on cement hydration and mechanical properties, it appears the drying shrinkage is increased when the curing duration is longer. This is in contradiction with literature on concrete. In the case of a sandblasted substrate, this results in a cracking of the interface between mortar and concrete and a lower adherence. The influence of curing on free shrinkage is discussed.



EUROCODE 2 : APPLICATION AUX BÉTONS À GRAVIERS RECYCLÉS

George WARDEH, Elhem GHORBEL

Université de Cergy Pontoise. 5 Mail Gay-Lussac, Neuville Sur Oise, 95031 Cergy Pontoise Cedex
George.Wardeh@u-cergy.fr, Elhem.Ghorbel@u-cergy.fr

1. INTRODUCTION

L'impact environnemental de la production des granulats est considérable. En parallèle, la production des granulats issus du recyclage est une activité qui ne cesse d'augmenter. D'après l'UNPG, Union Nationale des Producteurs de Granulats, la production totale de granulats recyclés en 2007 s'est élevée à 15 millions de tonnes issus essentiellement des travaux de démolitions. Dans ce contexte, la valorisation des granulats recyclés est une solution alternative qui permet à la fois la gestion des déchets du BTP et la préservation des ressources naturelles.

En France, un projet national a été lancé en 2012 sur le recyclage des matériaux hydrauliques issus de la déconstruction des bétons pour formuler de nouveaux bétons de structure. Les normes relatives aux bétons n'incluent pas de prescriptions relatives à l'utilisation des bétons à base de granulats recyclés. L'objectif du présent papier est d'étudier l'influence des graviers recyclés sur les propriétés mécaniques du béton et plus particulièrement au comportement à la compression uniaxiale. L'étude s'intéresse également à l'applicabilité des relations de l'Eurocode 2, qui estiment le module d'élasticité, la déformation correspondant au pic de contrainte et la relation contrainte-déformation à partir de la simple connaissance de la résistance à la compression, aux bétons à base de graviers recyclés.

2. MATÉRIAUX, MÉTHODE DE FORMULATION ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1. Matériaux

2.1.1. Ciment

Un ciment CALCIA CEM I 52,5 N CE CP2 NF, certifié conforme à la norme EN 197-2, a été utilisé.

Granulats

Un sable naturel roulé « S 0/4 », deux graviers silico-calcaires naturels semi-concassés (G1 4/10 et G2 10/20) ont été employés pour toutes les formulations. Les granulats recyclés ont été livrés dans de grands sacs d'une plateforme de retraitement des matériaux de démolition. Ils ont été tamisés au laboratoire en trois coupures, un gravier GR1 (4/10), un gravier GR2 (10/20) et un sable (0/4). Dans ce travail seuls les graviers GR1 et GR2 ont été utilisés. Ils ont été séchés dans une étuve à 105 °C puis ont été stockés dans des futs étanches jusqu'à la fabrication des bétons. Les principales propriétés des granulats naturels et recyclés sont présentées dans le tableau 1. Nous remarquons à tra-



	Sable	G1	G2	GR1	GR2
Masse volumique (kg/m³)	2550	2510	2510	2240	2240
Eau absorbée, WA	0.014	0.016	0.018	0.08	0.065
Moule de finesse	2.7	–	–	–	–

Tableau 1. Caractéristiques des granulats.

vers ces résultats que les granulats recyclés sont caractérisés par une masse volumique plus faible et une capacité d’absorption d’eau plus importante que les granulats naturels.

2.1.3. Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est le Cimfluid 3002 produit par la société Axim du Groupe Italcementi. C’est un produit de nouvelle génération à base de polycarboxylate modifié conforme à la norme EN 934-2. Il contient 30% d’extrait sec.

2.2. Méthode de formulation

Les matériaux du présent travail ont été formulés en se basant sur les exigences suivantes à l’état frais et à l’état durci : -) Seuls les gros graviers naturels sont remplacés par des graviers recyclés à trois taux de substitution par rapport au volume totale des graviers dans 1m³ de béton, 30, 65 et 100%. -) Le squelette granulaire est constitué d’un mélange ternaire du sable, du gravier 4/10 et du gravier 10/20. -) La classe de consistance est de S4 (affaissement est compris entre 16 et 21 cm selon la norme NF EN 206-1). -) A l’état durci, une résistance moyenne à la compression de 35 MPa doit être garantie. Quatre bétons ont été formulés, un béton de référence à granulats naturels, nommé BGN, et trois bétons à graviers recyclés nommés respectivement BGR30, BGR65 et BGR100. Le béton de référence a été formulé avec une quantité de ciment de 360 kg/m³ et un rapport E/C de 0.5. Le squelette granulaire a été optimisé en mesurant la compacité de plusieurs mélanges granulaires à l’aide d’une table vibrante. Les proportions absolues du sable, gravier G1 et gravier G2 dans le mélange optimale est telle que $S/(G1 + G2) = 2/3$ et $G1/G2 = 0,5$. Enfin le dosage du superplastifiant a été ajusté expérimentalement et la quantité de l’eau absorbée par les granulats a été ajoutée à l’eau de gâchage. La classe de consistance pour l’ensemble des formulations a été maintenue constante (S4). Pour le béton BGR30, le squelette granulaire a été d’abord optimisé en remplaçant 30% des graviers naturels G1 et G2 par des graviers recyclés GR1 et GR2. En raison de la faible densité des graviers recyclés, une augmentation de la quantité du sable était nécessaire afin d’obtenir la compacité optimale. Les graviers recyclés n’étant pas présaturés, la quantité d’eau absorbée a été ajoutée à l’eau de gâchage. Pour les formules avec 65% et 100% de graviers recyclés (BGR65 et BGR100) la même approche a été adoptée. De plus, compte tenu de la quantité d’eau importante ajoutée à

l’eau de gâchage, une quantité supplémentaire de ciment a été ajoutée de telle sorte que le rapport E/C reste constant. Les compositions des quatre bétons sont données dans le tableau 2 avec les principales propriétés de ces bétons à l’état frais. Dans ce tableau, on définit l’eau efficace, E_{eff} , la quantité d’eau totale, E_{tot} , moins l’eau absorbée par les granulats, ($E_{eff} = E_{tot} - W_A \times M_G$). Les résultats montrent que tous les bétons satisfont la maniabilité requise. Nous remarquons également une légère diminution de la masse volumique qui est d’autant plus accentuée que le taux de substitution est important.

2.3. Détails des éprouvettes préparées

Des cylindres 16x32 cm ont été préparés afin de caractériser la résistance à la compression et le module d’élasticité. Par ailleurs, des éprouvettes prismatiques 10x10x40 cm ont été coulées pour déterminer la résistance à la flexion. Les éprouvettes ont été démoulées après 24 h, conservées dans un bassin d’eau à température ambiante pendant 28 jours puis testées.

2.4. Méthodes expérimentales

Les essais de compression ont été réalisés à l’aide d’une presse INSTRON de capacité de 3500 kN à asservissement hydraulique. Ils ont été conduits en imposant une vitesse de chargement de 0.5 MPa/s. Les essais de flexion ont été réalisés à l’aide d’une presse INSTRON de capacité de 250 KN à asservissement mécanique en imposant une vitesse de déplacement de 1mm/min. Le module d’élasticité dynamique a été mesuré en utilisant un appareil de type E-Meter MK II. Chaque essai a été répété 3 fois pour chaque condition expérimentale.

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1. Propriétés mécaniques

L’ensemble des résultats résumés dans le tableau 3 montre que la substitution des graviers naturels par des graviers recyclés entraine la diminution du module d’élasticité, de la résistance à la flexion. La résistance à la compression diminue quand on substitue les graviers naturels par des recyclés à dosage en ciment constant. Ainsi on observe une diminution de 14% pour un taux de substitution de 30%. Cette diminution est attribuée à la moins bonne qualité des granulats. Pour des taux de substitution supérieurs à 30%

	BGN	BGR30	BGR65	BGR100
Ciment (kg/m ³)	360	360	427	448
Eau efficace (E_{eff}) (kg/m ³)	180	180	180	180
Eau additionnée (E_g) (kg/m ³)	-	10	42	53
Sable (kg/m ³)	703	780	957	930
Gravier naturel G1 (kg/m ³)	346	227	88	-
Gravier naturel G2 (kg/m ³)	692	429	131	-
Gravier recyclé GR1 (kg/m ³)	-	86	145	218
Gravier recyclé GR2 (kg/m ³)	-	164	218	326
Superplastifiant (l/m ³)	1.25	1.25	1.25	1.25
E_{eff}/C	0.50	0.50	0.42	0.40
E_{tot}/C	0.50	0.52	0.52	0.52
Volume de pâte (%)	29.6	30.6	36	37.8
Air content (%)	1.8±0.3	1.6±0.1	-	2.5±0.2
Affaissement (cm)	18±0.7	19.3±1.5	18.5±1	20 ±1,4
ρ (kg/m ³)	2280	2236	2188	2155
ρ (kg/m ³)	2287 ± 3%	2224 ± 2%	2190 ± 1%	2159 ± 1%

Tableau 2. Proportions des compositions de bétons étudiés.

deux phénomènes sont en compétition : l'augmentation du dosage du ciment et du dosage en granulats recyclés qui contribuent à l'augmentation des résistances mécaniques dans le premier cas et à sa diminution dans le deuxième. Les résultats concernant la variation du module d'élasticité sont en bon accord avec ceux de Casuccio et al [CAS 08] et Xiao et al [XIA 05]. La réduction du module est la conséquence de la présence des graviers recyclés caractérisés par un module d'élasticité plus faible et une porosité plus élevée par rapport aux graviers naturels [EVA 07]. La variation de la résistance à la flexion en fonction de la variation du module d'élasticité est illustrée dans la figure 1.a. Une corrélation linéaire est établie entre les valeurs normées du module et de la résistance. Ceci indique que la porosité élevée des graviers affecte de façon identique ces deux propriétés. Ces résultats sont en

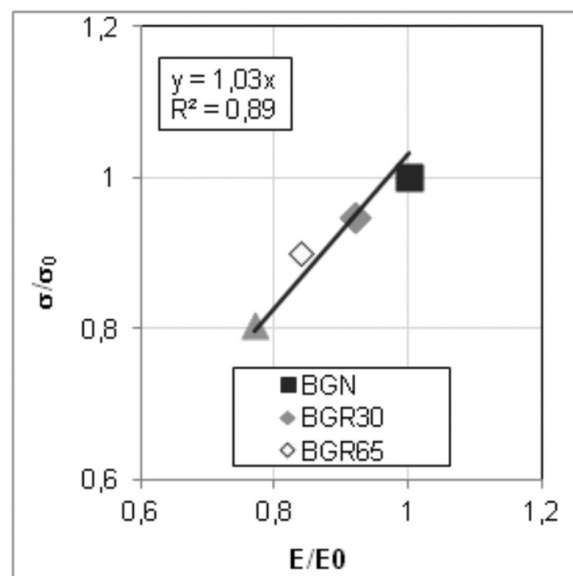
accords avec ceux établis par Evangelista et De Brito [EVA 07].

3.2. Analyse des déformations de compression au pic

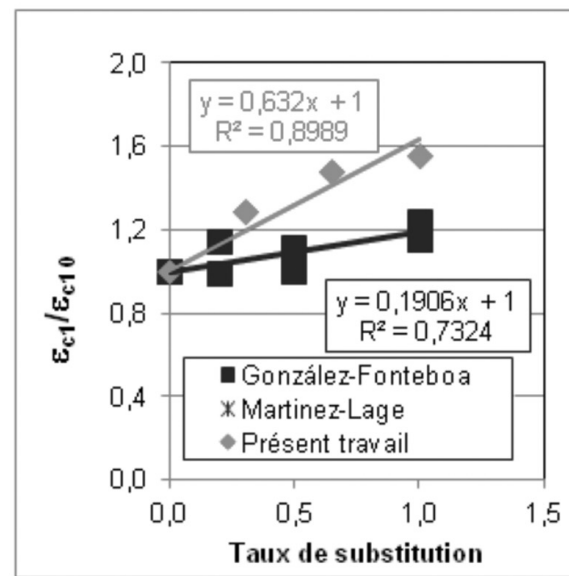
Les courbes contrainte-déformation ont été obtenues en compression uniaxiale pour tous les matériaux développés dans le cadre du présent travail. L'analyse de ces courbes montre que la déformation au pic, correspondant à la contrainte maximale, augmente en augmentant le taux de substitution. L'évolution de cette déformation, normée par celle obtenue pour les bétons de référence BGN, en fonction du taux de substitution est illustrée dans la figure 1.b. Nous avons également reporté les résultats obtenus par Belen et al. [BEL 11][GON 12] et Martínez-Lage et al. [MAR 12]. On observe une augmentation linéaire de déformation au pic normée en fonction du taux de substitution. Cependant, cette augmentation est plus conséquente dans le cadre de notre travail attribuée, probablement, aux conditions expérimentales adoptées. Par ailleurs, la forme de la courbe post-pic est d'autant plus étalée que le taux de substitution est important. Ces résultats mettent en exergue qu'une introduction de plus en plus importante de graviers recyclés est à l'origine d'un comportement plus dissipatif généré, probablement, par un endommagement plus progressif et diffus de part la nature des graviers.

	f_c (MPa)	f_t (MPa)	$E_{statique}$ (GPa)	$E_{dynamique}$ (GPa)
BGN	38.60	4.90	39.36	39.38
BGR30	33.30	4.60	36.28	36.68
BGR65	36.00	4.40	32.0	32.0
BGR100	39.20	3.90	30.34	31.03

Tableau 3. Valeurs moyennes des principales caractéristiques mécaniques à l'âge de 28 jours.



a)



b)

Figure 1 : a) corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la flexion, b) variation de la déformation au pic de contraintes.

4. MODÉLISATION DE LA COURBE CONTRAINTE-DÉFORMATION ET APPLICABILITÉ DE L'EC2

L'Eurocode 2 propose l'expression suivante pour prédire le module d'élasticité à partir de la résistance à la compression :

$$E = 22000 \left(\frac{f'_c}{10} \right)^{0.3} \quad [1]$$

Où E est le module d'élasticité et f'_c la résistance à la compression, tous deux exprimés en MPa. La validité de l'expression précédente a été vérifiée sur plus de 250 formules de béton à granulats naturels issues de la littérature [WEE 96][KIM 97][DON 01][WU 01][GES 02][ZHA 08]. Les résultats ont été reportés sur la figure 3. L'analyse des données montre que l'expression réglementaire de l'EC2 ne permet pas une prédiction correcte du module d'élasticité. Par contre, il apparaît que l'équation [2] permet une meilleure description des résultats expérimentaux :

$$E = 17553 \left(\frac{f'_c}{10} \right)^{0.42} \quad [2]$$

Nous avons reporté sur la figure 3 les valeurs obtenues pour les bétons à graviers recyclés dans le cadre de ce travail et celles de la littérature. L'analyse de cette courbe révèle que la nouvelle expression, Eq. [2], permet une meilleure prédiction du module d'élasticité que celle proposée à l'EC2. On peut observer, également, que la majorité des valeurs expérimentales se trouvent dans l'intervalle $\pm 10\%$ délimité par les deux courbes rouges pointillées. La relation entre E et f'_c ne semble pas affectée par la nature des graviers. La déformation au pic, ϵ_{c1} , est influencée par la vitesse de chargement et la taille de

l'éprouvette testée [CAR 85]. L'EC2 propose une expression permettant de calculer cette déformation en fonction de la résistance à la compression (Eq. [3]).

$$\epsilon_{c1} = 0.7(f'_c)^{0.31} \leq 2.8\text{‰} \quad [3]$$

La validité de cette expression a été vérifiée pour 66 bétons à granulats naturels de la littérature [WEE 96][DHO 07][SUR 08][PRA 09]. Les résultats représentés sur la figure 3.b prouvent que l'expression précédente de l'EC2 ne prédit pas de manière satisfaisante la déformation ϵ_{c1} . On montre que l'expression donnée par l'équation 4 est mieux adaptée pour le calcul de ϵ_{c1} :

$$\epsilon_{c1} = 0.11(f'_c)^{0.175} \text{‰} \quad [4]$$

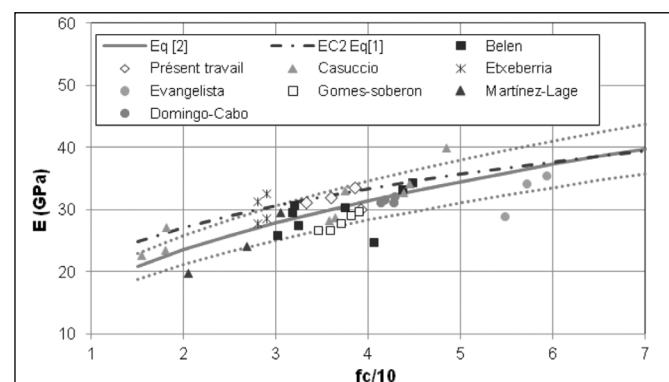


Figure 2. Module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression.

Pour la modélisation de la courbe contrainte-déformation, l'EC2 propose un modèle simple exprimé par l'équation Eq. [5] :

$$\frac{\sigma}{f'_c} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad [5]$$

Avec $\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$, $k = 1.05 E_{cm} \frac{\varepsilon_{c1}}{f_c}$, et E_{cm} le module sécant d'élasticité.

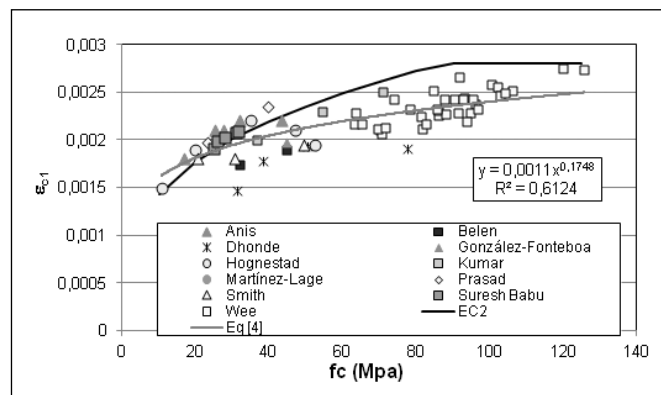


Figure 3. Déformation ε_{c1} en fonction de la résistance à la compression.

Le modèle nécessite la connaissance du module d'élasticité, la résistance à la compression et la déformation au pic ε_{c1} . L'application de ce modèle sur le béton à gravier recyclé montre qu'il ne reproduit pas de manière convenable le comportement post-pic. Une autre expression simple (Eq. [6]) a été proposée par Carreira et Chu [CAR 85]

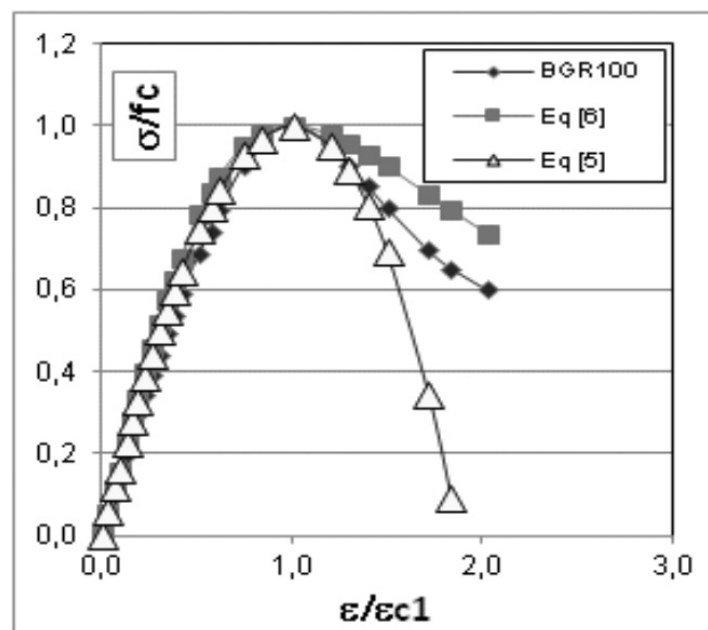
$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{\beta \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^\beta} \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{1}{1 - \frac{f_c}{E \varepsilon_{c1}}} \quad [6]$$

On propose d'utiliser les équations Eq. [2], Eq. [4] et Eq. [6] pour prédire l'allure de la courbe contrainte-déformation des bétons à graviers recyclés. La figure 4 représente une comparaison entre les courbes calculées en utilisant le

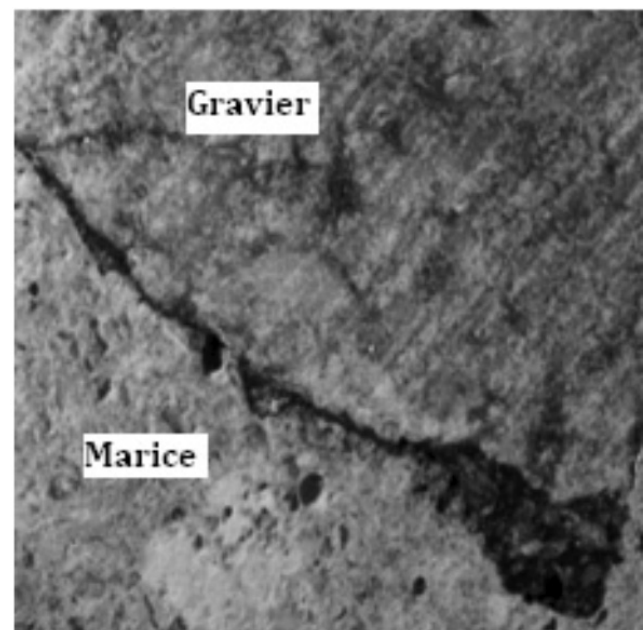
modèle Carreira modifié et l'EC2. Il apparaît que le modèle de Carreira modifié est mieux adapté pour prédire le comportement post-pic du béton à graviers recyclés que celui proposé par l'EC2.

5. CONCLUSION

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des graviers recyclés sur les propriétés mécaniques du béton. A partir d'une formulation de référence, les graviers naturels ont été substitués par des graviers recyclés à trois pourcentages volumiques 30, 65 et 100%. Les quatre formulations répondent à un cahier de charges qui impose une consistance S4 à l'état frais et une résistance à la compression d'environ 35 MPa à 28 jours. Sur la base des résultats expérimentaux, les principales conclusions sont : a) L'utilisation des graviers recyclés jusqu'à 30% n'affecte pas la demande en eau et la composition du béton par contre engendre une diminution de 14% de la résistance à la compression. En augmentant le taux de substitution, le dosage en ciment augmente pour maintenir le rapport E/C constant ce qui provoque une augmentation de la résistance à la compression contrebalançant l'effet des graviers recyclés. b) Les courbes contrainte-déformation obtenues montrent que la forme de la phase post-pic devient plus étalée par rapport au matériau de référence. En plus la déformation au pic augmente en augmentant le taux de substitution. Ces phénomènes s'expliquent par l'endommagement plus progressif et diffus des bétons dû à la présence des graviers recyclés (figure 4.b). c) La comparaison entre les équations [2] et [4] et celles proposées dans le cadre de l'EC2 montre que les modèles proposés dans le cadre de ce travail permettent une meilleure prédiction du module d'élasticité et la déformation au pic.



a)



b)

Figure 4 . a) Les courbes contrainte-déformation. b) Interface matrice-graviers recyclés.

6. RÉFÉRENCES

- [BEL 11] Belén, G.-F., M.-A. Fernando, et al. (2011). "Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate." *Construction and Building Materials* 25(5): 2335-2342.
- [CAR 85] Carreira, D. J. and K.-H. Chu (1985). "Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression." *ACI Materials Journal* 82(6): 797-804.
- [CAS 08] Casuccio, M., M. C. Torrijos, et al. (2008). "Failure mechanism of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials* 22(7): 1500-1506.
- [DHO 07] Dhonde, H. B., Y. L. Mo, et al. (2007). "Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Fiber-Reinforced Concrete." *ACI Materials Journal* 104(5): 491-500.
- [Don 01] Dong, Z. and W. Keru (2001). "Fracture Properties of High-Strength Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 13(1): 86-88.
- [EVA 07] Evangelista, L. and J. de Brito (2007). "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Composites* 29(5): 397-401.
- [GES 02] Gesoglu, M., E. Güneyisi, et al. (2002). "Effects of end conditions on compressive strength and static elastic modulus of very high strength concrete." *Cement and Concrete Research* 32(10): 1545-1550.
- [GON 12] González-Fontboa, B., F. Martínez-Abella, et al. (2012). "Structural recycled concrete: Behaviour under low loading rate." *Construction and Building Materials* 28(1): 111-116.
- [KIM 97] Kim, J.-K., C.-S. Lee, et al. (1997). "The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete." *Cement and Concrete Research* 27(11): 1719-1729.
- [MAR 12] Martínez-Lage, I., F. Martínez-Abella, et al. (2012). "Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate." *Construction and Building Materials Non Destructive Techniques for Assessment of Concrete* 37(0): 171-176.
- [PRA 09] Prasad, M. L. V., P. R. Kumar, et al. (2009). "Development of Analytical Stress-Strain Model for Glass Fiber Self Compacting Concrete." *International Journal of Mechanics and Solids* 4(1): 25-37.
- [SUR 08] Suresh Babu, T., M. V. Seshagiri Rao, et al. (2008). "Mechanical properties and Stress-Strain Behavior of Self Compacting Concrete with and without Glass Fibres." *Asian Journal of Civil engineering (Building and Housing)* 9(5): 457-472.
- [WEE 96] Wee, T., M. Chin, et al. (1996). "Stress-Strain Relationship of High-Strength Concrete in Compression." *Journal of Materials in Civil Engineering* 8(2): 70-76.
- [WU 01] Wu, K.-R., B. Chen, et al. (2001). "Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete." *Cement and Concrete Research* 31(10): 1421-1425.
- [XIA 05] Xiao, J., J. Li, et al. (2005). "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading." *Cement and Concrete Research* 35(6): 1187-1194.
- [ZHA 08] Zhao, Z., S. H. Kwon, et al. (2008). "Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy." *Cement and Concrete Research* 38(8-9): 1049-1060.

DURABILITÉ DES RÉPARATIONS DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ AVEC DES MORTIERS MODIFIÉS PAR DES POLYMÈRES

Inès Léana TCHETGNIA NGASSAM, Sandrine MARCEAU, Thierry CHAUSSADENT

Université Paris-Est, IFSTTAR, Département Matériaux et Structures, Cité Descartes,

F-77447, Marne La Vallée, France

ines-leana.tchetgnia-ngassam@ifsttar.fr

sandrine.marceau@ifsttar.fr

thierry.chaussadent@ifsttar.fr

INTRODUCTION

La durabilité des réparations effectuées sur des ouvrages en béton armé pose un vrai problème dans le génie civil en Europe. En effet, près de la moitié des ces rénovations se concluent par un échec prématuré marqué principalement par la réapparition de la corrosion sur les armatures ou le décollement du mortier de réparation. Ces travaux de rénovation représentent près de la moitié du budget européen dans le génie civil. Ils entraînent de nouvelles interventions à court terme et des coûts supplémentaires de restauration et d'interruption de service.

Pour qu'une réparation soit efficace, elle doit améliorer les performances de la structure, renforcer sa résistance,

apporter une étanchéité à l'eau, empêcher la pénétration d'espèces agressives à l'interface béton/acier et augmenter sa durée de vie. La réussite d'une intervention de réparation dépend de plusieurs paramètres [EMM 96, VAY 00] :

- La pathologie de la surface à réparer doit d'abord être clairement identifiée et traitée, et la préparation de surface doit être irréprochable,
- Le matériau de réparation appliqué doit être choisi en fonction de l'exposition et de l'environnement de l'ouvrage. Ce matériau doit être intrinsèquement durable et ses propriétés doivent être compatibles avec celles du support : compatibilité mécanique, thermique, chimique et de perméabilité [HAS 01].

– La qualité de l’application du produit sur le support et le respect des conditions de cure.

Pour cela, des produits de réparation ont été formulés spécialement pour répondre aux attentes des maîtres d’ouvrage. Ils doivent être conformes à la norme européenne NF EN 1504 « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité », applicable depuis le 1^{er} janvier 2009. Cette norme définit des principes et méthodes de réparation des structures en béton.

Deux types de produits de réparation sont majoritairement utilisés : des liants hydrauliques simples ou des liants hydrauliques modifiés par des polymères. Ces mortiers modifiés par des polymères occupent une place de plus en plus importante dans le panel des produits de réparation. Diverses recherches ont montré leurs performances intrinsèques élevées aussi bien en termes de tenue mécanique (résistance mécanique, force d’adhérence) [OHA 98] que de durabilité (porosité, perméabilité, faible diffusion d’agents agressifs...) [RAM 12]. En revanche, le comportement de ces produits après application ou encore leur impact sur la structure réparée, plus précisément sur les armatures en acier du béton armé, a été très peu abordé, que ce soit à court ou à long terme.

La présente étude vise à analyser l’influence des polymères présents dans les mortiers sur la qualité des réparations de surfaces en béton, notamment sur les propriétés d’adhérence. Pour cela, deux types de mortiers modifiés ont été fabriqués en utilisant deux poudres de polymère, du styrène acrylate (SA) et de l’éthylène vinyle acétate (EVA). Les mortiers ont été formulés en se basant sur la composition d’un panel de mortiers modifiés commerciaux. Leurs propriétés mécaniques et leur microstructure ont été évaluées en fonction des conditions de cure appliquées [TCH 12]. Pour évaluer la qualité de l’adhérence sur une surface de béton à réparer, un test d’adhérence basé sur le test de flexion 3 points a été mis en place. Les influences de l’environnement, de l’état de la surface du support et de la quantité et du type de polymère ont été étudiées.

1. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

1.1. Matériaux

Deux mortiers de réparation commerciaux modifiés par des polymères ont été sélectionnés, l’un avec des propriétés mécaniques élevées (M2) et l’autre avec de faibles pro-

priétés mécaniques (M4). Le tableau 1 résume les propriétés mécaniques de ces deux produits, en comparaison avec celles d’un mortier classique (M0) sans polymère. Le rapport eau / poudre utilisé correspond à la valeur recommandée par le fabricant. Les échantillons sont démoulés après 24 h et conservés pendant le durcissement dans trois conditions de cure différentes de durcissement :

- Cure en immersion dans l’eau : les échantillons sont immergés dans de l’eau à 20°C, correspondant à la cure recommandée pour les mortiers hydrauliques purs dans la norme sur les produits de réparation des ouvrages d’art (EN 1504-3),
- Cure sèche : 21°C et 60 ± 10% d’humidité relative, correspondant à la cure recommandée pour les mortiers modifiés par des polymères (EN 1504-3),
- Cure chaude : 40°C, ce qui peut correspondre à un environnement de chantier en été.

Les mortiers fabriqués en laboratoire se composent de ciment CEM I 52,5 N CE CP2 NF, de sable normalisé CEN 196-1, de poudre de polymère et d’eau. Les polymères utilisés sont des poudres commerciales de styrène acrylate (SA) et de poly (éthylène acétate de vinyle) (EVA). Leurs caractéristiques sont données dans le tableau 2.

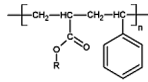
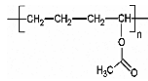
	Formule	Tg (°C)	pH
SA		-6	7.5 - 9,5
EVA		-7	6 - 9

Tableau 2. Propriétés des polymères commerciaux utilisés pour la formulation des mortiers préparés en laboratoire

Les éprouvettes de mortier de laboratoire ont été préparées avec des rapports massiques polymère / ciment (P/C) de 0, 5, 10 et 20%. Le rapport sable / ciment est fixé à 3, correspondant à la composition typique des mortiers de réparation commerciaux. La quantité de polymère correspond à environ 1 à 5% du mélange sec (ciment + sable + poudre de polymère). Les essais d’affaissement au mini-cône ont permis d’obtenir la quantité d’eau nécessaire par rapport à celle du ciment (E/C), ceci en se basant sur la valeur moyenne de l’affaissement des produits commerciaux [TCH 12]. Aucun additif, ni plastifiant n’a été utilisé. Les propriétés mécaniques et la porosité de ces mortiers faits en laboratoire sont rapportées dans le tableau 3 en fonction du type de cure appliquée.

	Résistance en compression (MPa)			Résistance en flexion (MPa)			Ratio eau/poudre
	T=21°C RH= 60%	40°C	Dans l’eau	T=21°C RH= 60%	40°C	Dans l’eau	
M0	46,7	48,3	56,1	7,1	9,1	8,7	0,12
M2	57,0	65,2	55,3	10,5	12,9	9.0	0,1
M4	26,0	25,1	28,8	7,1	6,0	6,3	0,16

Tableau 1. Principales propriétés des mortiers commerciaux M2 et M4 par rapport à un mortier classique M0

% polymère (P/C)		Résistance en compression (MPa)			Résistance en flexion (MPa)			Porosité (%)			Ratio eau/ciment
		T=21°C HR= 60%	40°C	Dans l'eau	T=21°C HR= 60%	40°C	Dans l'eau	T=21°C HR= 60%	40°C	Dans l'eau	
MO	0	46,7	48,3	56,1	7,1	9,7	8,7	13,0	13,0	12,8	0,49
	5	35,9	37,1	36,6	8,3	9,9	6,2	13,3	10,9	12,3	0,44
EVA	10	42,6	46,1	36,9	10,2	12,0	7,3	8,3	7,6	9,9	0,41
	20	41,1	54,1	43,6	12,3	13,3	8,8	8,1	4,1	7,1	0,36
SA	5	36,2	50,8	43,2	10,3	12,4	7,3	10,6	7,4	10,2	0,41
	10	41,2	57,7	44,1	12,4	14,7	8,2	7,9	4,8	8,2	0,37
	20	45,5	63,3	47,1	15,7	17,5	9,9	4,6	3,2	5,5	0,32

Tableau 3. Propriétés des mécaniques et porosité des mortiers faits en laboratoire et ayant subi différentes cures

1.2. Techniques expérimentales

Un test d'adhérence a été développé, basé sur les essais de flexion 3 points (Figure 1.a). Les échantillons sont des éprouvettes bi-composantes 40 x 40 x 160 mm³ (Figure 1.b). Une moitié de l'échantillon représente le support à réparer. Cette partie se compose d'un mortier classique durci au moins 28 jours et stocké dans un environnement de laboratoire (20±2°C et 60% d'humidité relative).

L'autre moitié de l'échantillon bi-composant est le mortier de réparation coulé dans le moule contenant la partie support (Figure 1.b). Les échantillons sont démoulés après 24 heures et stockés pendant un mois et trois mois avant le test dans les trois conditions de cure citées précédemment (immersion dans l'eau ; à 40°C et à 21°C / 60% HR).

Ces essais ont été réalisés avec deux types de rugosité de surface du mortier à réparer :

- des surfaces planes obtenues par sciage d'échantillons 40 x 40 x 160 mm³.
- des surfaces rugueuses obtenues par rupture des échantillons 40 x 40 x 160 mm³ par un essai de flexion 3 points.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Conditions d'une bonne adhérence

Selon le mode de rupture observé après le test d'adhérence, trois situations sont possibles [OHA 86, COU 98] :

- Rupture adhésive (A) : la fracture se produit à l'interface du mortier de réparation et du support.
- Rupture cohésive dans le support (S) : la fracture se produit dans la partie support.
- Rupture cohésive dans le mortier de réparation (M) : la rupture se produit dans le mortier de réparation.

Deux paramètres, la contrainte d'adhérence et le mode de rupture, sont donc mis en avant pour définir la qualité de l'adhérence entre la surface du mortier et le matériau de réparation. Idéalement, une bonne adhérence est définie par une contrainte d'adhérence élevée, au moins égale à la résistance en flexion du support.

De plus, une rupture cohésive signifie que la partie la plus fragile du système n'est pas l'interface entre le mortier et le support. Ainsi, une rupture cohésive peut être également considérée comme un signe de très bonne adhérence.

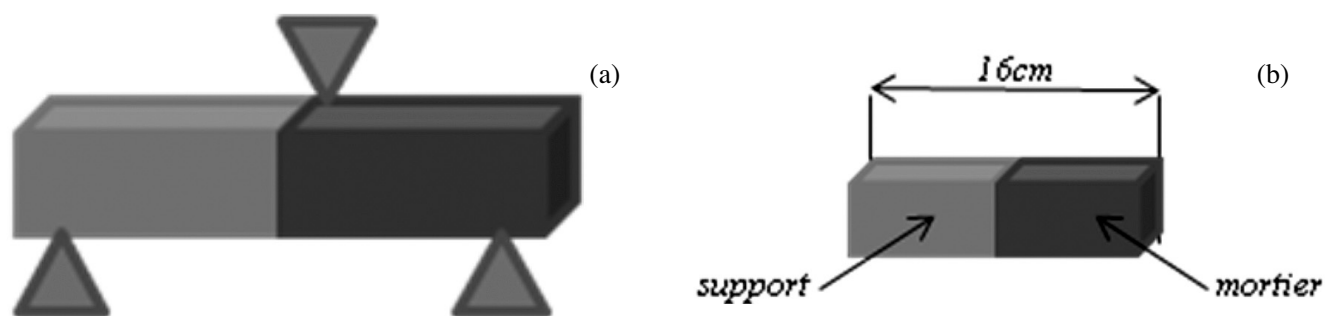


Figure 1. Test d'adhérence. (a) Test d'adhérence par flexion. (b) Echantillon bi-composant.

2.2. Adhérence après une cure sèche

La valeur des contraintes d'adhérence des mortiers de réparation sur une surface plane est reportée sur la figure 2 pour 28 et 84 jours de cure sèche

Sauf dans le cas du mortier classique, l'adhérence augmente avec le temps de cure. Cela peut être dû à la cinétique de formation des films de polymère. En effet, la matrice polymère devient plus dense avec le temps et la cohésion granulats/pâte de ciment est renforcée, tout comme l'interaction entre le mortier de réparation et la surface à réparer [OHA 98, VAN 05 et AGG 07].

De plus, on peut observer que l'adhérence du mortier non modifié sur le support est faible. Pour ce système, la contrainte d'adhérence est deux fois plus petite que la résistance en flexion du mortier classique. C'est la valeur d'adhérence la plus faible obtenue parmi tous les systèmes étudiés.

Après 28 jours, les contraintes d'adhérence les plus élevées sont celles obtenues avec les mortiers M2, SA10, EVA10 et EVA20. Elles sont supérieures à la résistance en flexion du mortier classique utilisé comme support. De plus, pour ces mortiers, la rupture a principalement lieu dans le support. Ces deux points montrent une bonne adhérence de ces produits à 28 jours. Par contre, pour les mortiers M4, EVA5 et SA20, la contrainte d'adhérence est du même ordre de grandeur que celle du mortier classique et la rupture se fait principalement à l'interface. Cela marque une faible adhérence de ces produits. Ainsi à cette échéance, l'adhérence la plus élevée pour les mortiers contenant du

SA est obtenue avec 10% de polymère, puis elle diminue lorsque le mortier contient 20% alors qu'elle croît et se stabilise à 10% pour les mortiers modifiés avec de l'EVA.

Après trois mois de cure, la contrainte d'adhérence augmente pour les mortiers modifiés. A l'exception des mortiers avec les rapports P/C de 5% et du mortier M4, elle est supérieure à la résistance en flexion du mortier classique. De plus, la rupture a lieu exclusivement dans le support, preuve d'une bonne adhérence. Il est à noter aussi qu'à cette échéance de trois mois, les mortiers contenant 10% et 20% de SA ont pratiquement la même contrainte d'adhérence.

Pour les produits commerciaux, le mortier ayant la résistance mécanique la plus élevée est celui qui possède la plus contrainte adhérence la plus grande.

Par contre, les mortiers contenant de l'EVA ont une contrainte d'adhérence plus élevée que celle des mortiers ayant du SA, alors que leurs propriétés mécaniques sont plus faibles (tableau 3). L'hypothèse suivante pourrait expliquer ce résultat.

L'extrémum observé pour les mortiers SA après 28 jours peut être dû à l'évolution de la fluidité entre les mortiers contenant une petite quantité de polymère et ceux en comportant une quantité plus importante, à consistance constante. En effet, la quantité d'eau influe sur cette fluidité : en travaillant à une consistance fixée, l'augmentation de la quantité de polymère conduit à la diminution de la quantité d'eau ajoutée. L'impact de la formulation est observé avec l'essai d'affaissement (Figure 3). En effet, les mortiers frais avec un rapport P/C de 20% de SA ont une

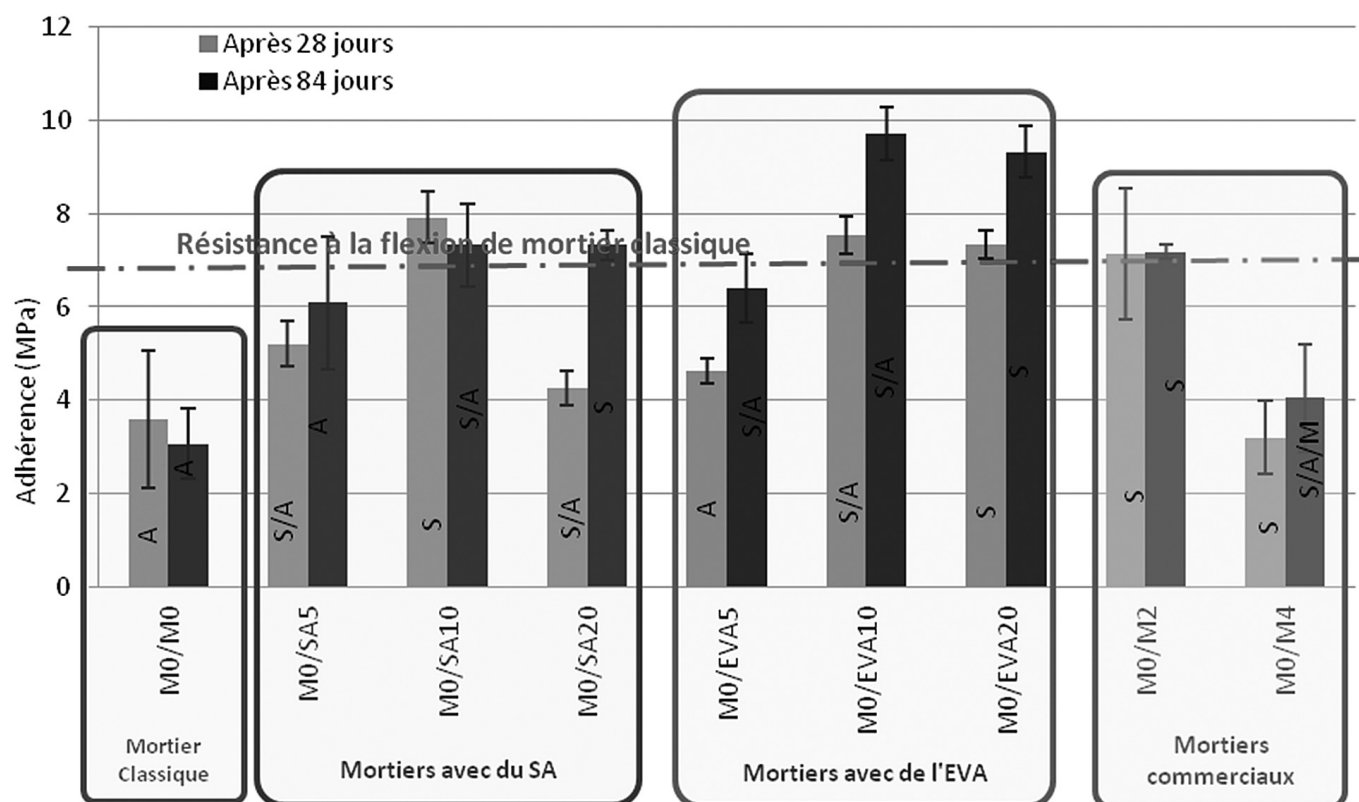


Figure 2. Adhérence et type de rupture en milieu ambiant des mortiers de réparation. Type de rupture : A pour l'adhésif, S pour cohésive dans le support, M pour cohésive dans le mortier de réparation

texture visqueuse et s’affaissent sous l’effet de leur poids (Figure 3.a). Les mortiers ayant seulement de 5% SA ont une texture plus liquide et s’étalent sous l’effet de l’eau qui facilite leur écoulement (figure 3.b). Ainsi, avec des petites quantités de polymère, la quantité d’eau élevée permet aux mortiers de s’étaler facilement et d’hydrater la face du support. Pour des quantités élevées de polymère, le mortier ne peut s’étaler facilement, en raison de la faible quantité d’eau. Le contact avec la surface du support est donc moins important et l’adhérence plus faible. Ainsi, les mortiers modifiés par l’EVA atteignent plus rapidement une contrainte d’adhérence maximale que les mortiers modifiés par le SA car l’action fluidifiante du SA et de l’eau est moins forte que celle de l’EVA et de l’eau.

2.3. Influence des conditions de conservation

Dans cette partie, afin d’étudier l’influence des conditions de conservation des éprouvettes sur l’adhérence des mor-

tiers, les échantillons ont été soumis à des environnements différents avant les mesures d’adhérence.

- Pour cela, les échantillons ont été exposés :
- 28 jours dans des conditions de cure sèche
 - 28 jours soit à 40°C dans une étuve, soit en immersion dans l’eau
 - 28 jours en cure sèche.

Après chaque période de 28 jours, les contraintes d’adhérence ont été mesurées. Les résultats des mesures sont reportés sur la figure 4.a pour les échantillons placés à 40°C et 4.b pour les éprouvettes immergées dans l’eau. L’exposition à une température élevée a un impact négatif sur l’adhérence du mortier classique. En outre, la rupture est purement adhésive. Ce résultat était prévisible, car une partie l’eau s’évapore dans ces conditions, ce qui limite l’hydratation du ciment. Pour les mortiers modifiés par des polymères, l’exposition à 40°C améliore l’adhérence. Cependant, après une nouvelle période de 28 jours dans les conditions de cure sèche, la contrainte d’adhérence mais le mode de rupture des échantillons et la contrainte d’adhérence ne changent pas de façon significative entre 28 jours et 84 jours.



Figure 3. Mortiers modifiés par du SA. (a) SA20%, (b) SA5%

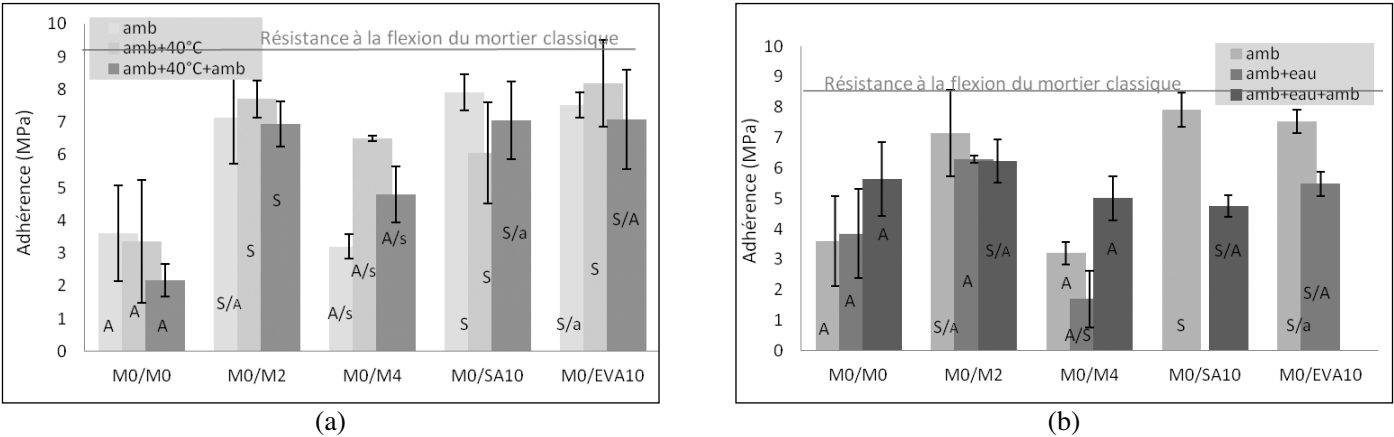


Figure 4. Evolution de la contrainte d’adhérence pendant 3 mois de conservation dans des environnements différents : (a) dans une étuve à 40°C (b) en immersion dans l’eau

L'immersion dans l'eau provoque une augmentation de l'adhérence du mortier non modifié. Ce résultat est également prévisible, parce que l'eau est disponible pour toute l'hydratation du ciment. Cependant, la rupture demeure adhésive et la résistance en flexion du mortier classique n'est toujours pas atteinte. Pour les mortiers modifiés, l'immersion dans l'eau tend à diminuer l'adhérence. Cela est dû au ralentissement de la formation du film polymère causé par un excès d'eau et une température trop basse [TCH 12].

Ainsi, comme pour les propriétés mécaniques intrinsèques, une température élevée augmente l'adhérence tandis que l'immersion dans l'eau la réduit. Ce résultat est confirmé par le fait que la majorité des ruptures sont cohésives dans le support à 40°C alors qu'elles sont adhésives lorsque les échantillons sont immergés dans de l'eau.

2.4. Influence de la rugosité

L'influence de la rugosité de surface du support a également été étudiée par coulage de mortiers modifiés avec 20% de SA sur une surface plane et une surface rugueuse. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes ayant subi une cure en milieu ambiant de 28 jours.

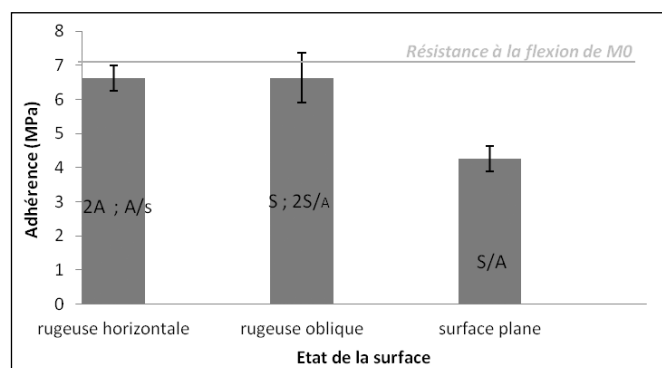


Figure 5. Influence de la rugosité de la surface de contact sur l'adhérence d'un mortier contenant 20% de SA

On peut observer sur la figure 5 que l'adhérence est plus élevée lorsque le mortier est cou l  sur une surface rugueuse. Cela est dû au fait que, pour la même section mise en jeu, la surface de contact entre les deux matériaux est plus importante sur un échantillon rugueux que celui non rugueux [COU 98].

CONCLUSION

Cette étude montre que les propriétés adhésives des mortiers modifiés par des polymères sont influencées par plusieurs facteurs:

La nature du polymère utilisé et sa quantité :   90 jours, l'adhérence augmente avec l'addition de polymère. Elle atteint sa valeur maximale à partir d'un rapport P/C de 10%. Les contraintes d'adhérence sont supérieures pour les mortiers modifiés par de l'EVA par rapport à ceux contenant du SA.

L'environnement dans lequel le système est exposé : la contrainte d'adhérence la plus élevée et une rupture cohésive dans le support sont obtenues majoritairement dans un environnement chaud.

La rugosité de la surface de support : l'augmentation de la rugosité conduit à une augmentation de la contrainte d'adhérence. Cependant, la rupture reste localisée à l'interface.

BIBLIOGRAPHIE

- [AGG 07] AGGARWAL L. K., THAPLIYAL P.C., KARADE S.R., « Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions », *Construction and Building Materials*, vol. 21, 2007, p. 379-383.
- [COU 98] COURARD L., « Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation », thèse de doctorat, Université de Li ge, 1998.
- [EMM 96] EMMONS P. H., VAYSBURD A. M., « System concept in design and construction of durable concrete repairs », *Construction and Building Materials*, vol. 10, 1996, p. 69-75.
- [HAS 01] HASSAN K.E, BROOKS J.J., AL-ALAWI L., « Compatibility of repair mortars with concrete in a hot dry environment », *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, 2001, p. 453-458.
- [OHA 86] OHAMA Y., DEMURA K., NAGAO H., OGI T., « Adhesion of polymer modified mortars to ordinary cement mortar by different methods », *Proceedings ISAP 86 Adhesion between polymers and concrete*, H.R. Sasse, Chapman and Hall, 1986, p. 719-729.
- [OHA 98] OHAMA Y., « Polymer-based Admixtures », *Cement and Concrete Composites* vol. 20, 1998, p. 198-212.
- [RAM 12] RAMLI M., TABASSI A., « Effects of polymer modification on the permeability of cement under different curing conditions: a correlation study includes pore distribution and compressive strength », *Construction and Building Materials*, vol. 28, 2012, p. 561-570.
- [TCH 12] TCHETGNIA N. I. L., MARCEAU S., LESPINASSE F., CHAUSSADENT T., « Physico-chemical properties and durability of polymer modified repair materials », *3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, 2012, Cape Town.
- [VAN 05] VAN GEMERT D., CZAMEKI L., MAULZSCH M., SCHON H., BEELDENS A., LUKOWSKI P., KNAPEN E., « Cement concrete and concrete-polymer composites: two merging worlds », *11th ICPIC Congress*, Berlin, 2004, *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, 2005, p. 926-933.
- [VAY 00] VAYSBURD A.M., EMMONS P.H., « How to make today's repairs durable for tomorrow – corrosion protection in concrete repair », *Construction and Building Materials*, vol. 14, 2000, p. 189-197.

INCORPORATION DE FINES DE BÉTON DE DÉMOLITION DANS LA FABRICATION DE MORTIER PAR SUBSTITUTION DU CIMENT

L. NElfia^a, P-Y. MAHIEUX^a, Ph. TURCRY^a, Y. AMINE^b, Ouali AMIRI^b

^a LaSIE FRE-CNRS 3474, Université de La Rochelle, Pole Sciences et Technologie, Avenue Michel Crépeau,
17042 La Rochelle, France

^b Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, Université de Nantes
(IUT de Saint Nazaire), 58 rue Michel Ange, 44600 Saint Nazaire, France

1. INTRODUCTION

Les enjeux environnementaux et économiques ont amené les acteurs publics et privés à s'associer autour d'un projet ambitieux et novateur qui consiste à réemployer 70 % en poids des déchets non dangereux de construction et de démolition (Directive européenne 2008/98/CE) à l'horizon 2020. Ce projet national intitulé RECYBETON est un défi visant non seulement à augmenter la quantité de déchets recyclés mais aussi à améliorer la qualité de ces « nouveaux » matériaux, jusqu'ici utilisés seulement en remblai notamment routier.

Chaque année, on estime à 20 millions de tonnes le volume total de déchets provenant du Bâtiment, dont 36 % de matériaux cimentaires [ADEME, 2010]. C'est une

quantité très élevée pour un coût de mise en décharge colossal alors que ces matériaux recyclables pourraient potentiellement constituer un gisement très important. Aussi, pour augmenter la recyclabilité des matériaux cimentaires, de nouvelles filières sont à explorer et aujourd'hui plusieurs voies semblent se distinguer avec, par exemple, la fabrication de ciments à base de béton de démolition directement dans le cru ou encore la conception de liants composés par substitution du ciment. Sur cette dernière thématique, l'enjeu est double puisque cette substitution viendrait de fait limiter les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie cimentaire, estimées aujourd'hui à 1 tonne de CO₂ pour 1 tonne de ciment produit dans le monde. De surcroît, dans la littérature, il existe très peu d'études dans cette thématique.

L’objet de notre étude suit cette deuxième thématique avec une approche en amont puisque le matériau expérimenté n’est pas un déchet du BTP mais un béton issu d’une récente étude nationale (projet ANR APPLLET). Ce choix s’appuie sur une volonté de travailler avec un matériau maîtrisé tant du point de vue physico-chimique que minéralogique afin de mieux appréhender l’influence des fines, obtenues par concassage de ce béton, introduites en substitution du ciment sur la réactivité, la maniabilité et les propriétés mécaniques de mortiers.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

2.1. Préparation et caractérisation des fines de béton

Les fines étudiées proviennent du béton C50/60 du projet ANR Applet fabriqué en 2007 [Aït-Mokhtar et al, 2013]. Ce dernier est composé d’un ciment de type CEM I 52.5 CP2 de l’usine de Dannes, d’une cendre volante allemande et de granulats calcaire 0/4, 5/12 et 12/20 du boulonnais. Les dosages en ciment et en cendres volantes sont respectivement de 350 kg/m³ et de 80 kg/m³ avec un rapport E/C de 0,45.

Les fines de béton ont été préparées selon un processus progressif de concassage de morceaux du béton « Applet » (après écrasement par compression d’éprouvettes 11x22 cm) et d’un criblage final à 80 µm. Après ce traitement, les fines représentent 60% du matériau initial. Les 40% restant se trouvent dans la classe granulaire 0,08/0,1 mm. Le criblage à 80 µm a été fixé arbitrairement pour garantir une finesse relativement élevée de la poudre ainsi obtenue (cf section 3.1). Les fines sont nommées “CC” dans la suite. Les caractéristiques physiques ont été déterminées à travers les mesures de : la surface spécifique

Blaine, la répartition granulométrique par granulométrie laser (CILAS 1190 LD) et enfin la masse volumique absolue par la méthode du pycnomètre. Quant aux caractéristiques minéralogiques, elles ont été déterminées par des Analyses Thermo-Gravimétriques (ATG).

2.2. Mortiers à base de fines CC : composition et caractérisation

L’étude de la substitution du ciment par les fines CC a été réalisée sur des éprouvettes mortiers 4*4*16 à raison de trois taux de substitution volumique (25, 50 et 75%). Le ciment utilisé est un CEM I 52.5 N (Lafarge, La Couronne) et le sable est siliceux d’étendue granulométrique 0/4 mm. Quatre compositions de mortiers (tableau 1) ont été préparées en maintenant constant le volume de pâte à 0,46 m³. À titre de comparaison, deux compositions complémentaires à base de filler calcaire (MEAC, Erbray) ont été étudiées. À l’état frais, la consistance des mortiers a été mesurée au mini cône (h=150 mm, d=100 mm). Les éprouvettes prismatiques 4*4*16 cm ont été coulées puis démoulées à 24h et conservées dans de l’eau à 20°C pendant toute la durée de la cure. Les résistances mécaniques des éprouvettes de mortier ont été mesurées aux échéances de 2, 7, 28 et 90 jours (tableau 1).

Parallèlement à cela, nous avons suivi le dégagement de chaleur d’hydratation des mortiers par la méthode calorimétrique semi-adiabatique Langavant [EN 196-9] pour étudier l’influence des fines CC sur la réactivité du ciment.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractérisation des fines CC

Les masses volumiques absolues, les surfaces spécifiques et les diamètres médians D_{50} des matériaux étudiés sont présentées dans le tableau 2.

	CEMI	Fine CC			Filler calcaire	
		0,25	0,5	0,75	0,25	0,5
Ciment (kg/m³)	499	374	249	125	374	249
Fines (kg/m³)	0	99	197	296	109	217
E/C	0,6	0,8	1,2	2,4	0,8	1,21
E/L*	0,6	0,63	0,67	0,71	0,62	0,64
Aff. (cm)	6,1	8,5	8,3	8	9,6	11,5
f_{c28} (MPa)	32,7	24,8	10,7	2,5	21,2	11,1
f_{c7} (MPa)	38,9	32,7	14	5,7	34,7	19,8
f_{c28i} (MPa)	48,1	38,4	16,4	4,2	37,3	17
f_{c90i} (MPa)	48,6	38,7	17,3	4,6	–	–

* L : Liant (C + Fines de béton)

Tableau 1. Composition et propriétés du mortier (kg/m³)

Matériaux	$\rho_{\text{obs.}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Surface spécifique (cm ² /g)	D ₅₀ (μm)
Fine CC	2,45	6200	8,8
Filler calcaire	2,72	4700	11,8
Ciment CEM I	3,19	4100	15,4

Tableau 2. Surface spécifique et masse volumique des matériaux étudiés

On note que la surface spécifique des fines CC est supérieure à celles obtenues sur le filler calcaire et le ciment CEM I. Compte tenu de ce résultat et de la simplicité de la méthode de préparation, on peut considérer que ce processus de concassage-criblage s'avère efficace pour obtenir des matériaux à finesse élevée. D'autre part les résultats des analyses par granulométrie laser confirment cette première observation puisque le D₅₀ de la fine CC est nettement plus faible que celui des deux autres matériaux. Au regard du résultat de l'analyse thermo-gravimétrique présenté sur la figure 1, on constate que la méthodologie employée n'affecte en rien la représentativité du matériau puisque la proportion massique de CaCO₃ mesurée est similaire à la proportion de granulats calcaires incorporés dans la formulation initiale du béton (environ 73%). De plus, la courbe DTG fait apparaître les pics liés à la déshydratation des C-S-H et de la Portlandite Ca(OH)₂. Sur cette dernière, la proportion mesurée tient compte du fait qu'elle

a été en partie consommée par la réaction pouzzolanique des cendres volantes présentes dans le béton. Ces premières informations se révèlent intéressantes car s'il existe des phases anhydres résiduelles dans les fines, nous avons toutes les raisons de penser que la finesse puisse être un paramètre clé dans la réactivité hydraulique des fines. Sur ce point, le modèle de Schindler [Schindler, 2004] montre que le degré d'hydratation ultime théorique "α_u" pour un béton avec un CV/C de 0,22 et un E/C de 0,45 est de 0,73. Autrement dit, si l'on considère que ce dernier est atteint pour notre béton âgé de 5 ans, alors nous pouvons penser que les fines préparées contiennent au moins 4% de phases anhydres résiduelles.

3.2. Influence des fines CC sur la rhéologie et la réactivité des mortiers

D'après le tableau 1, on constate que la consistance des mortiers à base de fines CC ou de filler calcaire est plus plastique comparée à celle du mortier OPC et ceci quelle que soit la substitution volumique. Au même titre que le filler calcaire, nous pensons que la substitution du ciment par la fine CC a eu pour effet d'augmenter la compacité du liant composé par un meilleur empilement des grains favorisant ainsi l'affaissement des mortiers. En effet, avec l'augmentation de la compacité, la quantité d'eau nécessaire pour remplir la porosité diminue, et l'eau en excès participe plus à la fluidification du mélange [Sedran, 1999].

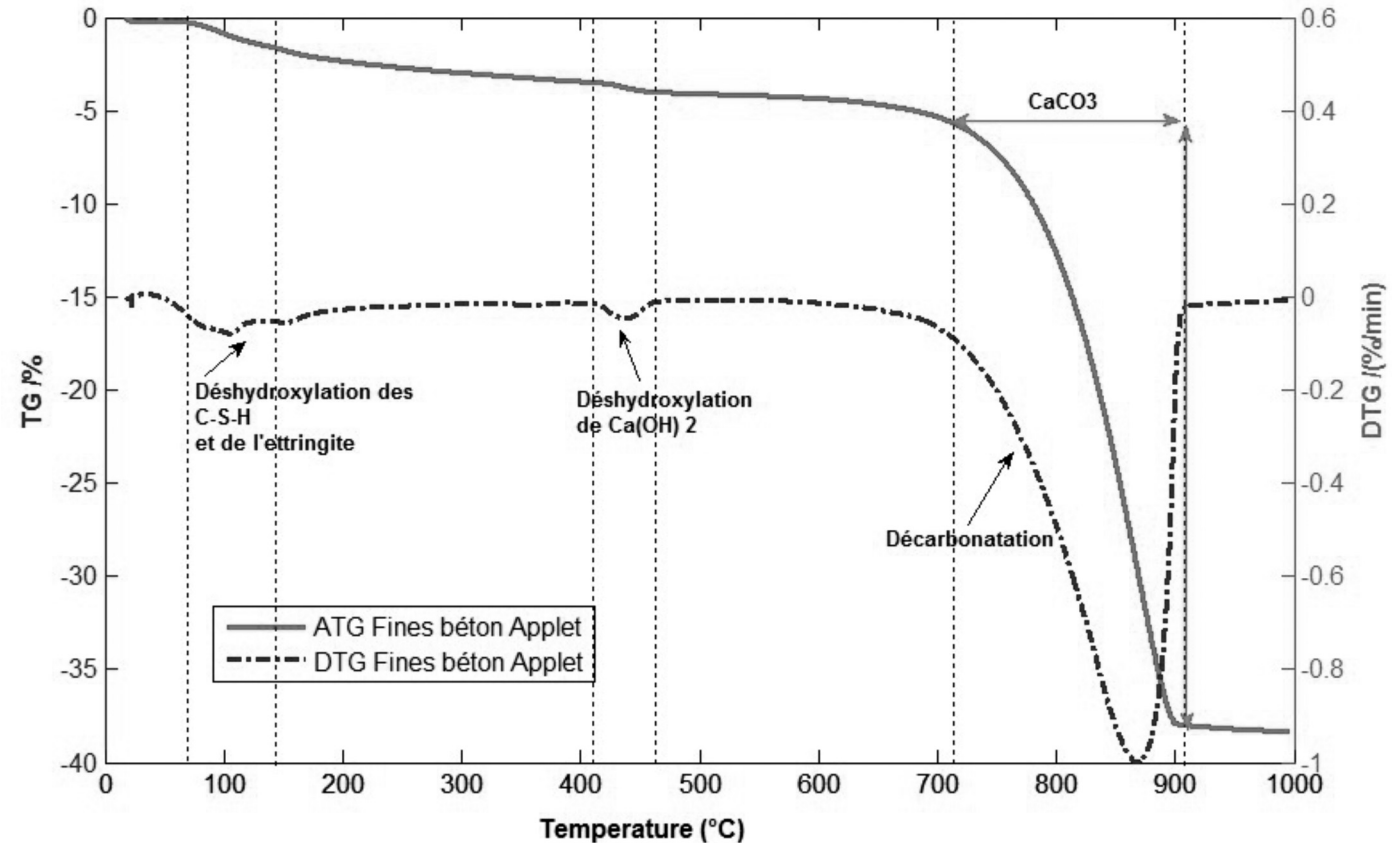


Figure 1. ATG et DTG des fines de béton CC

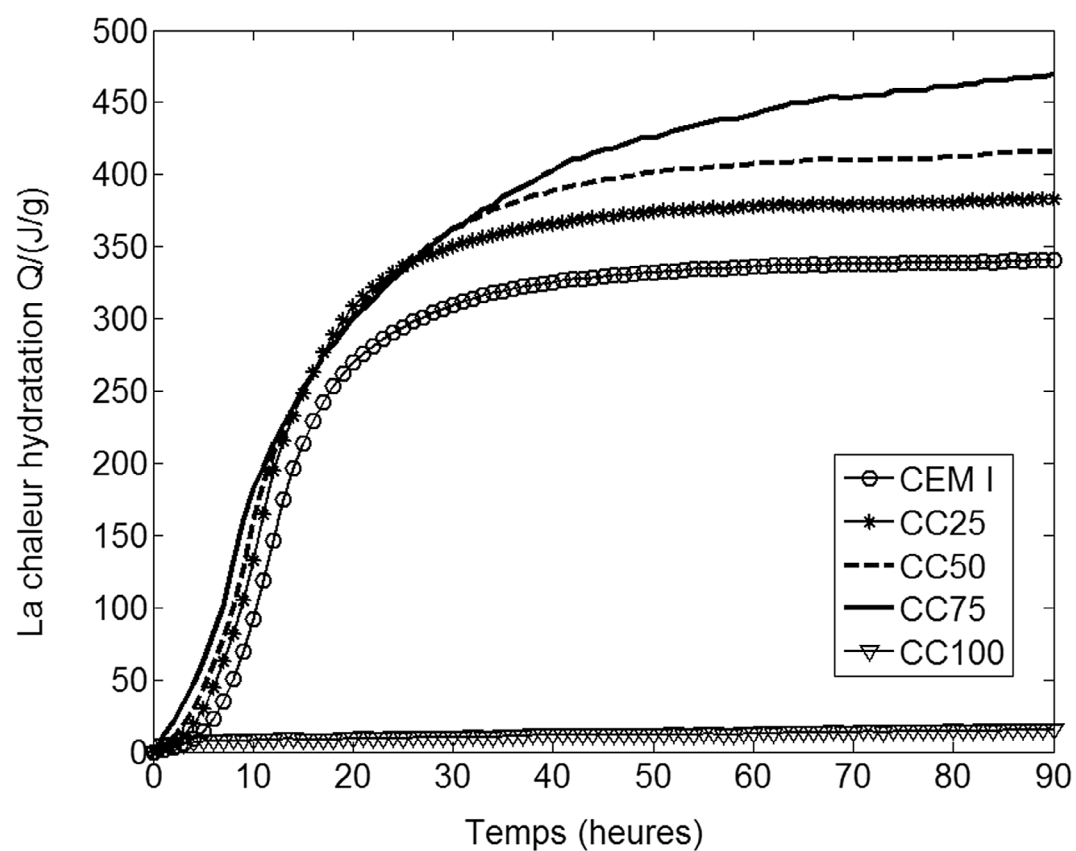


Figure 2. Evolution de la chaleur d'hydratation en fonction de l'âge et du taux de substitution des mortiers étudiés

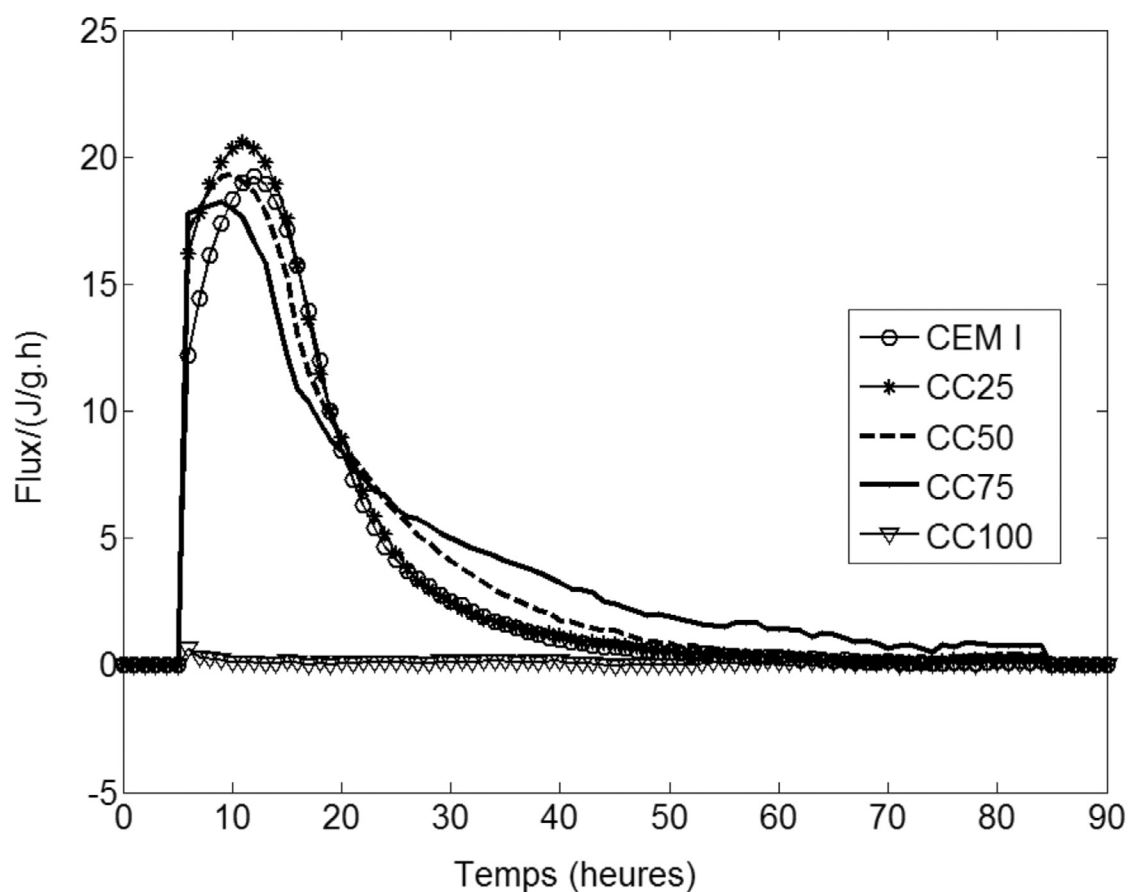


Figure 3. Flux de chaleur d'hydratation

Au-delà de la consistance, les résultats de la méthode calorimétrique montrent que les fines CC jouent aussi un rôle dans la réaction d'hydratation du ciment et ceci pour deux raisons majeures.

- La première est que l'apport de fines de béton, tout comme l'apport de filler calcaire, a pour effet d'augmenter et d'accélérer le processus d'hydratation du ciment par la création de sites de nucléation [Ye G et al., 2007]. Cet effet est très marqué puisque sur la figure 2, on constate que, plus le taux de substitution (de CC25 à CC75) est élevé, plus la quantité de chaleur dégagée à la fin de l'essai, exprimée en J/g de ciment, est élevée. De la même manière, on observe sur la figure 3 que la réaction d'hydratation est plus rapide en présence de fines CC puisque les flux de chaleur exprimés en J/g.h augmentent plus rapidement que le flux de chaleur du mortier CEM I.
- La seconde raison est que les fines de béton participent au dégagement de chaleur de par leur propre réactivité. Au regard de la courbe CC100 équivalente à un mortier dont le liant est constitué à 100% de fines, on constate que le dégagement de chaleur cumulé est proportionnel à la quantité de ciment anhydre que nous avons estimé précédemment (~ 4%).

Ces premiers résultats, montrent que la méthodologie employée pour la préparation des fines CC s'est révélée efficace pour rendre accessible à l'eau les particules de ciment anhydres résiduelles et qu'au-delà d'un effet filler bien marqué, ces fines réagissent et participent à la réactivité des mélanges.

3.3. Influence de la fine CC sur les caractéristiques mécaniques de mortiers

Sur la figure 4 sont présentées les évolutions des résistances relatives des mortiers à base de fines CC par rapport au mortier de référence OPC en fonction du temps et du taux de substitution.

Pour les fines CC comme pour le filler calcaire, on note que plus le taux de substitution est élevé plus la résistance relative est faible et ceci quelle que soit l'échéance. Cependant, pour un taux de substitution donné, les résistances relatives sont toutes plus élevées à 7 jours qu'à 28 jours. Cette observation est d'autant plus significative qu'elle confirme ce double effet d'accélération et d'augmentation de la réactivité hydraulique du ciment par les fines CC.

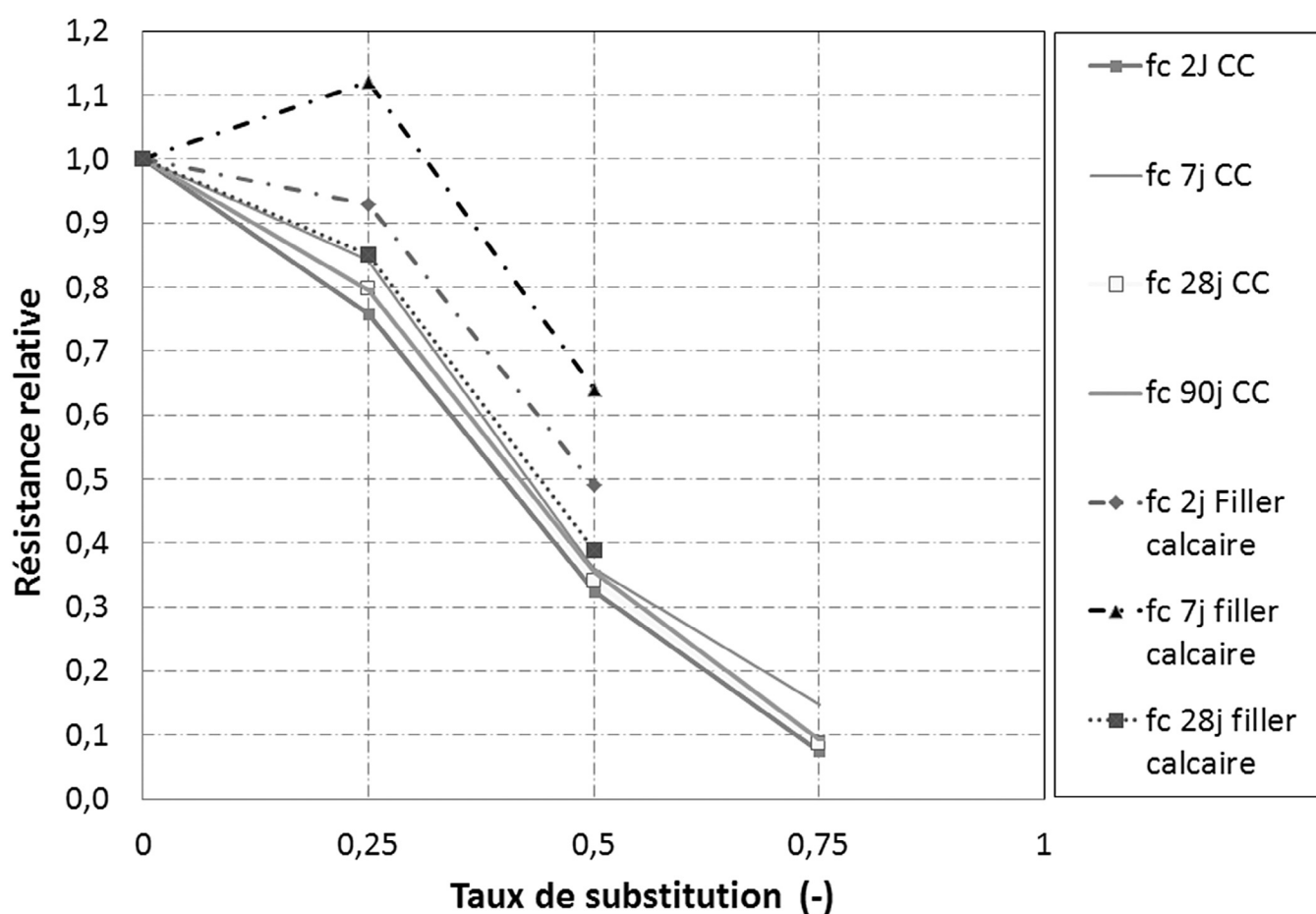


Figure 4. Influence du taux de substitution du ciment par des fines de béton et un filler calcaire sur les résistances relatives des mortiers étudiés

Quant au taux de substitution, il est évident qu'il doit être limité car la perte de performance mécanique est trop importante dès lors que l'on atteint les 50% de substitution. En revanche, si l'on se place selon les prescriptions imposées par la norme NF EN 206-1, où le taux de substitution est limité à 25 %, force est de constater que les résistances à 28 jours sont équivalentes à celles obtenues avec un filler calcaire classique. Il est donc, dans ce cas précis, tout à fait envisageable de substituer une partie du ciment par des fines de béton tout en conservant les propriétés rhéologiques et mécaniques.

D'autre part, il est possible d'évaluer l'activité χ_B des fines au sens de la relation de Bolomey [Bolomey 1935] donnée ci-dessous, selon l'approche proposée par [Khokhar, 2010].

$$f_c = K_B \left(\frac{C + \chi_B \times A}{E + V} - 0.5 \right)$$

avec : f_c est la résistance du mortier à l'âge considéré en MPa, K_B est le coefficient de Bolomey, C est la masse de ciment et E , celle de l'eau en kg/m^3 de mortier, χ_B est le coefficient d'activité de l'addition, V est le volume d'air en litre par m^3 de mortier et A , la masse d'additions exprimée en kg (dans notre cas, la masse de fines).

Aussi, sur la figure 5 nous présentons l'évolution de l'activité des fines CC et du filler calcaire en fonction du temps et du taux substitution.

En premier lieu, il est intéressant de noter que l'activité des fines CC est non nulle quelle que soit l'échéance et le taux de substitution. On observe même une activité supérieure pour une substitution à 75 % par rapport à celle de 50%. À titre de comparaison avec le filler calcaire, on note que l'activité est plus faible à court terme mais que cette tendance s'inverse avec le temps (χ_B équivalents à 28 jours). Ces observations corroborent bien tout ce que nous avons mis en avant précédemment à savoir que les effets de fines CC se multiplient sur les caractéristiques des mortiers à savoir : une amélioration de la compacité, une meilleure et plus rapide hydratation du ciment et enfin une hydratation résiduelle.

4. CONCLUSION

L'analyse des résultats de cette étude nous permet d'apprécier l'intérêt d'incorporer des fines obtenues par concassage / criblage de béton en tant qu'addition minérale dans la constitution d'un mortier. En effet, les fines étudiées possèdent, cinq années après le coulage du béton, un potentiel réactif non négligeable, rendu accessible par une simple

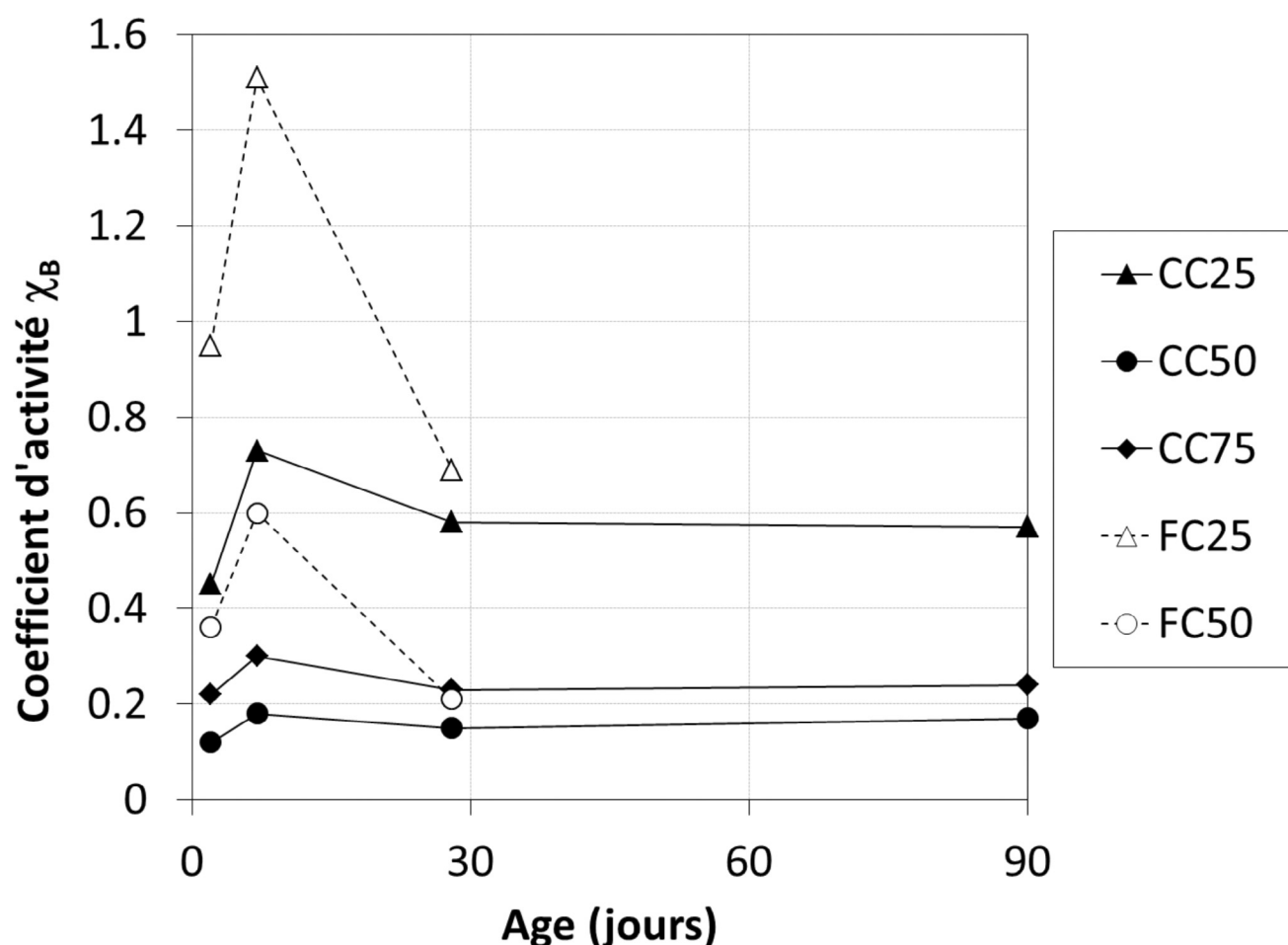


Figure 5. Coefficient d'activité selon la loi de Bolomey à différents taux de substitution de la fine CC et du filler calcaire

méthode de concassage et criblage. Par comparaison avec un filler calcaire, il semble que les fines de béton agissent de la même manière en accélérant et en augmentant la réactivité du ciment avec néanmoins des effets moins marqués à court terme. Il serait intéressant d'étudier plus en détails l'effet de la finesse sur la réactivité des fines et bien sûr d'étendre les recherches sur des bétons issus de la démolition. On peut noter que les résultats obtenus dans cette étude sont plus qu'encourageants pour le développement de nouvelles filières de valorisation des bétons de démolition.

5. RÉFÉRENCES

- [Aït-Mokhtar et al, 2013] A. Aït-Mokhtar, et al., Experimental investigation of the variability of concrete durability properties, *Cement and concrete research* 45 (2013) 21-36.
- [ADEME, 2010], Analyse technico-économique de 39 plateformes françaises de tri/valorisation des déchets du BTP, (septembre 2010).
- [Bolomey, 1935] J. Bolomey, Granulation et prevision de la résistance probable des bétons, *Travaux*, 19 (30), 1935, 228-232.

- [CGDD 2010] Commissariat Général au Développement Durable, 254 millions de tonnes de déchets produits par l'activité construction en France en 2008, *Chiffres et Statistiques* n° 164, octobre 2010.
- [EN 206, 2004] NF EN 206-1, Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité (Avril 2004).
- [EN 196-9, 2003] NF EN 196-9, Méthodes d'essais des ciments partie 9 : chaleur d'hydratation – Méthode semi-adiabatique (2003).
- [Khokhar, 2010] M.I.A. Khokhar, E. Rozière, Ph. Turcry, F. Grondin, A. Loukili, Mix design of concrete with high content of mineral additions: optimisation to improve early age strength, *Cement and Concrete Composites* 32 (5) (2010) 377-385.
- [Schindler, 2004] A.K. Schindler, Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials, *ACI Materials Journal*, 101 (1), 2004, 72-81.
- [Sedran, 1999] T. Sedran, Rhéologie et rhéomètre des bétons. Application aux bétons autonivelants, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [Ye G et al., 2007] Ye G, Lieux X, Poppe A-M, Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes, *Cement & concrete composites* 29 (2007) 94-102.

PERFORMANCE HYDRIQUE DE BÉTONS DE CHANVRE : EFFET DE L'ENDUIT SUR LEUR CAPACITÉ DE RÉGULATEURS HYDRIQUES

Florence COLLET, Sylvie PRETOT, Christophe LANOS

Université européenne de Bretagne, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, IUT Génie Civil,
3, rue du Clos Courtel - BP90422 35704 Rennes Cedex 7

florence.collet@univ-rennes1.fr

sylvie.pretot@univ-rennes1.fr

christophe.lanos@univ-rennes1.fr

1. INTRODUCTION

A l'issue du Grenelle de l'environnement, l'un des objectifs est d'atteindre 10% de matériaux bio-sourcés dans le bâtiment, hors bois d'œuvre, d'ici à 2020. Le béton de chanvre peut contribuer à atteindre cet objectif : c'est un matériau composé de chènevottes et, en général, d'un liant à base de chaux. Il est utilisé pour l'enveloppe de bâtiment en tant que matériau de remplissage. Pour une même utilisation (mur), différentes formulations peuvent être rencontrées en lien avec le mode de mise en œuvre (moulé, banché, projeté). De plus, le béton de chanvre est généralement enduit côté extérieur du mur et peut, ou non, être enduit côté intérieur. Plusieurs types d'enduit sont compatibles comme les enduits chaux-sable, chaux-chanvre ou terre-sable.

D'autre part, le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiments doit permettre de limiter les besoins énergétiques de ceux-ci tout en assurant un niveau de

confort satisfaisant. Ce comportement est lié aux caractéristiques thermiques et hydriques des matériaux mis en œuvre. Le béton de chanvre présente une conductivité thermique faible, de l'ordre de $0,1 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ [ARN 2000], [PRE 2009], [AMZ 2013], compatible avec une utilisation en isolation répartie. De plus, il présente de fortes capacités de transfert et de stockage de l'humidité (perméabilité à la vapeur de l'ordre de $2,5.10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}\text{.s}^{-1}\text{.Pa}^{-1}$ au point sec et isothermes de sorption caractérisée par une forte hystérésis [COL 2013]). Cependant, la réalisation de ces mesures en régime permanent s'avère longue et fastidieuse. La mesure des isothermes de sorption nécessite environ un an et demi selon la méthode discontinue par paliers successifs et la mesure de perméabilité à la vapeur deux à trois mois par couple d'hygrométrie.

Des études numériques ont montré que le comportement hydrique du béton de chanvre en régime transitoire permet de réduire les besoins énergétiques de bâtiments tout en

maintenant l'hygrométrie intérieure [TRA 2010][EVR 2010]. Cependant, Roels et al. [ROE 2010] ont montré que l'utilisation des données de sorption et de perméabilité à la vapeur ne permet pas une modélisation précise du tampon hydrique. Une caractérisation de la capacité de transfert et de stockage de l'humidité de ce matériau en régime transitoire s'avère donc opportune.

Afin de bien comprendre le rôle de ce matériau sur l'ambiance intérieure et donc sur le confort ressenti par les usagers dans des conditions réalistes d'utilisation, cette étude s'intéresse à la qualité de régulateur hydrique du béton de chanvre et à l'impact de l'enduit sur cette qualité. Nous focalisons sur l'échange hydrique à l'interface intérieure du bâtiment en sélectionnant des enduits représentatifs d'enduits artisanaux intérieurs. La valeur tampon hydrique est mesurée via des essais réalisés en régime dynamique sur des échantillons issus de blocs de béton de chanvre préfabriqués par moulage puis sur les mêmes échantillons enduits. Deux types d'enduits sont considérés : un enduit chaux-sable et un enduit chaux-chanvre.

2. MÉTHODE ET MATÉRIAUX

2.1. Méthode de caractérisation

La valeur tampon hydrique caractérise la capacité d'un matériau, ou d'un composant multi-couches, à modérer les variations d'humidité relative de l'air avoisinant. La défi-

nition de la valeur tampon hydrique d'un matériau (Moisture Buffer Value : MBV), ainsi qu'un protocole d'essai associé ont été proposés à l'issue du NORDTEST project [ROD 2005]. Ainsi, la valeur tampon hydrique est définie par :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A \cdot (HR_{haute} - HR_{basse})} \quad [1]$$

Δm : variation de masse au cours de la phase d'absorption / de désorption (g)

A : Surface d'échange (m^2)

HR_{haute} / HR_{basse} : humidités relatives haute et basse au cours du cycle (%)

Le principe du protocole d'essai associé est de soumettre les échantillons à des cycles d'humidités relatives journaliers afin d'être représentatifs des cycles rencontrés dans les bâtiments. Plusieurs couples d'humidité relative peuvent être considérés, le couple de référence étant 75 % HR / 33 % HR avec une durée d'exposition de 8 heures en absorption et de 16 heures en désorption. Le suivi massique des échantillons permet alors de déterminer la valeur tampon hydrique des matériaux. Ce protocole a été testé lors d'un round robin test impliquant plusieurs laboratoires européens, sur différents matériaux de génie civil : béton, briques, béton cellulaire, plâtre, bois... Une classification des matériaux a alors été proposée (figure 1).

Le banc d'essai utilisé est constitué d'une armoire climatique Vötsch VC4060 au sein de laquelle la température peut être régulée entre 10 et 95 °C et l'humidité relative

MBV [g/(m².%RH)] @8/16h

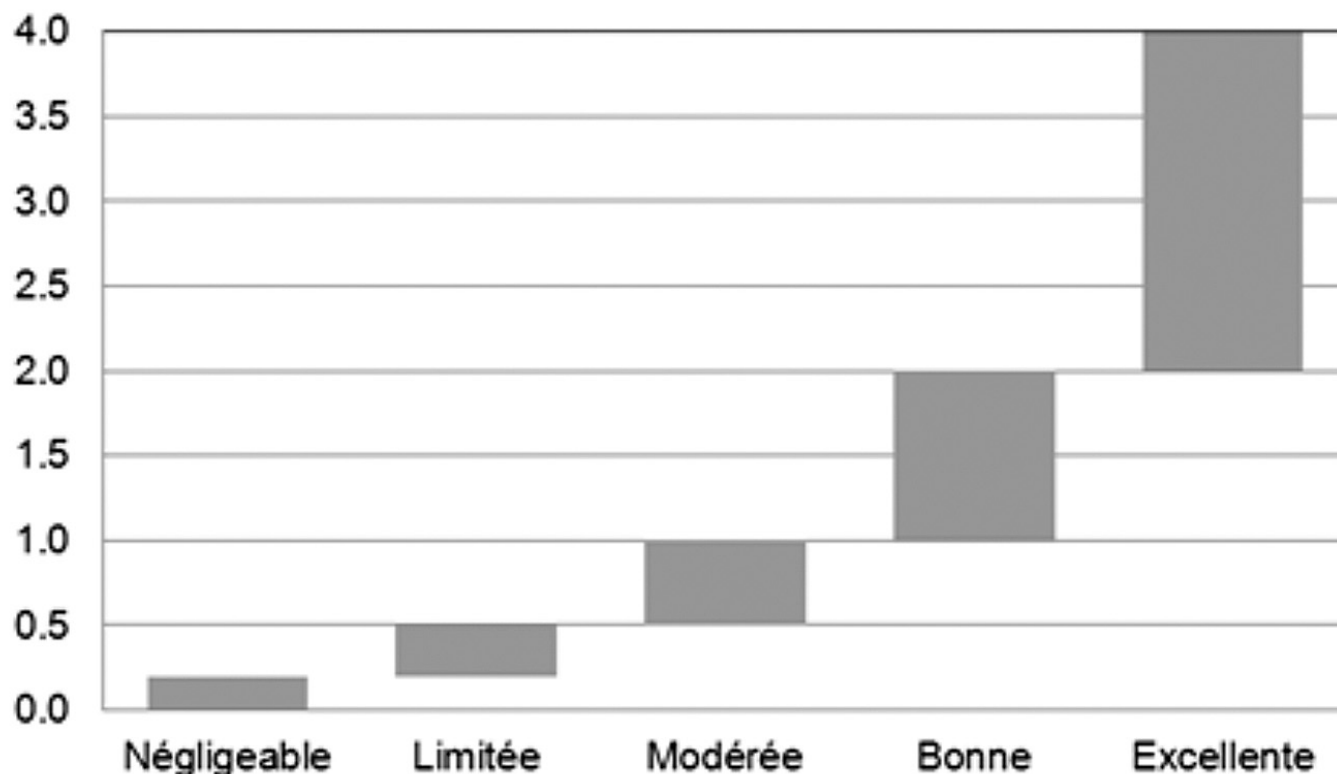


Figure 1. Classification des valeurs tampon hydrique (MBV) selon le Nordtest Project.

entre 10 et 98%. Les essais sont réalisés à 23°C. La consigne est changée manuellement au cours de l'essai selon le schéma 8/16 heures à 75/33 % HR. L'ambiance est enregistrée en continu avec des sondes sensirion SHT 75. La vitesse d'air est mesurée au voisinage des échantillons : les composantes verticales sont de 0,07 à 0,14 m/s alors que les composantes horizontales sont de 0,1 à 0,4 m/s. Les échantillons sont préalablement stabilisés à 23°C, 50%. Le suivi massique des échantillons s'appuie sur 5 pesées durant les phases d'absorption et 8 pesées durant les phases de désorption. Les cycles sont répétés jusqu'à ce que l'écart entre les variations de masse mesurées pour les cycles soit inférieur à 5% sur les trois derniers cycles.

2.2. Matériaux et échantillons

L'étude est réalisée dans un premier temps sur du béton de chanvre moulé puis sur le même béton de chanvre enduit. Le béton de chanvre est réalisé par moulage de blocs préfabriqués selon un process industriel. Sa composition est de 415 kg de chaux vive, 158 kg de chaux hydraulique et 3400 l de chanvre. Un mélangeur bi-vis contrarotatives assure le malaxage de la pâte de chaux préalablement préparée avec les chènevottes. Le remplissage des moules est amélioré par l'utilisation d'une table vibrante. Une fois démoulés, les blocs sont séchés à l'air libre. Pour cette étude, des blocs de 30*30*16 cm³ ont été réalisés selon le process de l'industriel partenaire. Le séchage des blocs, réalisé dans une ambiance contrôlée à 23°C et 50%, a été suivi par pesées. Des échantillons représentatifs de ces blocs ont alors été extraits pour effectuer les mesures de valeur tampon hydrique. Six échantillons sont testés. La surface d'échange de chaque échantillon est de 15×15 cm² conduisant à une surface totale d'essai supérieure à celle préconisée dans le Nordtest project (300 cm²). L'épaisseur des échantillons est de 7 à 8 cm afin d'être supérieure à la profondeur de pénétration estimée. La masse volumique moyenne des échantillons à 23°C, 50%HR est de 478 kg.m⁻³.

Après détermination de la valeur tampon hydrique du béton de chanvre, les échantillons sont enduits avec des enduits compatibles avec le béton de chanvre. Trois échantillons sont réalisés avec un enduit sable-chaux (Tradical 80M), les trois autres avec un enduit chanvre-chaux (Tradical 80M - Chanvribat). L'enduit sable-chaux présente un ratio massique sable/chaux de 1,17 et un ratio eau/chaux de 0,10. L'enduit chanvre-chaux présente un ratio massique chanvre/chaux de 0,11 et un ratio eau/chaux de 0,51. L'enduit est préparé au malaxeur. Les échantillons de béton de chanvre sont humidifiés afin d'assurer une bonne accroche de l'enduit. Celui-ci est ensuite appliqué à l'aide d'une taloche et d'un dispositif permettant d'assurer une épaisseur constante (1 cm) (figure 2). Les échantillons enduits sont stabilisés à 23°C, 50%HR avant de réaliser la mesure de la valeur MBV.

3. RÉSULTATS

3.1. Maîtrise de l'ambiance

Au cours de l'essai, la valeur moyenne d'humidité relative est légèrement inférieure à 75 % durant les phases d'absorption (environ 71,6 % pour le béton de chanvre nu et 72,6 % pour le béton de chanvre enduit) et légèrement supérieure à 33 % durant les phases de désorption (respectivement 33,7% et 34,7 %) (figure 3). Ceci est dû à l'ouverture régulière de la porte lors des pesées. D'autre part, lors des changements de consignes, le passage de 33 à 75% s'effectue en environ trente minutes, alors qu'il faut presque une heure pour passer de 75 à 33%. Selon la méthode du Nordtest project, le changement de consigne devrait idéalement s'opérer en moins de trente minutes, néanmoins Roels et Janssen [ROE 2005] ont montré que la durée de montée/descente en humidité relative avait un effet limité sur la valeur de capacité tampon hydrique (inférieur à 5%) même lorsque cette durée atteignait une heure et demie.



Figure 2. Mise en œuvre des enduits.

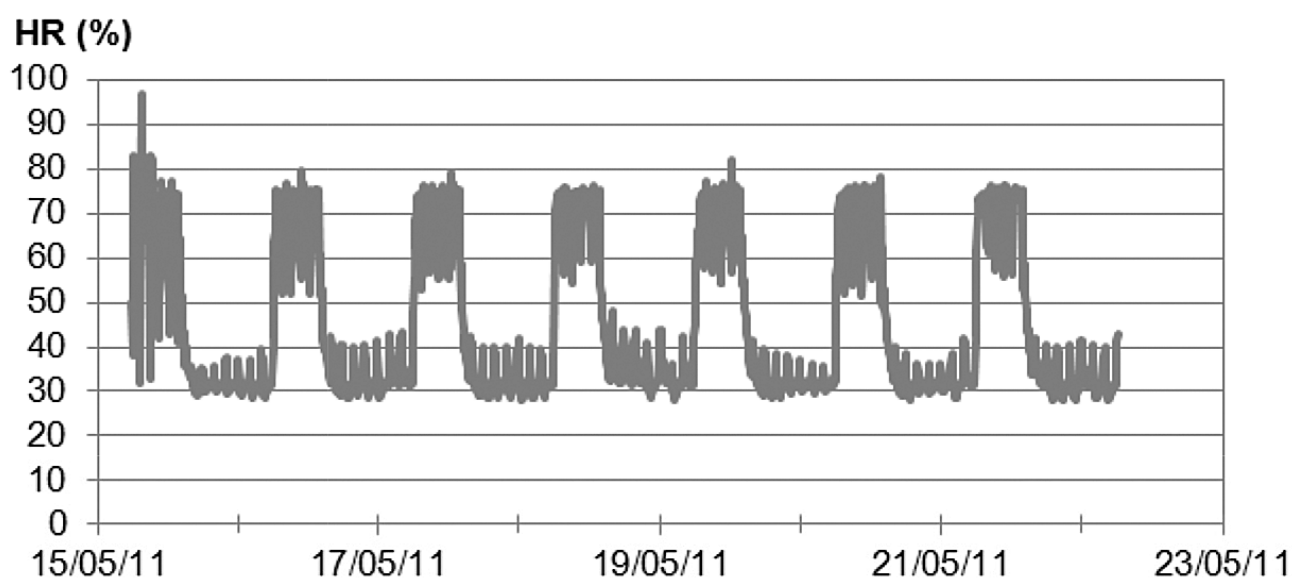


Figure 3. Ambiance lors de l'essai sur béton de chanvre seul.

3.2. Valeur tampon hydrique du béton de chanvre

Les échantillons de béton de chanvre étudiés, initialement stabilisés à 23°C 50% RH, sont d'abord soumis à une phase d'absorption. L'écart entre les variations de masse au cours des cycles devient inférieur à 5% entre les cycles 2 et 3 (Figure 4). Il n'apparaît pas de différence notable entre le comportement des différents échantillons. Pour chaque échantillon, la valeur tampon hydrique est calculée en absorption, en désorption et en moyenne au cours des cycles (Figure 5).

Les valeurs de MBV obtenues en désorption sont systématiquement légèrement supérieures à celles obtenues en

absorption (figure 5, tableau 1) et se traduisent en pratique par une tendance décroissante de la courbe de prise/perte de masse avant stabilisation (Figure 4). À terme, les prises et pertes de masse sont identiques au cours de cycles successifs et se traduisent par des valeurs de MBV identiques en adsorption et en désorption convergeant vers la valeur moyenne obtenue lors des cycles stables.

Pour chaque échantillon, la valeur tampon hydrique moyenne (MBV) est obtenue à partir des valeurs issues de l'ensemble des cycles stables (tableau 1). Les résultats obtenus pour les différents échantillons ne présentent pas d'écarts significatifs à l'exception de l'échantillon 49.8 qui révèle des performances un peu moindres que les autres échantillons. Extrait du même bloc que l'échantillon 49.7,

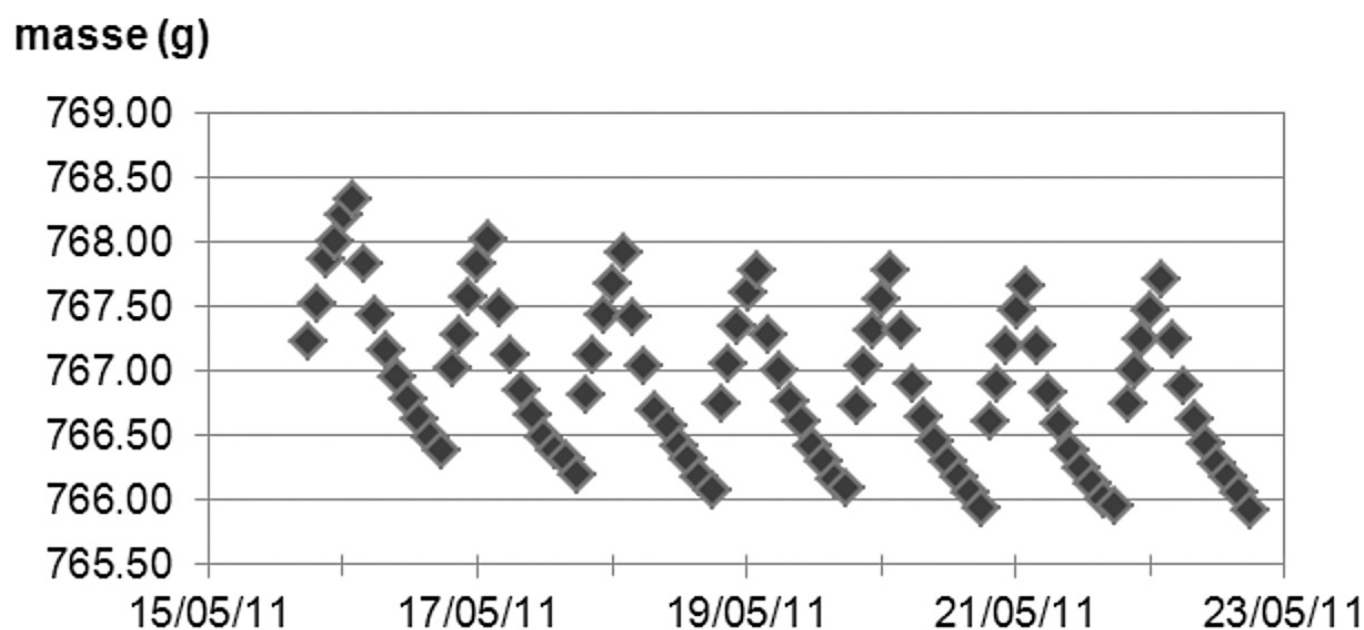


Figure 4. Cinétique de prise/perte de masse d'un échantillon de béton de chanvre (EASY-R 47.8)

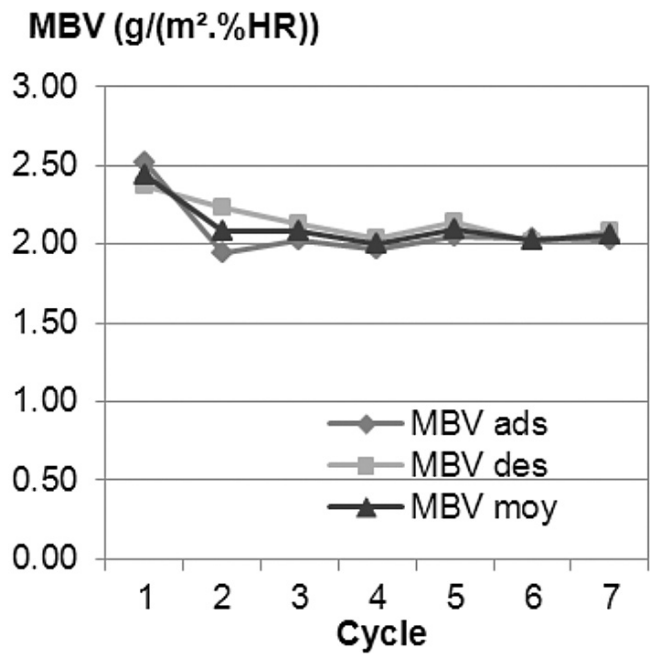


Figure 5. Evolution des valeurs tampon hydrique MBV au cours des cycles (EASY-R 47.8)

de masse volumique comparable à l'échantillon 47.8 (473 kg/m³), sa porosité ouverte en surface semble inférieure à celle des autres échantillons (figure 6).

Finalement, une valeur moyenne de MBV est obtenue pour l'ensemble des échantillons (tableau 1). Ainsi, pour le béton de chanvre moulé, le MBV déterminé dans cette étude est de 1.94 g/m².%RH à 8/16h 33/75% RH ce qui le place dans la catégorie des bons, presque excellent, régulateurs hydriques selon la classification du Nordtest Project (figure 1). Cette valeur est légèrement inférieure à celle obtenue pour du béton de chanvre projeté ayant une composition différente (2,15 g/(m².%HR)) [COL 2012]. Par comparaison avec les valeurs de MBV données dans le Nordtest project, le béton de chanvre est meilleur régulateur hydrique que le béton cellulaire (MBV = 1,04 g/(m².%HR)), le plâtre (MBV = 0,64 g/(m².%HR)) ou le béton (MBV = 0,38 g/(m².%HR)).

3.3. Valeur tampon hydrique du béton de chanvre enduit

Les échantillons de béton de chanvre enduits, initialement stabilisés à 23°C 50% RH, sont d'abord soumis à une phase d'absorption. L'écart entre les variations de masse au cours des cycles devient inférieur à 5% entre les cycles 3 et 4. Pour chaque échantillon, la valeur tampon hydrique est calculée en absorption, en désorption au cours des cycles et la valeur moyenne est présentée dans le tableau 2.

Echantillon	47.1	47.6	47.7	47.8	49.7	49.8	Moyenne	Ecart type
MBV _{moy ads}	1.89	1.84	1.99	2.01	1.91	1.72	1.89	0.10
MBV _{moy des}	2.00	1.94	2.09	2.11	2.02	1.81	2.00	0.10
MBV _{moy}	1.95	1.89	2.04	2.06	1.96	1.77	1.94	0.10

Tableau 1. Valeur tampon hydrique moyenne sur les cycles 2 à 7 du béton de chanvre non enduit

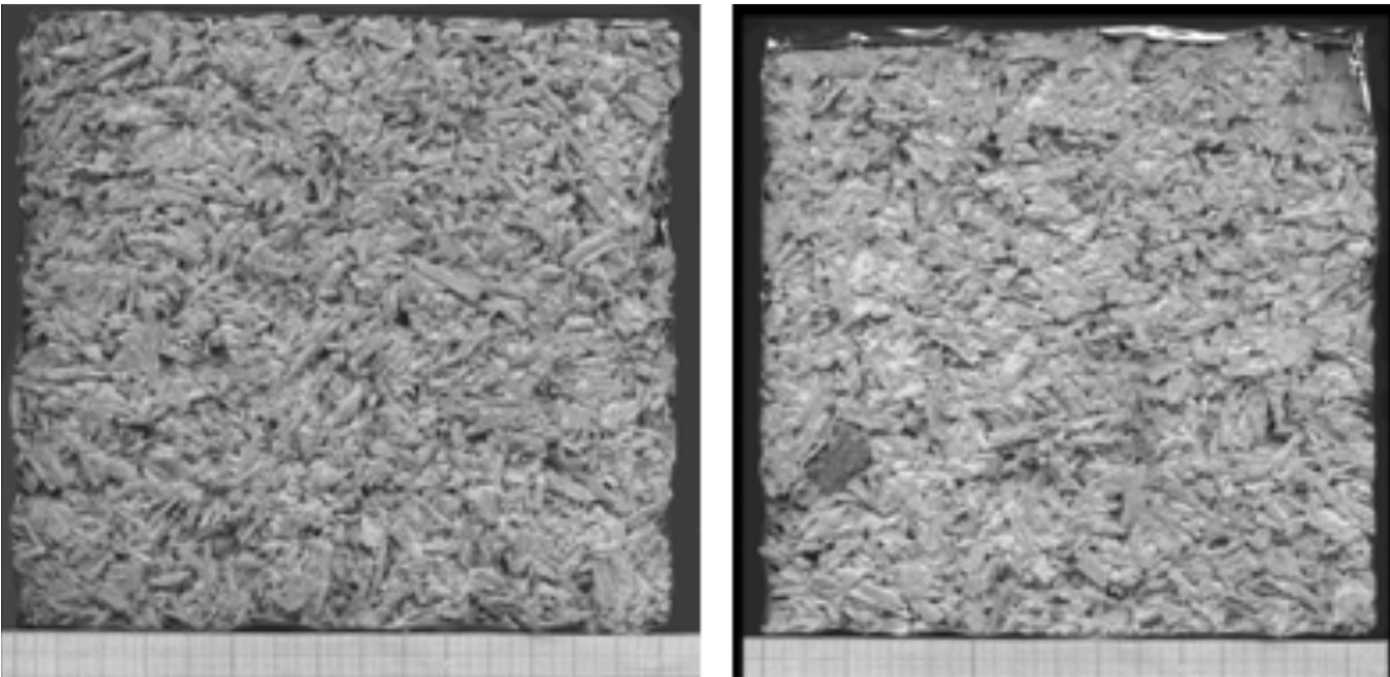


Figure 6. Etat de surface des échantillons EASY-R 47.8 (gauche) et 49.8 (droite)

Echantillon	47.1	47.6	47.7	Moy.	Ec. Type	47.8	49.7	49.8	Moy.	Ec. Type
Enduit	Sable-chaux					Chanvre-chaux				
MBV _{moy}	1.01	0.98	1.02	1	0.02	1.76	1.88	1.74	1.79	0.08

Tableau 2. Valeur tampon hydrique moyenne sur les cycles 3 à 7 du béton de chanvre avec enduit

Les valeurs MBV mesurées avec enduit présentent une très bonne homogénéité entre les différents échantillons ayant le même enduit. De façon générale, le béton de chanvre enduit présente une valeur MBV inférieure à celle du béton de chanvre seul.

L’enduit sable-chaux réduit fortement cette valeur : avec 1 cm d’enduit, la valeur MBV est de 1 g/m².%HR, soit 49 % inférieure à celle du béton de chanvre nu. Dans ce cas, la valeur MBV du béton de chanvre enduit est classée à la limite entre les catégories « modérée » et « bonne » selon la classification du Nordtest project.

L’effet de l’enduit chanvre-chaux est moins marqué : avec 1 cm d’enduit, la valeur MBV est de 1,79 g/m².%HR, soit 8 % inférieure à celle du béton de chanvre nu. Dans ce cas, la valeur MBV du béton de chanvre enduit est classée « bonne » selon la classification du Nordtest project.

Fort logiquement, plus l’enduit présente une porosité fermée, plus son effet sur la réduction de la valeur MBV est marqué.

3.4. Synthèse

La figure 7 présente les valeurs MBV de matériaux usuels et du béton de chanvre nu et enduit. Le béton de chanvre est largement meilleur régulateur hydrique que les matériaux usuels. Une fois couvert avec un enduit chanvre-

chaux, il reste bon régulateur hydrique. Une fois couvert avec un enduit sable-chaux, les performances restent comparables à celle d’un béton cellulaire et supérieures à celles d’un plâtre ou du béton.

4. CONCLUSION

La valeur tampon hydrique mesurée sur le béton de chanvre moulé, selon la méthode du Nordtest project, montre que ce matériau est un très bon régulateur hydrique. Cette caractéristique est plus ou moins réduite selon le type d’enduit utilisé. Pour un enduit fermé de type sable-chaux d’un centimètre d’épaisseur, la valeur tampon hydrique est divisée par deux. Pour un enduit plus ouvert de type chanvre-chaux, cette valeur est moins affectée. On observe alors une réduction de 8% seulement. Le choix de la nature de l’enduit et son épaisseur peuvent donc rapidement constituer des facteurs clés influençant la capacité hydrique d’une paroi et conditionnant directement le confort ressenti par l’utilisateur.

Pour caractériser le comportement hydrique des matériaux et des composants multi-couches en régime dynamique, la méthode MBV s’avère très pertinente. En outre, les cinétiques mesurées peuvent permettre de valider des modèles numériques prenant en compte les spécificités de comportement thermo hydrique du béton de chanvre.

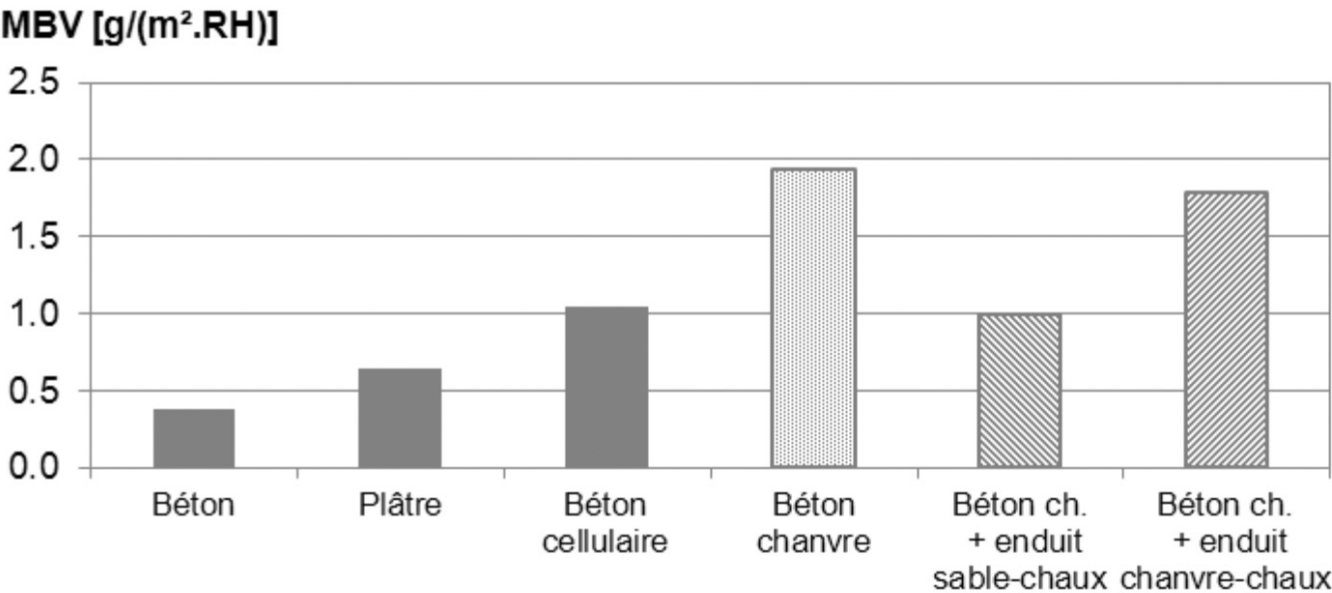


Figure 7. Valeur tampon hydrique (MBV) de matériaux usuels et du béton de chanvre moulé nu et enduit.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [AMZ 2013] Coordonateurs de l'ouvrage : Sofiane AMZIANE et Laurent ARNAUD, *Bio-aggregate-based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc, ISBN: 9781848214040, 2013.
- [ARN 2000] ARNAUD L., Mechanical and thermal properties of hemp mortars and wools: experimental and theoretical approaches, *3 Symp Int of bioresource hemp*, 2000.
- [COL 2012] COLLET F.(*), PRETOT S., Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete., *Construction and Building Materials*, 36, pp 58-65, 2012.
- [COL 2013] COLLET F.(*), CHAMOIN J., PRETOT S., LANOS C., Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes, *Energy and Buildings*, 62, pp 294-303, 2013.
- [EVR 2010] EVRARD A. and DE HERDE A., Hygrothermal performance of lime-hemp wall assemblies, *Journal of building physics*, July 2010 vol. 34 no. 1 5-25.
- [PRE 2009] PRETOT S., COLLET F., GLOUANNEC P., LANG V., Variation des propriétés thermiques de bétons de chanvre en fonction de la formulation, *Congrès français de thermique-Efficacité énergétique*, Vannes 2009, Tome 2, pp 865-870, Editions Société Française de Thermique, ISBN : 2-905267-67-2
- [ROD 2005] RODE C., Moisture buffering of Building Materials, Report BYG•DTU R-126, ISSN 1601 – 2917, ISBN 87-7877-195, 2005.
- [ROE 2005] ROELS S. and JANSSEN H., Is the moisture buffer value a reliable material property to characterize the hygric buffering capacities of building materials? *Working paper A41-T2-B-05-7 for IEA Annex 41 project, Whole Building Heat, Air and Moisture Response*, Trondheim, 2005.
- [ROE 2010] ROELS S., TALUKDAR P., JAMES C., SIMONSON C.J., Reliability of material data measurements for hygroscopic buffering, *International journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 5355-5363, 2010.
- [TRA 2010] TRAN LE A.D., MAALOUF C., MAI T.H., WURTZ E., COLLET F., Transient hygrothermal behavior of a hemp concrete building envelope, *Energy and buildings*, 42, pp 1797-1806, 2010.

INVESTIGATION EXPÉRIMENTALE ET MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DES BÉTONS INCORPORANT DES MATÉRIAUX À CHANGEMENT DE PHASE (MCP)

Sarra DRISSI^{1,2,3}, Anissa EDDHAHAK¹, Sabine CARÉ², Jamel NÉJI³, Johan COLIN¹

¹ Université Paris-Est - Institut de recherche en constructibilité, ESTP, 28 Avenue du Président Wilson
94234 Cachan cedex, France. sarahdrissi@hotmail.fr, aeddahak@adm.estp.fr, jcolin@adm.estp.fr

² Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, ENPC, IFSTTAR / 6-8 Av. Blaise Pascal,
77455 Marne La Vallée, France. sabine.care@ifsttar.fr

³ Université Tunis El Manar- Laboratoire de Matériaux, d'Optimisation et d'Energie pour la Durabilité, LAMOED -
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, BP 37, Le belvédère, 1002, Tunis. jamel.neji@enit.rnu.tn

1. INTRODUCTION

Les matériaux à changement de phase qui ont fait leur apparition sur le marché de construction depuis de nombreuses années continuent à attirer de plus en plus les professionnels dans le secteur des bâtiments. Par leur contribution à la réduction de la consommation d'énergie et au confort thermique [CAB 07], [KUZ 11], ces matériaux intelligents constituent une piste prometteuse pour la concrétisation opérationnelle des objectifs de la réglementation thermique et du programme du développement durable d'une manière générale.

Beaucoup d'études se sont intéressées à l'étude de ces matériaux et de leurs effets quand ils sont incorporés dans les matériaux de construction (plâtre, béton). La stabilité

des inclusions des MCP dans la matrice du béton a par exemple été analysée par [HAW 92]. Les travaux de [AGG 99] ont mis l'accent sur la faisabilité de l'utilisation des MCP dans le béton et en particulier sur l'effet de l'incorporation de la paraffine sur les propriétés mécaniques du béton. Plus récemment, les recherches de [EDD 13], [HUN 09], [MES 07] ont investigué l'effet des MCP sur les propriétés thermiques et mécaniques du béton. Il a été constaté par ces différentes recherches une chute de la résistance mécanique et une amélioration de la capacité à stocker la chaleur avec l'ajout des MCP.

Malgré les nombreuses études menées dans ce domaine, les performances de ces matériaux ne sont pas complètement maîtrisées. Par ailleurs, une grande dispersion des résultats de la caractérisation thermophysique liée notam-

ment aux différentes formulations considérés (teneurs en MCP, les méthodes d'incorporation par addition ou substitution) et aux méthodes de caractérisation, a été constatée. Dans ce contexte, le travail ici proposé est une contribution ayant pour objectif de bien comprendre comment ces matériaux intelligents peuvent être utilisés pour améliorer les propriétés thermiques du béton. Ce dernier est un matériau largement utilisé dans le génie civil, néanmoins ses performances thermiques intrinsèques sont limitées et ne peuvent répondre aux défis des nouvelles exigences de la réglementation thermique. Par ailleurs, le recours aux constructions massives en béton dans le but d'augmenter son inertie thermique ne constitue pas une solution pertinente en raison de la diminution de la surface habitable d'une part et le surcoût imputé par cette technique d'autre part. L'incorporation des MCP dans le béton permet de réduire l'épaisseur des parois de béton en lui conférant une chaleur latente outre sa chaleur sensible propre afin de renforcer sa capacité de stockage de chaleur et permettre de ce fait d'intégrer l'énergie dans la structure des bâtiments. Pour ces raisons, le béton a été choisi dans cette étude comme matrice pour les inclusions MCP. Une panoplie d'approches expérimentales est présentée pour la caractérisation des MCP et des bétons-MCP. Une approche par homogénéisation a été développée pour la prédiction des propriétés thermiques des bétons modifiés.

2. MATÉRIAUX ÉTUDIÉS ET PROTOCOLE D'ESSAIS

2.1. Les Matériaux à Changement de Phase

Les MCP considérés dans cette étude sont des MCP organiques de type Micronal® DS 5008 X commercialisé par BASF sous forme de poudre. Ces MCP contiennent une cire de paraffine encapsulée dans une microbille en polymère. La paraffine a une température de fusion voisine de 26°C et une enthalpie de transformation d'environ

110 kJ/kg. Des observations par Microscopie Electronique à Balayage (Figure 1) ont montré que ces matériaux ont une taille variable autour de 200 µm et se présentent sous forme d'agglomérats de milliers de microcapsules de 5 µm de diamètres environ. Les observations microscopiques ont été réalisées après avoir conditionné les MCP à différentes températures avant, pendant et après le changement de phase. Les observations n'ont pas révélé de différences significatives entre les différentes conditions d'essais.

2.2. Formulations des bétons-MCP

Le béton de référence a été formulée en considérant les proportions suivantes : 350 kg/m³ de ciment CEM II 32.5 R, 630 kg/m³ de sable 0/4 mm, 1100 kg/m³ de gravier 4/12 mm roulés avec un rapport E/C égal à 0.5. Trois fractions volumiques de MCP ont été considérées : $f_v = 1\%$, 3% et 5% par rapport au volume total du béton. Ils sont référencés respectivement B_1, B_3 et B_5. Pour des raisons de simplicité et de facilité de mise en œuvre, les MCP ont été rajoutés dans les bétons par simple addition. D'autre part, les MCP ont été incorporés à la fin de l'opération de malaxage afin d'éviter l'endommagement des capsules et la fuite de la paraffine dans le béton. Les échantillons destinés aux essais de mesure de la conductivité thermique sont de forme prismatique 7 x 7 x 28 cm³. Des échantillons cylindriques de dimensions 3 x 3 cm² ont été fabriqués pour l'analyse thermique par DSC. Après 24 h, les corps d'épreuve ont été démoulés puis conservés en condition endogène à 20°C pendant 28 jours.

2.3. Protocole d'essais

2.3.1. Chaleur spécifique

La mesure de la chaleur spécifique a été effectuée par la technique de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) en utilisant un appareil 204 F1 Phoenix Netzsch. Ces tests ont été effectués sous gaz inerte et à une vitesse de balayages de 1 K/min. Pour s'y faire trois mesures ont été

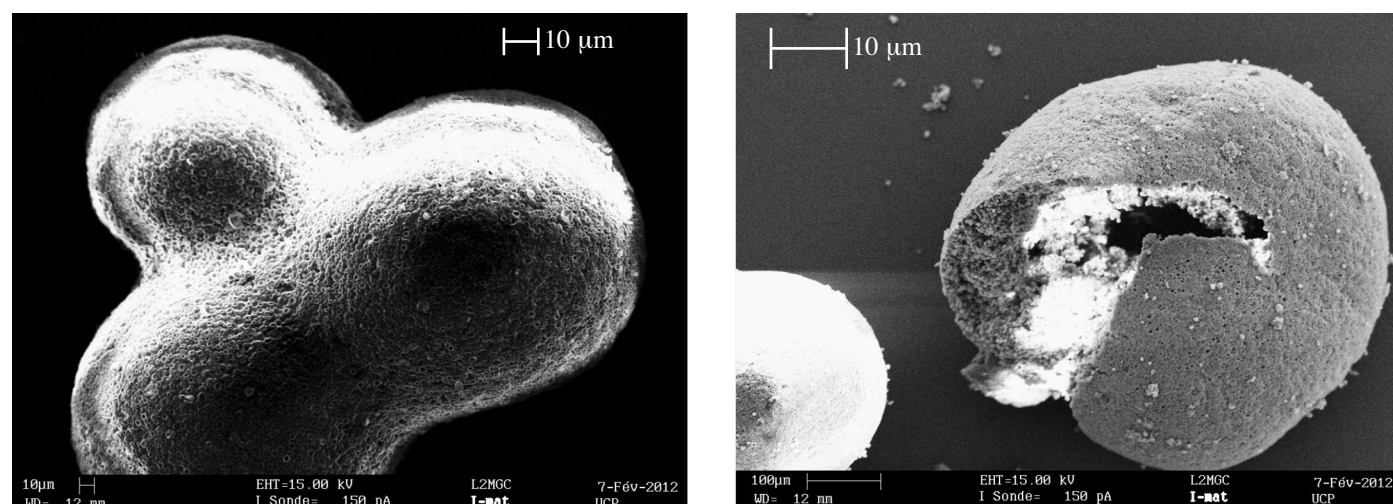


Figure 1. Observations microscopiques des MCP étudiés.

effectuées : une mesure de la ligne de base, une mesure de standard (saphir) et une mesure de l'échantillon de masse M_{ech} .

Les deux premières mesures (ligne de base + standard) permettent la détermination de la sensibilité calorimétrique de la DSC donnée par :

$$C = \frac{DSC_{saphir} - DSC_{ligne\ base}}{M_{saphir} \cdot Cp_{saphir} \cdot dT/dt} \quad (1)$$

Cela permet ensuite de déduire par une méthode dite de ratio la chaleur spécifique de l'échantillon question comme suit :

$$Cp = \frac{DSC_{ech} - DSC_{ligne\ base}}{M_{ech} \cdot C \cdot dT/dt} \quad (2)$$

Par analogie, les essais de mesure de chaleur spécifique sur les bétons-MCP ont été réalisés par DSC sur des petits fragments prélevés des échantillons cylindriques confectionnés (3 x 3 cm²). Les essais ont été répétés au minimum trois fois afin de s'assurer que le spécimen testé soit représentatif des hétérogénéités du matériau.

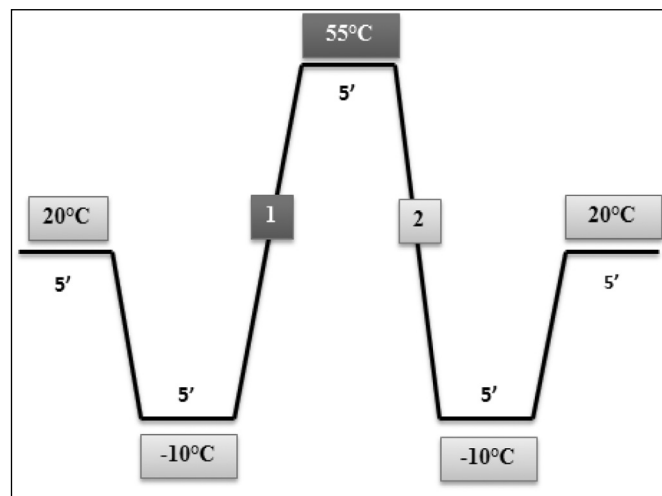


Figure 2. Programme d'essai DSC
(1 : segment endothermique, 2 : segment exothermique).

Le programme d'essai de DSC considéré pour la mesure de la chaleur spécifique aussi bien des MCP que les bétons-MCP est donné dans la figure 2.

2.3.2. Conductivité thermique

La conductivité thermique des MCP a été mesurée par la technique du Laser Flash en utilisant un appareil de mesure de diffusivité thermique MicroFlash™, modèle 457 de Netzsch. Les mesures ont été effectuées en mode dynamique sous une atmosphère inerte (Argon) à un débit de 100 ml/min et dans l'intervalle de température : -10°C – 55°C. Les MCP ont été placés dans un porte échantillon de 12.7 mm de diamètre et ont été couverts de graphite sur les faces avant et arrière afin d'augmenter l'absorption et l'émissivité du laser. La conductivité thermique est obtenue par :

$$\lambda(T) = \rho(T) \cdot Cp(T) \cdot \alpha(T) \quad (3)$$

Avec : λ : la conductivité thermique de l'échantillon (W/m K)

Cp : la chaleur spécifique massique de l'échantillon (J/kg K)

α : la diffusivité thermique mesurée directement (m²/s)

ρ : la masse volumique de l'échantillon (kg/m³)

Les mesures de la conductivité thermique sur les bétons-MCP ont été effectuées à des températures contrôlées par la technique « Hot Disk » en utilisant un appareil Hot disk™ TPS 2500 S de Thermal Constants Analyser selon la norme (ISO/DIS 22007-2.2). Cette technique repose sur la théorie de la source plane transitoire et fait l'hypothèse que le disque chaud est une source de chaleur se propageant d'une façon radiale et symétrique dans le matériau considéré comme un milieu semi infini [BOH 00].

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1. Cas des MCP

Les résultats de la figure 3 présentent l'évolution de la capacité calorifique massique des MCP mesurée par DSC dans la plage de température -10°C - 55°C. Les segments endothermique (de chauffe) et exothermique (de refroidissement) sont présentés.

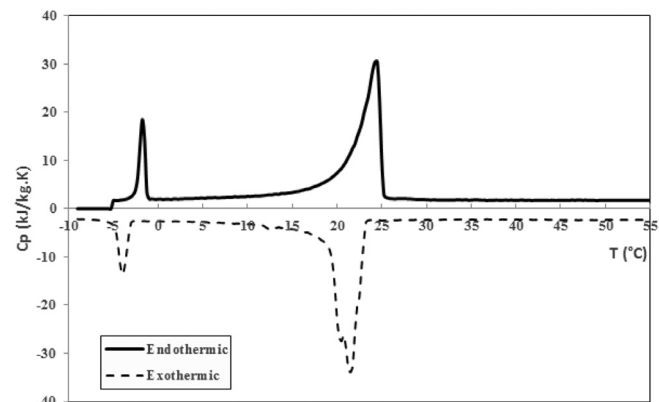


Figure 3. Evolution de la chaleur spécifique des MCP en fonction de la température par DSC.

Nous pouvons distinguer 2 pics : un premier petit pic situé à basse température probablement lié à la phase polymère des capsules MCP et un deuxième pic plus important qui traduit le changement de phase de la cire de paraffine. On note une chaleur spécifique sensible de l'ordre de 2.2 kJ/kg K et une capacité totale de stockage de chaleur de l'ordre de 140 kJ/kg. Cette dernière correspond à la somme de la chaleur latente de transformation et la chaleur sensible intégrée dans la plage de température 10°C - 30°C. Les valeurs obtenues sont en bon accord avec les résultats de la littérature [HUN 09]. L'histogramme de la figure 4 présente les résultats de la conductivité thermique des MCP à différentes températures par la technique du Laser Flash. On peut constater que les MCP présente une faible conductivité thermique. Les résultats obtenus sont proches des données fournies par le constructeur représentées par la

ligne horizontale en pointillée et supposées indépendante de la température.

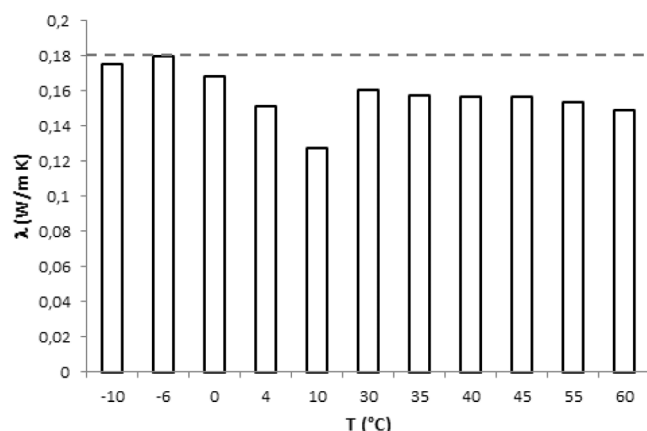


Figure 4. Conductivités thermiques des MCP obtenues par la méthode de Laser Flash.

3.2. Cas des bétons-MCP

Les résultats de la figure 5 illustrent l'accroissement de la chaleur spécifique des bétons-MCP avec l'addition des MCP. Le pic relatif au changement de phase est d'autant plus important que la teneur en MCP est importante. Par ailleurs, la variation de la chaleur sensible entre B_5 et B_3 est plus faible que celle observée entre B_1 et B_3 laissant présager une tendance de stabilisation.

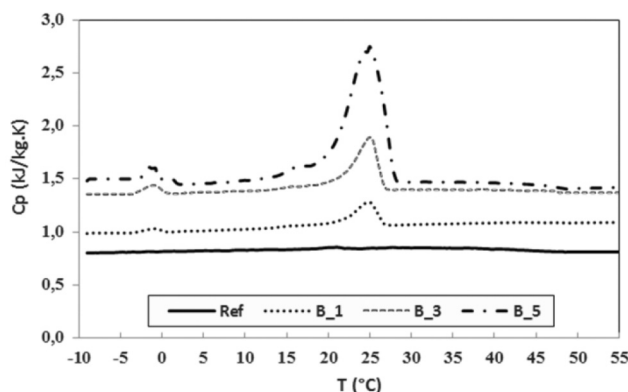


Figure 5. Evolution de la chaleur spécifique des bétons-MCP en fonction de la température par DSC.

La figure 6 présente l'évolution de la conductivité thermique des bétons-MCP mesurée à 30°C. On peut constater une légère diminution de la conductivité des bétons modifiés par rapport à la référence estimée à 6% en raison de la faible teneur en MCP.

Par ailleurs, des résultats moyennés très proches sont constatés au niveau des bétons B_1, B_3 et B_5 avec néanmoins une dispersion expérimentale non négligeable. Dans la prochaine section, les résultats expérimentaux de la phase béton et de la phase MCP seront utilisés dans un contexte d'homogénéisation pour la prédiction de la conductivité thermique équivalente du matériau hétérogène « Béton-MCP ». Les résultats expérimentaux issus de

la mesure par Hot Disk seront confrontés aux résultats de la simulation.

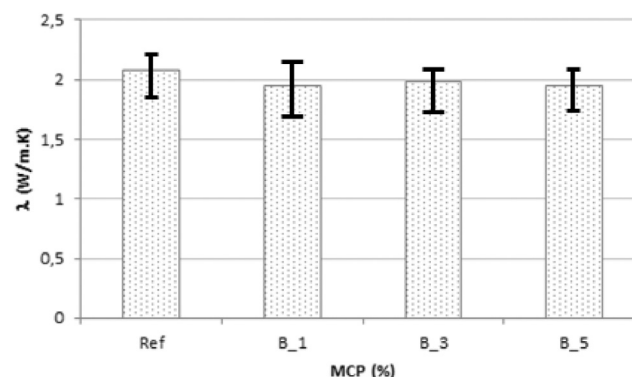


Figure 6. Conductivités thermiques des bétons-MCP obtenues par la méthode de « hot disk » (T = 30°C)

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Les bétons-MCP modifiés peuvent être considérés comme des matériaux biphasés constitués du béton de référence et des particules MCP. Dans ce cas, la conductivité thermique peut être prédite à partir de schémas d'homogénéisation en fonction des conductivités thermiques des deux phases $\lambda_{\text{béton}}$ et λ_{MCP} et de leurs fractions volumiques. Quelques exemples de modèles analytiques sont ici proposés (bornes et estimations) [Nai 05], [Do 08]. Dans la suite, nous considérons les conductivités thermiques relatives au béton de référence et aux MCP mesurées à 30°C respectivement égales à 2.08 et 0.16 W/mK

4.1. Bornes de Voigt et Reuss

En supposant que les inclusions des MCP sont réparties d'une façon homogène dans la matrice du béton, une estimation rapide des propriétés apparentes équivalentes du béton-MCP peut être donnée par les schémas d'homogénéisation simplifiés de Voigt et Reuss :

$$\lambda_{\text{hom}}^{\text{Voigt}} = \frac{\lambda_{\text{béton}} \cdot \lambda_{\text{MCP}}}{f_v \cdot \lambda_{\text{béton}} + (1 - f_v) \cdot \lambda_{\text{MCP}}} \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{hom}}^{\text{Reuss}} = f_v \cdot \lambda_{\text{MCP}} + (1 - f_v) \cdot \lambda_{\text{béton}} \quad (5)$$

Ces modèles sont classiquement connus par les lois des mélanges, ils permettent de donner un encadrement des propriétés homogénéisées du matériau hétérogène.

4.2. Les modèles inclusionnaires

La conductivité homogénéisée d'un matériau hétérogène à N phases peut s'écrire comme une somme des conductivités thermiques des différentes phases λ_i pondérées par la fraction volumique de chaque phase f_i :

$$\lambda_{\text{hom}}^{\text{diffus}} = \sum_{i=1}^N f_i \cdot \lambda_i \quad (6)$$

Avec A_i le tenseur de concentration de la phase i dont l'expression peut être obtenue en utilisant la solution d'Eshelby qui permet de construire différents schémas d'estimation de la conductivité thermique homogénéisée dont 2 exemples sont donnés ci-dessous.

Dans le cas d'une inclusion ellipsoïdale noyée dans un milieu isotrope, le tenseur de concentration de l'inclusion (ici MCP) s'écrit sous la forme [DO 08] :

$$A_{MCP} = [I + (\lambda_{MCP} - \lambda_{béton}) \cdot P_{MCP}]^{-1} \quad (7)$$

Avec : P_{MCP} est le tenseur de Hill qui dépend du facteur de forme (noté s) de l'inclusion et de la conductivité thermique de la matrice.

Dans le cas particulier d'un milieu isotrope, les seules composantes non nulles du tenseur de Hill sont :

$$\begin{cases} P_{11} = \int_0^1 \frac{x^2}{\lambda_{béton}(s^2 - (s^2 - 1)x^2)} dx \\ P_{22} = P_{33} = \int_0^1 \frac{s^2(1-x^2)}{2\lambda_{béton}(s^2 - (s^2 - 1)x^2)} dx \end{cases} \quad (8)$$

Dans notre cas, les MCP sont de forme sphérique. En conséquence s est égal à 1 et $P_{11} = P_{22} = P_{33}$.

4.2.1. Le modèle de Mori Tanaka

Ce modèle suppose que l'inclusion de forme ellipsoïdale immergée dans une matrice solide est soumise à un gradient de température fictif. Ainsi, la solution de ce problème permet l'estimation du tenseur de concentration relatif aux inclusions des MCP par :

$$A_{MCP}^{MT} = A_{MCP} [(1 - f_v)I + f_v A_{MCP}]^{-1} \quad (9)$$

Avec : A_{MCP} : le tenseur de concentration relative aux MCP et I : la matrice identité.

Le tenseur de la conductivité thermique homogénéisée du béton-MCP est estimé selon l'approche de Mori-Tanaka par :

$$\lambda_{hom}^{MT} = \lambda_{béton} + f_v (\lambda_{MCP} - \lambda_{béton}) \cdot A_{MCP}^{MT} \quad (10)$$

En faisant l'hypothèse que le matériau est isotrope, les équations précédents amènent à :

$$(\lambda_{hom}^{MT})_{11} = (\lambda_{hom}^{MT})_{22} = (\lambda_{hom}^{MT})_{33} = \lambda_{béton} + \frac{f_v (\lambda_{MCP} - \lambda_{béton}) (A_{MCP})_{11}}{(1 - f_v) + f_v (A_{MCP})_{11}} \quad (11)$$

Avec:

$$(A_{MCP})_{11} = (A_{MCP})_{22} = (A_{MCP})_{33} = [1 + (\lambda_{MCP} - \lambda_{béton}) P_{11}]^{-1} \quad (12)$$

4.2.2. Schéma dilué

Dans le cas du schéma dilué (fractions volumiques faibles, interactions entre inhomogénéités négligées), l'Equation (6) s'écrit :

$$\lambda_{hom}^{dilué} = f_v \cdot \lambda_{MCP} \cdot A_{MCP} + (1 - f_v) \cdot \lambda_{béton} \cdot A_{béton} \quad (13)$$

Le tenseur de concentration de la matrice est donné par:

$$A_{béton} = \frac{1}{(1 - f_v)} \{I - f_v [I + (\lambda_{MCP} - \lambda_{béton}) P_{MCP}]^{-1}\} \quad (14)$$

Ainsi, l'Equation (13) peut s'écrire:

$$\lambda_{hom}^{dilué} = \lambda_{béton} + f_v (\lambda_{MCP} - \lambda_{béton}) A_{MCP} \quad (15)$$

La figure 7 présente les résultats de la conductivité thermique équivalente des bétons-MCP estimée selon les différents modèles d'homogénéisation. Nous pouvons constater que les résultats expérimentaux ainsi que les résultats issus de la modélisation multi-échelle sont compris entre les bornes de Voigt et Reuss. De plus, on peut constater le bon accord entre l'expérimentation et le schéma dilué et le modèle de Mori-Tanaka pour les teneurs en MCP supérieures à 1%. Ces résultats montrent que le choix d'une approche multi-échelle s'avère suffisante pour la prédiction de la conductivité thermique des bétons-MCP connaissant les propriétés de ses constituants (MCP et béton).

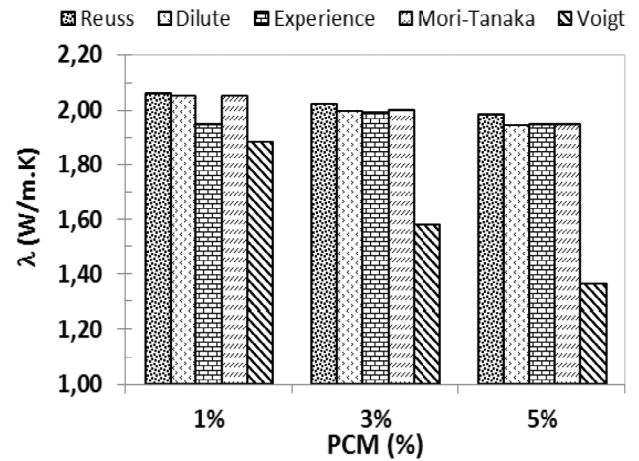


Figure 7. Conductivités thermiques équivalentes homogénéisées des bétons-MCP, comparaison avec les résultats expérimentaux.

5. CONCLUSIONS

Cette étude a pour objectif de contribuer à une meilleure compréhension des propriétés des MCP et des bétons-MCP à l'échelle des matériaux. Un gain de la capacité à stocker de la chaleur des bétons-MCP a été constaté avec l'addition des MCP. L'estimation de la conductivité thermique par l'analyse multi-échelle par homogénéisation corrèle d'une manière satisfaisante avec les résultats issus de l'expérience par Hot Disk.

Des travaux sont en cours actuellement afin de prendre en compte les incertitudes expérimentales des mesures thermiques dans le cadre d'une étude probabiliste paramétrique des incertitudes afin d'évaluer l'entropie relative aux propriétés thermiques mesurées.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé en partenariat avec l'équipe du laboratoire LMSGC de l'université de Cergy Pontoise. Les auteurs leur adressent leurs chaleureux remerciements et en particulier au professeur Fekri Meftah pour l'assistance expérimentale et les échanges scientifiques. Les auteurs remercient également Laurence Lestum de Basf pour la fourniture des MCP.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [AGG 99] AGGOUN S., BEJI H., BENNACER R., DUVAL R., « Compromis entre le stockage d'énergie et la résistance mécanique des matériaux de construction : incorporation de paraffine », 4^e Journées Maghrébines d'Etudes de Génie-Mécanique, 28-30 Nov. 1999, Canstantine.
- [BOH 00] BOHAC V., GUTAVSSON M.K., KUBICAR L., GUSTAFSSON S.E., Review of Scientific Instruments, vol. 71, 2000, 2452.
- [CAB 07] CABEZA L.F., CASTELLON C., NOGUES M., MEDRANO M., LEPPERS R, ZUBILLAGA O., "Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings", Energy and Buildings, vol. 39, 2007, p.113-119.
- [DO 08] DO D.P., Application des approches d'homogénéisation à l'étude des propriétés thermo-hydro-mécaniques des roches. Application aux argilites, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, 2008.
- [EDD 13] EDDHAHAK A., DRISSI S., COLIN J., NEJI J., "Analysis by Differential Scanning Calorimetry of concrete modified with microencapsulated phase change materials", International Renewable and Sustainable Energy Congress IRSEC, 7-9 March 2013, Ouarzazate.
- [HAW 92] HAWES D.W., BANU D., FELDMAN D., "The stability of phase change materials in concrete", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 27, 1992, p.103-118.
- [HUN 09] HUNGER M., ENTROP A.G., MANDILARAS I., BROUWERS H.J.H., FOUNTI M., "The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials", Cement and Concrete Composites, vol. 31, 2009, p.731-743.
- [KUZ 11] KUZNIK F., DAVID D., JOHANNES K., ROUS J.J., "A review on phase change materials integrated in building walls", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, 2011, p.379-391.
- [MES 12] MESHGIN P., XI Y., "Effect of Phase-Change Materials on Properties of Concrete", ACI Materials Journal, vol.109, 2012, p.71-80.
- [NAI 05] NAITAILI B., Elaboration, caractérisation et modélisation de matériaux poreux. Influence de la structure poreuse sur la conductivité thermique effective, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2005.

DÉVELOPPEMENT DE COMPOSITES À MATRICE MINÉRALE ET À RENFORT TEXTILE

Marie MICHEL, Jean AMBROISE

Université de Lyon, INSA-Lyon, LGCI, F-69621, Villeurbanne, France

marie.boulet-michel@insa-lyon.fr

jean.ambroise@insa-lyon.fr

1. AVANT-PROPOS

Le CCV (Composite Ciment Verre) est un matériau dont les développements remontent aux années 1970 avec la mise sur le marché par la société Pilkington en 1971 d'une fibre de verre alcali – résistante. Le CCV est un mélange de micro- béton fluide et de roving de fibres de verre coupées dont la longueur varie entre 6 mm et 24 mm. Le dosage en fibres est de 1,5 à 2 % du poids total sec dans la solution prémélange (premix), il est de 5 % quand la mise en œuvre est réalisée par projection. La résistance en traction par flexion se situe entre 10 et 14 MPa dans le cas d'une mise en œuvre de type " coulé – vibré ". Dans le cas de la mise en œuvre par projection, la résistance en traction atteint des niveaux de 20 à 30 MPa. Une solution de renforcement alternative aux fibres courtes est l'utilisation de renforts textiles avec le développement des composites à matrice minérale et renfort textile (textile reinforced concrete TRC). Les CCV ou les TRC sont des matériaux

dont le coût matière est très nettement supérieur à celui des bétons traditionnels, ce qui a un impact sur le prix des produits finis. La réduction des coûts passe par la réduction des épaisseurs et par une diminution des cycles de fabrication. Concernant la diminution des cycles de fabrication, les techniques classiques d'accélération du durcissement de la matrice (étuvage – emploi d'accélérateurs) permettent au mieux de démouler 3 à 4 heures après le coulage de la pièce. Une autre voie consiste à utiliser des liants à prise rapide tels que les systèmes [CAC – sulfate de calcium]. Le développement de ce composite à matrice minérale et renfort textile se fait en partenariat avec la société **MIHB Moulage Industriel du Haut-Bugey**¹.

2. INTRODUCTION

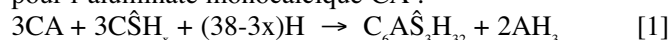
L'aspect novateur du composite présenté dans cette étude concerne la nature du renfort qui est un textile, l'hyper flui-

1. **MIHB** 215 Voie Romaine Parc Industriel de Nerciati 01100 Groissiat www.mihb.com

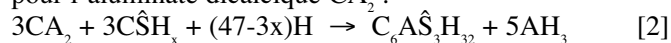
dité de la matrice qui permet une imprégnation du renfort sans serrage mécanique et le temps de durcissement rapide qui conduit à un démoulage à 20°C entre 40 minutes et 60 minutes. La diminution du cycle de fabrication passe par le choix du liant de la matrice avec un liant ettringitique [CAC – sulfate de calcium – CEM]. Les techniques classiques d'accélération du durcissement de la matrice (étuvage – emploi d'accélérateurs) permettent au mieux de démouler 3 à 4 heures après le coulage de la pièce.

La montée rapide en résistance de ces mélanges est le fait de la précipitation rapide d'ettringite, cette précipitation dépendant de la nature cristalochimique des phases présentes dans le CAC et de la nature du sulfate (équations [1] à [3]) :

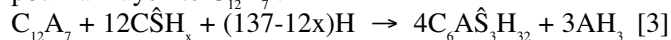
pour l'aluminate monocalcique CA :



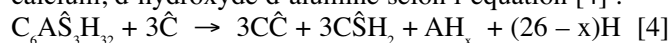
pour l'aluminate dicalcique CA₂ :



pour la mayénite C₁₂A₇ :

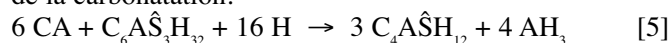


Concernant la carbonatation des ettringites dans les systèmes [CAC – sulfate de calcium – CEM], il y a une analogie avec le ciment Portland. La carbonatation de l'ettringite est contrôlée par la progression du CO₂, l'humidité dans la matrice et la porosité. La carbonatation des ettringites conduit à la formation de gypse, de carbonate de calcium, d'hydroxyde d'alumine selon l'équation [4] :



L'eau libérée au cours de la réaction favorise la progression du gaz et après dessiccation entraîne une augmentation de la porosité.

Suivant le rapport CAC/sulfate de calcium, la nature du sulfate de calcium, on formera plus ou moins d'ettringite (AFt), d'AH₃ et dans le cas d'un sous dosage en sulfate de calcium du monosulfoaluminate de calcium (AFm) et de l'hydroxyde d'aluminium, hydrates plus stables vis-à-vis de la carbonatation.



Les caractéristiques mécaniques et l'évolution de la microstructure d'un composite à matrice minérale et renfort textile ayant été conservé dans différents environnements sont présentés.

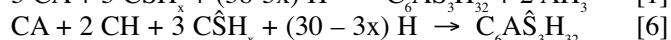
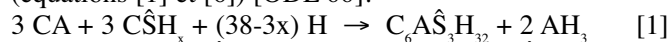
3. PRÉSENTATION DES MATÉRIAUX

3.1. Matrice minérale

La composition minérale est constituée de trois grandes phases qui ont chacune une action spécifique sur les pro-

priétés recherchées : le squelette granulaire, le liant et le système d'adjuvantation (Figure 1).

La particularité de la composition mise au point réside dans la nature du liant qui est un liant ettringitique, constitué de ciment alumineux (CAC), de sulfate de calcium (anhydrite) et de ciment blanc, le CAC étant majoritaire. Le ciment Portland est ajouté pour avoir un pH initial du mortier > 10,5 qui assure la précipitation d'ettringite stable [HAV 93] et pour augmenter la quantité d'ettringite formée. Par exemple, avec l'aluminate monocalcique, d'un point de vue stoechiométrique, la quantité d'ettringite formée est trois fois plus élevée en présence de portlandite (équations [1] et [6]) [ODL 00].



À la différence d'un ciment Portland, dont l'hydratation est lente, le liant ettringitique se caractérise par le fait qu'on réduit sa période dormante à quelques minutes seulement. Le principal hydrate, l'ettringite, se forme dès les premiers instants ce qui confère au produit des caractéristiques particulières, à savoir un durcissement et une montée en résistance rapides.

Des additifs modificateurs de prise sont associés pour ajuster la durée pratique d'utilisation (DPU) du coulis et son temps de durcissement : un retardateur (acide carboxylique) et un accélérateur (sel de lithium).

Les charges utilisées sont une combinaison de silice broyée, de fillers calcaires et de laitier broyé de haut fourneau. La taille maximale du squelette granulaire a été fixée à 300 μm pour éviter un blocage des plus gros grains dans le renfort et une séparation des phases au cours de l'imprégnation du textile.

Deux agents de rhéologie sont associés : un superplastifiant et un agent de viscosité pour assurer une double fonction : assurer une hyper fluidité et une stabilité de la matrice. L'imprégnation nécessite une viscosité très faible et la formulation du couple [agents de rhéologie – eau de gâchage] est un facteur déterminant à l'obtention d'une matrice homogène sur l'épaisseur du composite.

3.2. Renfort textile

Le renfort textile utilisé dans cette étude est une grille de verre uni-directionnelle de type alcali-résistant (AR) dont les caractéristiques sont données sur la Figure 2.

3.3. Composite

Des plaques de composite de dimensions 50 x 30 x 1 cm³, constituées de 4 couches de renfort et de matrice minérale,

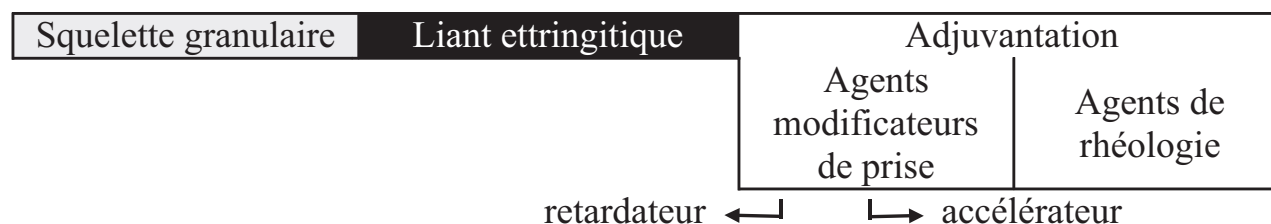


Figure 1. Composition de la matrice minérale

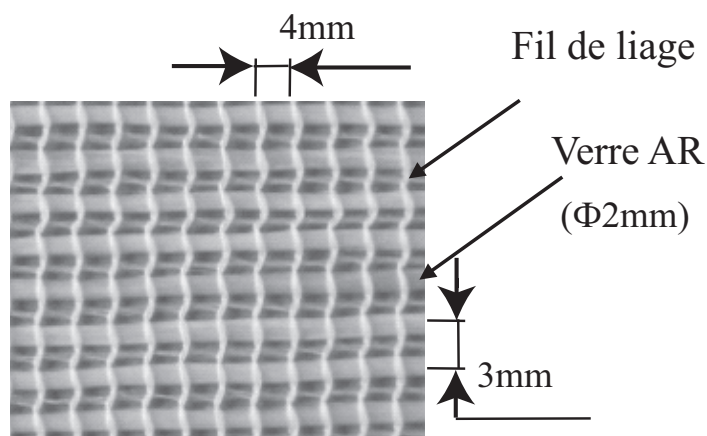


Figure 2. Données sur le renfort textile

Module d'élasticité	72	GPa
Résistance en traction	1700	MPa

sont réalisées sans serrage mécanique. Elles sont démoulées après 45 minutes à 20°C puis conservées en sacs étanches pendant 7 jours et enfin tronçonnées en éprouvettes de dimension 7 x 30 x 1 cm³. La fibre de verre, positionnée dans le sens de sollicitations, est présente à raison de 5% en volume.

4. TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Un des problèmes majeurs des composites ciment verre est d'une part la pérennité du comportement mécanique ductile amenée par le renfort des fibres, car certaines fibres sont sensibles à l'alcalinité du milieu et perdent leurs propriétés de renfort dans les matrices cimentaires, et d'autre part l'intégrité de la matrice cimentaire elle-même [MAJ 91] [BUT 10]. L'objectif de ces essais est d'évaluer la durabilité du comportement mécanique des composites en suivant l'évolution de la ductilité avec différents modes de conservation.

4.1. Définitions des modes de conservation

Après une cure de 7 jours en sac étanche, les plaques de composites ont été soumises à différents modes de vieillissement :

- deux modes de vieillissement naturel :
 - Vieillissement dit normal à 20°C et HR = 50%
 - Vieillissement aux intempéries
- un mode de vieillissement accéléré : carbonatation accélérée

Les échantillons sont placés dans une enceinte de carbonatation alimentée par une injection quotidienne de quelques litres d'un mélange gazeux constitué de 40% d'azote et de 60% de CO₂ (en moles). L'hygrométrie est contrôlée et maintenue supérieure à 80% (Figure 3). Les échantillons sont rincés chaque semaine sous eau déminéralisée pour simuler les effets de rinçage d'une pluie extérieure.

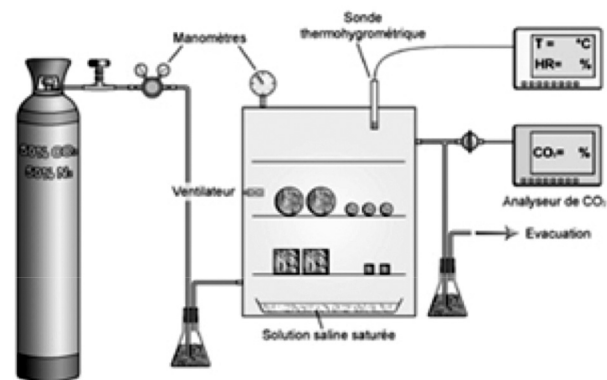


Figure 3. Principe du dispositif de carbonatation accélérée

4.2. Essai de flexion 4 points

L'essai de flexion 4 points est utilisé pour caractériser le comportement mécanique et la déformabilité des composites, un capteur LVDT étant placé à mi-portée de la plaque, selon la méthode ASTM C1018 [AST 92] (Figure 4).



Figure 4. Dispositif expérimental de l'essai de flexion 4 points

4.3. Techniques d'analyse physico-chimiques

La **porosimétrie au mercure** permet d'accéder aux deux grandeurs qui définissent la porosité des composites ciments verre : le facteur poreux et la distribution poreuse qui sont respectivement des indicateurs de durabilité et d'hydratation. Les mesures de porosité ont été réalisées, à l'aide d'un porosimètre à mercure de type Micrometrics AutoPore III sous une pression d'intrusion de 200 MPa, sur des fragments de plaques. L'échantillon est immergé dans le mercure puis soumis à une pression de mercure. La porosité est déterminée par la loi de Washburn qui relie le diamètre des pores et la pression de mercure appliquée sur l'échantillon.

L'analyse en **diffraction des rayons X (DRX)** a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre BRUKER® D8 Advance, équipé d'un goniomètre à géométrie BRAGG-BRENTANO. Cette méthode permet d'identifier les phases minérales sous réserve qu'elles soient bien cristallisées et présentes à des teneurs supérieures à 2 à 3 % en volume. Nous utilisons la diffraction des rayons X pour suivre l'évolution de la consommation des phases anhydres et l'évolution du phénomène de carbonatation.

Lors d'une **analyse thermique différentielle couplée à l'analyse thermogravimétrique (ATD-ATG)**, la représentation de l'évolution du flux thermique permet d'identifier les différents produits d'hydratation formés. Le diagramme issu de l'analyse thermique différentielle permet d'identifier les différents produits d'hydratation formés : avec la déshydratation des C-S-H (épaulement vers 115°C), la déshydratation de l'ettringite (pic vers 140°C), la déshydratation d'un aluminat de calcium ou du monosulfoaluminate de calcium (pic à 190°C), la déshydratation de la gibbsite AH_3 (pic vers 270°C). La mesure de la perte de masse permet d'évaluer la part d'eau ayant réagi avec le ciment (eau non évaporable NEW ou eau liée). L'appareillage utilisé est de type Setaram, Setsys Evolution couplé à un logiciel de pilotage, d'analyse et de traitement des données : setsoft 2000.

La **microscopie électronique à balayage (MEB)** permet l'étude des interfaces fibres-matrice pour mettre en évidence les mécanismes de renfort et de suivre leur évolution au cours des essais de vieillissement. Les observations ont été réalisées au microscope QUANTA-FEG 250 en mode low-vacuum. Les échantillons ont été collés sur un portoir avec de la laque d'argent conductrice. Ils n'ont pas été métallisés et la pression appliquée est de 5,9 torr afin de ne pas affecter la structure de l'échantillon.

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1. Essai de flexion 4 points

La résistance en flexion a été mesurée sur des plaquettes à 28 jours, 6 mois et un an à partir d'un essai de traction par flexion quatre points. Deux zones caractérisent les courbes contrainte – flèche de la Figure 5 :

- une zone de comportement élastique linéaire jusqu'à un point de rupture qui correspond à la rupture de la matrice (LOP). La contrainte de rupture de la matrice du TRC renforcé avec le textile unidirectionnel est égale à celle de la matrice seule ($\sigma_{\text{LOP}} = \sigma_{\text{matrice}} = 7 \text{ MPa}$). Cela témoigne de l'homogénéité de la matrice sur l'épaisseur du composite : il n'y a pas de filtration au travers du renfort textile et donc pas de ségrégation.
- une zone de comportement post-fissuration non linéaire caractérisée par une contrainte maximale appelée module de rupture (MOR). On atteint un module de rupture à 28 jours compris entre 48 MPa pour l'échantillon conservé en enceinte de carbonatation et 51 MPa pour le mode de conservation à 20°C et HR = 50%. Si la perte de performance mécanique est négligeable en carbonatation accélérée, la ductilité du composite est fortement réduite (-20%).

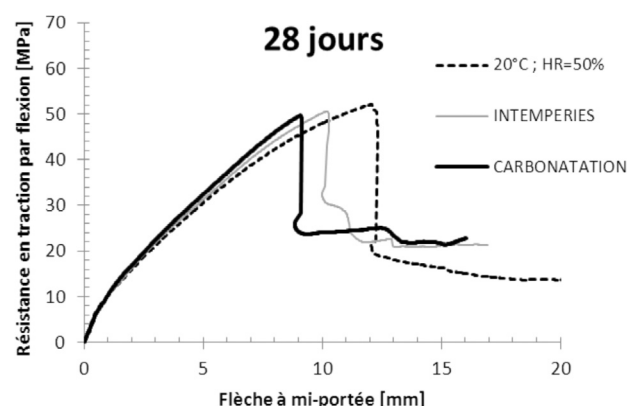


Figure 5. Courbe contrainte de traction par flexion – flèche à 28 jours

La Figure 6 représente l'évolution du comportement mécanique du composite pendant un an en vieillissement naturel. Lorsque le composite est stocké à (20°C ; HR=50%) ou soumis aux intempéries, les caractéristiques intrinsèques à la matrice (δ_{LOP} ; σ_{LOP}), sont équivalentes et évoluent très peu au cours du temps. En ce qui concerne les caractéristiques au MOR (δ_{MOR} ; σ_{MOR}), elles augmentent entre 28 jours et un an. Aucune perte de ductilité ou de résistance n'est enregistrée.

5.2. POROSITÉ, ATD-ATG, DRX

Sur la Figure 7, on notera la particularité des matrices ettringitiques qui est d'avoir une porosité centrée sur la mésoporosité en l'occurrence ici 0,3 μm . En carbonatation, la famille des pores caractéristiques de l'ettringite est moins importante. Le phénomène de carbonatation de l'ettringite constaté avec la baisse de ductilité des composites est ainsi confirmé. La microporosité est liée à la présence plus ou moins importante de gel d' AH_3 et de monosulfoaluminate de calcium hydraté (AFm) (cf. pics à 190 et 270°C sur les diagrammes ATD de la figure 9).

Au cours du temps, la porosité totale diminue (de 29% à 28 jours à 25% à un an). Les pores ont été comblés par les

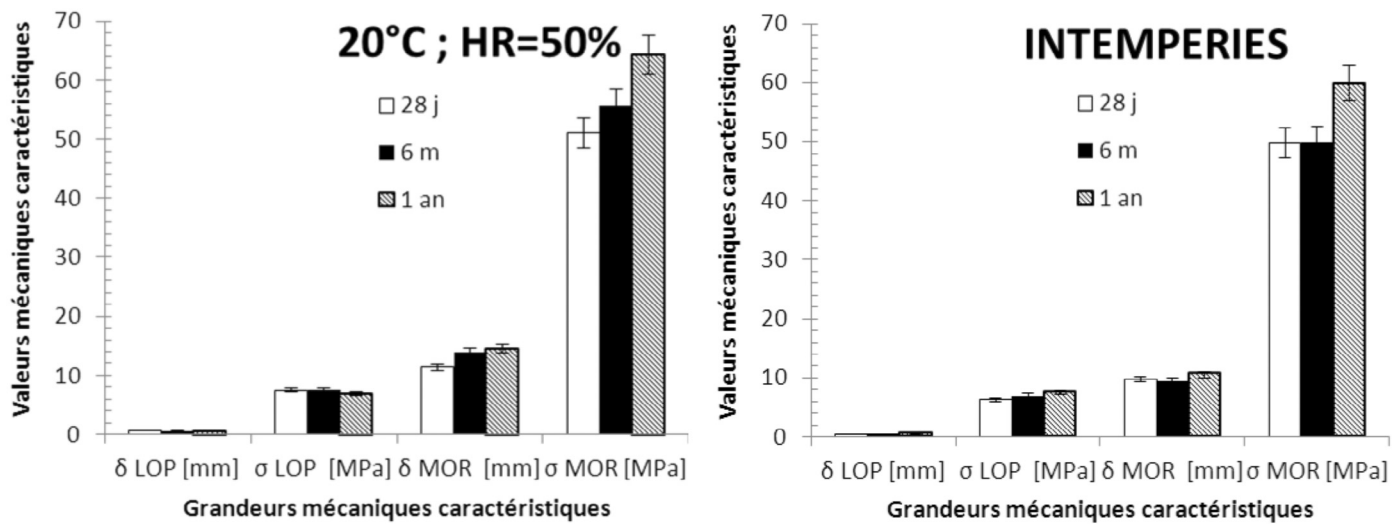


Figure 6. Grandeurs mécaniques caractéristiques à 28 jours, 6 mois et un an

hydrates supplémentaires, ce que confirment les analyses ATD-ATG (non représentées ici).

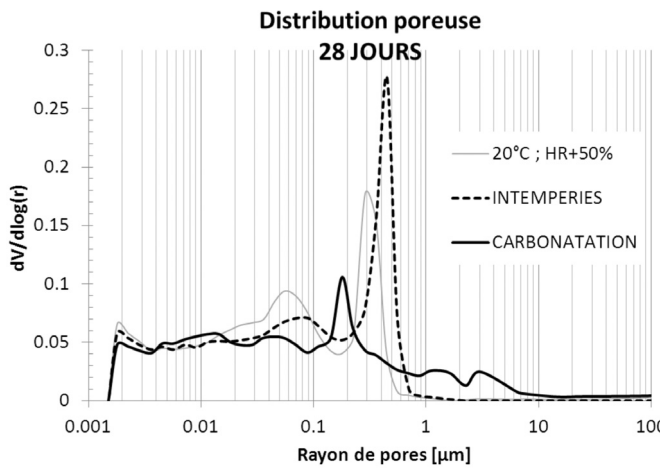


Figure 7. Distributions poreuses

Les analyses en DRX effectuées sur un prélèvement à la surface de la plaque (quelques micromètres d'épaisseur) et un au cœur de la plaque permettent de suivre la consommation de la phase principale du ciment alumineux : l'aluminate monocalcique CA et l'évolution de la quantité de carbonate de calcium (pics respectivement notés CAC et C \hat{C} sur la Figure 8). Pour les échantillons soumis aux intempéries et à la carbonatation accélérée, tandis qu'à cœur la phase CA est totalement consommée, en surface la quantité de CA n'est pas négligeable. Ces conditions de stockage entraînent un phénomène de gradient de séchage dans l'épaisseur de la plaque : en surface, la matrice n'a plus assez d'eau pour s'hydrater. De plus, la Figure 8 montre que la quantité de carbonate de calcium est plus importante en surface qu'à cœur : le phénomène de carbonatation n'a lieu qu'en surface du fait de la faible porosité de la matrice. Sur le diagramme ATG de la figure 9, on prend comme indicateur de la carbonatation la perte de masse entre 700 et 820°C, due à la décarbonatation du car-

bonate de calcium : la valeur de $TG_{700-820^{\circ}C}$ pour l'échantillon conservé en carbonatation accélérée pendant 28 jours est supérieure à celle des échantillons conservés pendant 28 jours, 6 mois et un an à 20°C et 50%HR et aux intempéries. Cela confirme la carbonatation de la matrice plus importante avec l'essai accéléré.

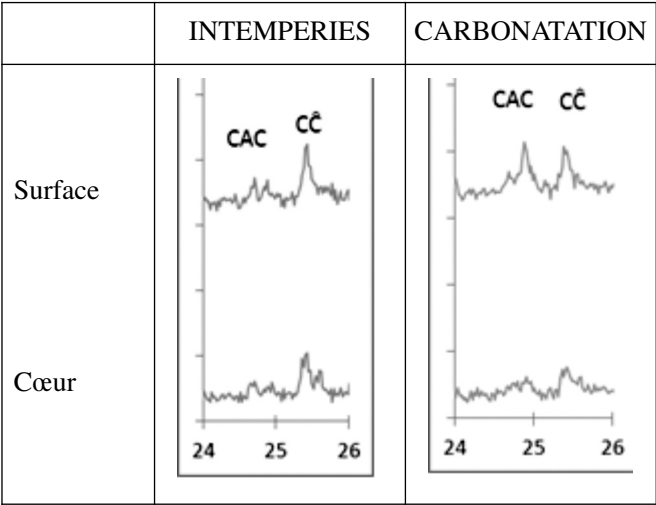


Figure 8. Diffractogrammes DRX pour un angle 2.θ compris entre 24 et 26°

5.3. Observations au MEB

La dissipation d'énergie après fissuration est contrôlée par l'adhérence fibre-matrice, par la résistance frictionnelle de la fibre après perte d'adhérence des fibres. Il est important de prêter attention à l'adhérence du faisceau de fibres avec la matrice : quel que soit le mode de conservation, les observations au MEB montrent des dépôts de matrice sur les fibres (Figure 10). La capacité d'imprégnation du renfort textile par la matrice est mise en évidence par le cliché MEB de la Figure 11 avec les inclusions de matrice hydratée à l'intérieur des faisceaux de mono-filaments.

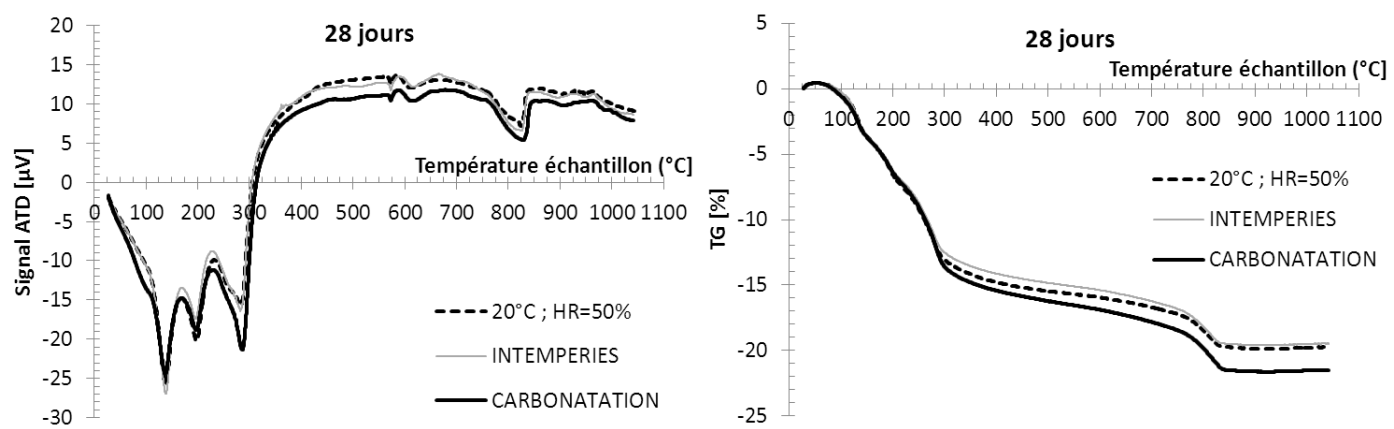


Figure 9. Diagrammes ATD et ATG à 28 jours

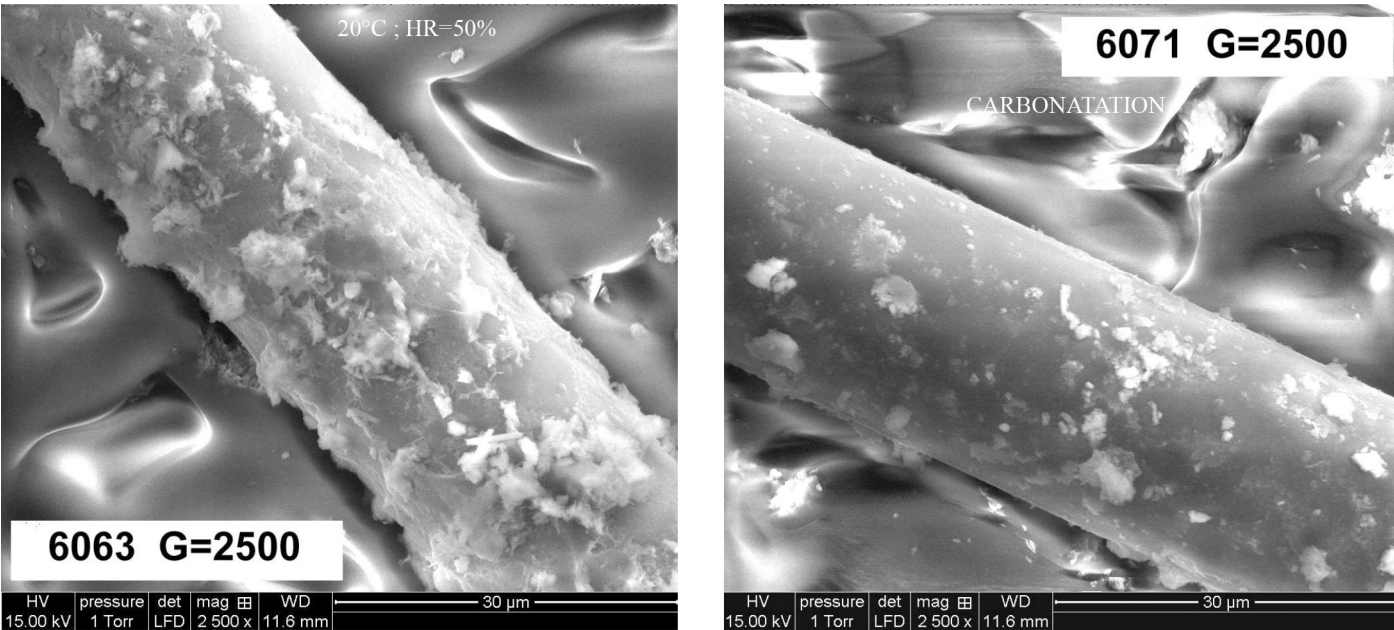


Figure 10. Clichés MEB de fibres extraites du composite avant observation

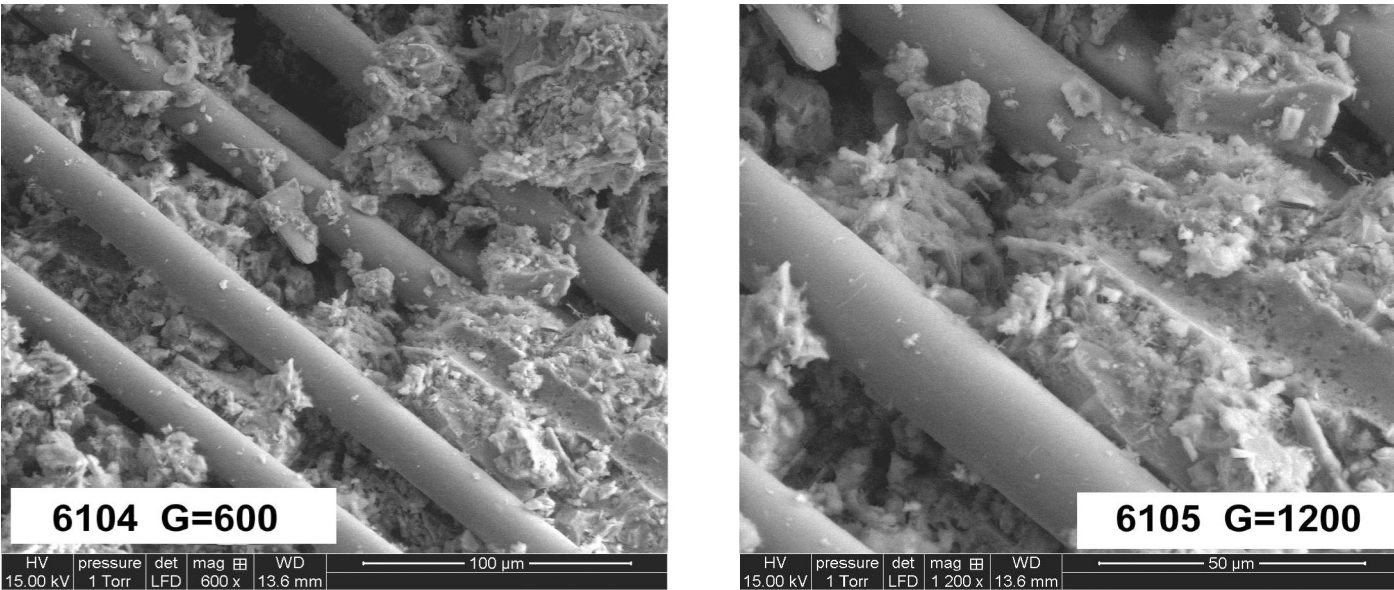


Figure 11. Clichés MEB de la matrice à l'intérieur des faisceaux de filaments

6. CONCLUSIONS

Le composite à matrice minérale et renfort textile développé offre des perspectives intéressantes pour :

- sa facilité de fabrication, d'une part lors du malaxage qui ne nécessite pas de malaxeurs à cisaillement élevé et d'autre part lors de la mise en œuvre puisque l'hyper fluidité de la matrice permet l'imprégnation des renforts sans serrage mécanique,
- sa montée rapide en résistance qui permet de démouler moins d'une heure après le coulage,
- ses caractéristiques mécaniques en flexion du même niveau qu'un BFUP,
- la stabilité du composite vis-à-vis de la carbonatation de la matrice ettringitique. L'essai de carbonatation accélérée mené pendant 28 jours est équivalent à un vieillissement naturel (aux intempéries) bien supérieur à 1 an.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [AST 92] ASTM. Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fibre reinforced concrete (using beam with third-point loading) – ASTM C1018. ASTM Annual Book of Standards Philadelphia: ASTM, 1992, Vol. 04.02, p. 510-516.
- [BUT 10] BUTLER J., MECHTCHERINE V., HEMPEL S. "Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: effect of the matrix composition", *Materials and structures*, vol. 43, n°10, 2010, p. 1351-1368
- [HAV 93] HAVLICA, J. et ROTZTOKA, D. "Hydration kinetics of calciumaluminate phases in the presence of various ratio Ca^{2+} and SO_4^{2-} ions in liquide phase", *Cement and Concrete Research* vol 23, n°2, (1993) p. 294–300.
- [ODL 00] I. ODLER. Cements containing calcium sulfoaluminate. In: *Special inorganic cements*. E & FN Spon, 2000, pp. 69-87.
- [MAJ 91] MAJUMDAR, A.J. LAWS, V. Glass fibre reinforced cement OXFORD – *BPS Professional books*: (1991) p. 134–139.

DES PISTES DE RECHERCHE POUR DIMINUER LA VISCOSITÉ DES BÉTONS À HAUTES PERFORMANCES

Julie HOT, Nicolas ROUSSEL

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar),
14-20 Bd Newton Cité Descartes - Champs sur Marne 77447 Marne la Vallée cedex 2

julie.hot@ifsttar.fr

nicolas.rousseau@ifsttar.fr

1. VERS DE NOUVEAUX BÉTONS PLUS RESPECTUEUX DE L'ENVIRONNEMENT

Depuis ses premières applications au début du XX^e siècle, le béton connaît un essor ininterrompu dans les travaux publics comme dans le bâtiment, et possède un potentiel mécanique et esthétique exceptionnel. En France, la majorité des ouvrages d'art, 80% des logements individuels et 90% des logements collectifs sont construits en béton [CIM 06]. C'est un matériau d'une grande souplesse qui sait adapter ses qualités et ses performances aux besoins spécifiques d'un projet. L'immense progrès qu'a connu le béton au cours des dernières années a été possible grâce aux avancées techniques stimulées par la recherche mais s'explique également par la nécessité de faire face à la créativité plus libre des architectes, avec des formes novatrices plus abstraites et épurées, et à l'évolution des réalités de la construction exigeant la mise au point de bétons toujours plus performants [AIT 00, CIM 07]. Il s'impose

donc comme le matériau de la modernité aux possibilités surprenantes.

Le béton est également le produit industriel le plus consommé dans le monde. Avec trois tonnes par personne et par an [AIT 00], il est difficilement remplaçable dans le développement de larges infrastructures. Cette forte utilisation du béton s'explique par de nombreux avantages qui sont aussi bien liés aux propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité offertes par ce matériau qu'aux aspects économiques. En effet, le béton est capable de reprendre des charges très élevées, résiste bien au feu et présente une bonne durabilité dans le temps s'il est correctement mis en œuvre. Une fois tous ses composants mélangés avec de l'eau, il est transformé en un fluide dont l'écoulement peut être contrôlé permettant ainsi d'utiliser des coffrages aux formes diverses.

Malgré ses avantages, le béton, comme tous les autres matériaux de construction, doit adapter son impact sur l'environnement, et de ce fait remettre en question sa formulation. Dans un contexte de construction durable, de respect de l'environnement et de prise de conscience des

dangers du réchauffement climatique, le secteur du BTP, comme de nombreux autres secteurs, se doit en effet de limiter les impacts des bâtiments sur l'environnement [CIM 03, LAF 10]. Le matériau béton est donc au cœur des problématiques actuelles et doit évoluer en tenant compte des aspects économiques, environnementaux et sociétaux. En effet, le secteur des matériaux de construction occupe la troisième position dans le classement des secteurs industriels responsables des émissions de CO₂ les plus élevées dans le monde et en Europe. Ce secteur représente 10% des émissions totales de CO₂ dont la majorité proviennent de la fabrication du béton [HAB 10, CAP 11]. Dans une étude limitée à l'optimisation de la composition du béton d'un point de vue exclusivement matériau, les impacts environnementaux des différents composés du béton (eau, granulats, ciment et adjuvants) ont été analysés, et les résultats ont montré que le composé ciment, principal constituant, était la source principale des impacts environnementaux du matériau béton, représentant plus de 90% de l'indicateur changement climatique d'un mètre cube de béton [HAB 09]. Par ailleurs, l'industrie cimentière représente, à elle seule, entre 5 et 8% des émissions de CO₂ d'origine anthropique dans le monde [SHA 10, PRO 11] avec une production mondiale de ciment pour l'année 2011 estimée à 3,6 milliards de tonnes [CEM 12]. Le ciment apparaît donc comme la source des impacts autour de laquelle les recherches scientifiques doivent s'organiser afin de proposer des stratégies pour réduire l'empreinte environnementale du béton sans compromettre les besoins des Hommes et de la société en matière de logements, bâtiments et infrastructures.

Ainsi, la mise en œuvre de bétons plus respectueux de l'environnement est possible et justifiée si les émissions de CO₂ dues à la production de son principal constituant, le ciment, sont diminuées [NIE 07]. Le béton voit alors sa formulation sans cesse complétée et améliorée pour se plier à tous les défis de la construction et limiter les émissions de CO₂ engendrées lors de sa fabrication. Les tendances actuelles montrent que le rapport eau sur ciment des bétons modernes diminue progressivement. En effet, afin de conserver des performances à l'état durci compatibles avec une baisse de la quantité de ciment, la formulation de ces nouveaux bétons passe par une diminution de la quantité d'eau présente dans le mélange. Du fait de la fraction volumique de solide élevée, les propriétés nécessaires de ces bétons sont obtenues mais la fluidité, et en particulier sa viscosité, sont fortement affectées, posant ainsi un problème important concernant la mise en œuvre sur site. Ces bétons, même s'ils présentent des affaissements conformes aux attentes, sont souvent « collants » et difficiles à lisser et à vibrer. Leur pompage est laborieux et les cadences de chantier chutent.

Les pistes de recherche permettant de contourner le problème de viscosité des bétons à forte fraction volumique solide et à faibles impacts environnementaux sont nombreuses et portent notamment sur l'emploi de polymères. Le travail présenté ici a donc pour but d'identifier certains mécanismes d'action de ces molécules à l'origine d'une diminution de la viscosité. Les polymères utilisés dans cette étude appartiennent à deux familles différentes : les

superplastifiants (SP) et les agents entraîneurs d'air (AEA). Il peut être noté que notre travail se distingue des études de la littérature, qui se focalisent sur les effets des polymères sur le seuil d'écoulement du béton évalué par l'affaissement ou l'étalement du matériau, en mettant l'accent sur l'autre paramètre du comportement : la viscosité.

2. ACTION DES SUPERPLASTIFIANTS

2.1. Introduction

Les superplastifiants (SP) sont des polymères faisant partie de la catégorie des adjuvants appelés « hauts réducteurs d'eau » dont le rôle est de diminuer la quantité d'eau nécessaire à la fabrication de béton. Ces molécules ont l'avantage d'améliorer la fluidité du béton [COL 98]. En s'adsorbant à la surface des grains de ciment, les SP diminuent l'intensité des interactions colloïdales par répulsion électrostatique et/ou stérique, et donc la contrainte seuil [FLA 04, HOU 99, UCH 97]. Dans ce cadre, ils ne devraient pas avoir d'influence sur la viscosité macroscopique des systèmes lorsqu'ils sont soumis à un régime d'écoulement où les interactions colloïdales deviennent négligeables devant les interactions hydrodynamiques. Cependant, une diminution de la viscosité macroscopique, ou apparente, est parfois reportée dans la littérature [CYR 00, PAP 04, PHA 06]. La contrainte seuil jouant un rôle majeur dans la viscosité apparente à faibles et intermédiaires vitesses de cisaillement pour des pâtes traditionnelles, la diminution observée pourrait être seulement due à une diminution des interactions colloïdales et de la contrainte seuil macroscopique. Nos résultats montrent que ce n'est pas le cas, et que la contribution visqueuse à la viscosité macroscopique de pâtes de ciment soumises à des vitesses de cisaillement élevées est influencée par la présence de polymères adsorbés à la surface des grains.

2.2. Constatation expérimentale

2.2.1. Matériel et protocole expérimental

Un ciment Portland ASTM Type 1 est utilisé. Les pâtes de ciment sont préparées avec un rapport E/C=0,35. Le SP étudié est un polycarboxylate éther (PCE) sous forme liquide. Son dosage est exprimé en pourcentage de la masse de ciment. Nous avons choisi ici une combinaison ciment/SP pour laquelle des interactions chimiques, telles que l'intercalation ou la co-précipitation, ne semblent pas avoir lieu [FLA 01, JOL 98]. La raison de ce choix est de créer des systèmes pour lesquels un changement dans la rhéologie n'est pas dû à un changement dans la nature des minéraux mais provient plutôt d'un changement dans les interactions directes ou indirectes entre les particules minérales. Nous utilisons donc un protocole en ajout différé. Le ciment et 85% de l'eau sont d'abord mélangés mécaniquement pendant 2 min. La pâte est ensuite laissée au repos pendant 20 min avant de rajouter les 15% d'eau restante contenant le polymère. La pâte est de nouveau mélangée pendant 2 min et laissée au repos 10 min. Le polymère est

donc ajouté 20 min après le premier contact entre le ciment et l'eau, c'est-à-dire après la nucléation de la plupart des premiers produits d'hydratation. Par ailleurs, des observations à la DRX (Diffraction des Rayons X) et des mesures d'adsorption à l'analyseur de COT (Carbone Organique Total), non présentées ici, permettent de conclure que le SP choisi n'induit aucun changement dans la nature des minéraux à la surface des grains.

Pour les mesures de rhéologie, un rhéomètre Bohlin avec une géométrie à ailettes est utilisé. Une rampe de vitesse de cisaillement croissante est appliquée suivie d'une rampe de vitesse de cisaillement décroissante. Seules les rampes décroissantes sont montrées dans cet article.

Pour les mesures de force normale, le rhéomètre est équipé d'une géométrie à plans parallèles. La procédure consiste à mesurer les contraintes normales et tangentielles pour une vitesse de cisaillement constante.

2.2.2. Mesures de rhéologie

La figure 1 représente la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour différents dosages en PCE. Pour la pâte de référence, nous observons un comportement rhéofluidifiant caractéristique des pâtes de ciment (la viscosité diminue avec la vitesse de cisaillement). Avec l'ajout du PCE, ce comportement devient moins prononcé. Ceci peut s'expliquer par l'action du polymère qui, grâce à des effets de répulsion électrostatiques et/ou stériques, est capable de diminuer l'intensité des interactions colloïdales et donc défloculer le système [FLA 04, UCH 97, HOU 99]. La contrainte seuil et donc la contribution des interactions colloïdales à la viscosité apparente/macroscopique diminuent avec l'ajout de polymère. Par ailleurs, un comportement rhéoépaississant (la viscosité augmente avec la vitesse de cisaillement) est également observé pour des vitesses de cisaillement élevées. Son effet est de plus en plus marqué avec l'ajout de polymère.

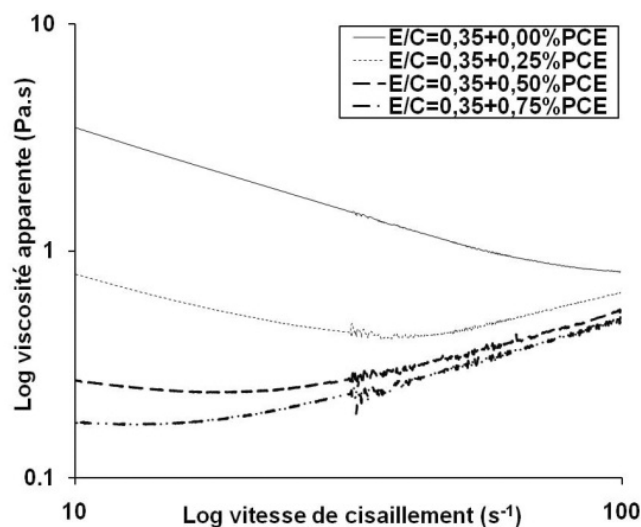


Figure 1. Viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement.

A partir de la viscosité apparente, nous déterminons la viscosité résiduelle, c'est à dire la viscosité apparente diminuée de la contribution de la contrainte seuil. La figure 2

représente la viscosité résiduelle en fonction de la vitesse de cisaillement. Un plateau est observé et est considéré ici comme étant représentatif de l'intensité de la dissipation visqueuse. Nous remarquons que la dissipation visqueuse est affectée par la présence du polymère, le niveau du plateau diminuant lorsque le dosage en PCE augmente. De plus, le rhéoépaississement ne semble pas dépendre du dosage en PCE. Ce comportement n'est pas induit par le polymère et est en fait toujours présent dans le système.

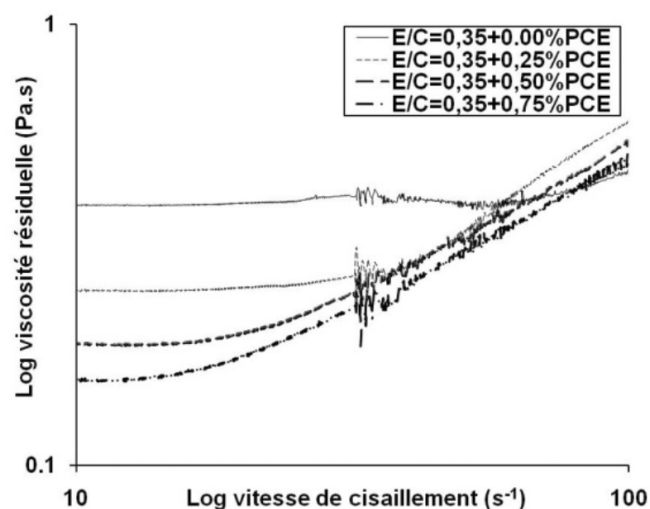


Figure 2. Viscosité résiduelle en fonction de la vitesse de cisaillement.

2.2.3. Mesures de force normale

La figure 3 représente le rapport entre la contrainte normale et la contrainte tangentielle en fonction du temps pour trois vitesses de cisaillement pour la pâte de ciment de référence et celle contenant 1% de PCE. Nous remarquons que le rapport ne dépend pas de la vitesse de cisaillement pour la gamme de vitesse testée. Par ailleurs, alors que la fraction volumique du système reste constante ($E/C=0,35$), nous observons une diminution importante de la force nor-

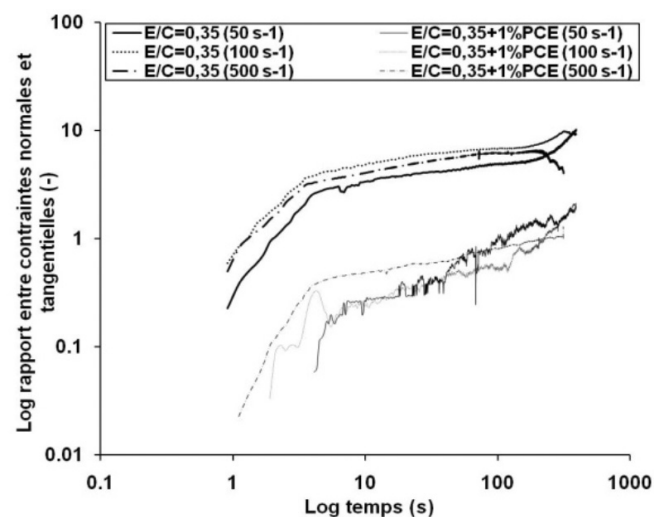


Figure 3. Rapport entre contraintes normales et tangentielles en fonction du temps.

male entre la pâte de référence et celle contenant 1% de PCE. Comme la gamme de vitesse de cisaillement étudiée ici est élevée, la contribution des forces colloïdales, et donc de la contrainte seuil, devrait être faible. Par conséquent, lorsque le PCE est ajouté, quelque chose autre que la contrainte seuil change dans le système.

2.3. Analyses

Afin d'analyser les résultats, nous allons nous appuyer sur une relation qui décrit la dissipation visqueuse (μ étant la viscosité macroscopique) pour des suspensions non-Browniennes, colloïdales et concentrées [LEM 09, MAN 99, ROU 10]. Elle tient compte de la viscosité du fluide interstitiel μ_0 , de l'encombrement du système $f(\Phi/\Phi_{div})$ (Φ , fraction volumique solide et Φ_{div} , fraction volumique solide pour laquelle la viscosité diverge) et du nombre de contacts entre particules $g(k, \Phi/\Phi_{div})$ qui augmente avec Φ/Φ_{div} et k (k , coefficient de friction entre les grains de ciment) :

$$\mu = \mu_0 f(\Phi/\Phi_{div}) g(k, \Phi/\Phi_{div}) \quad [1]$$

Les résultats rhéologiques montrent une diminution de l'intensité des interactions colloïdales avec l'ajout de PCE. Cependant, comme la viscosité résiduelle indépendante de la contrainte seuil diminue, il y a également une diminution de l'intensité des interactions visqueuses. Par ailleurs, le rapport contact mesuré entre les contraintes normales et tangentielles est en accord avec l'origine frictionnelle des forces normales [BOY 11, BRA 97] (contacts directs entre particules). Le PCE entraîne donc une diminution de la contribution des contacts frictionnels. Comme celle-ci diminue ainsi que la contribution de la contrainte seuil, l'état de floculation du système devrait diminuer avec le rapport Φ/Φ_{div} . Nous pouvons citer deux mécanismes potentiels à l'origine de la diminution de la viscosité apparente et des forces normales : soit une diminution dans le nombre total de contacts directs frictionnels entre les grains [BOY 11, LOM 08], soit un changement dans le coefficient de friction (rugosité) entre les agrégats ou les grains. Ce dernier mécanisme peut être négligé. En effet, l'épaisseur du polymère adsorbé, estimée à quelques nanomètres [FLA 06, PER 12], est trop faible pour pouvoir changer la rugosité de surface des grains, de l'ordre de quelques centaines de nanomètres. Par ailleurs, les analyses à la DRX et les mesures d'adsorption ne montrent pas de changement dans la nature des minéraux à la surface des grains en présence de polymère. Enfin, des simulations numériques récentes dans le domaine des milieux granulaires secs ont montré qu'une diminution du coefficient de friction pour des grains de ciment de 0,6-0,7 [KEN 87] à 0,1-0,2 [LEM 09] est nécessaire afin de pouvoir observer des conséquences sur le comportement macroscopique. Si nous reprenons la relation [1] et le premier mécanisme décrit, nous pouvons avancer que le polymère affecte le nombre total de contacts directs frictionnels, entraînant ainsi une modification du rapport Φ/Φ_{div} . Comme la fraction volumique solide Φ ne change pas, le polymère change la contribution des contacts à la viscosité macroscopique seulement en changeant l'état de floculation de la suspension. En défloculant le système, il change la façon de le cisaillement se concentre dans le fluide interstitiel

entre les floes et réduit ainsi l'encombrement du système [HOT 13].

3. ACTION DES AGENTS ENTRAINEURS D'AIR

3.1. Introduction

Les agents entraîneurs d'air (AEA) semblent entraîner des bulles d'air qui peuvent diminuer la viscosité sans affecter drastiquement les propriétés à l'état durci. Ce type d'agents est bien connu pour améliorer la durabilité des bétons durcis soumis à des cycles de gel/dégel et exposés à des sels de déverglaçage [DOL 95, PIG 95]. En plus de cet avantage, l'air entraîné semble être également très bénéfique pour les bétons frais. En effet, les bétons à air entraîné apparaissent plus maniables que les bétons sans air entraîné [KHA 00, STR 04, WAL 03], ce qui laisse suggérer que la teneur en air affecte la fluidité et donc la rhéologie des bétons. Malheureusement, les mécanismes d'action à l'origine d'une diminution de la contrainte seuil et de la viscosité ne sont pas évidents [DOL 95, MIE 58, JOL 03]. L'existence de deux régimes, pour lesquels les conséquences de la présence de bulles d'air sur le comportement rhéologique sont différentes, pourrait expliquer les changements de fluidité observés sur les bétons suite à l'ajout d'AEA. Dans un premier régime, les bulles d'air sont suffisamment larges pour être déformées pendant l'écoulement et réduire ainsi la viscosité macroscopique. Dans un deuxième régime, les bulles d'air sont trop petites ou l'écoulement est trop lent pour qu'elles se déforment. Elles gardent donc leur forme sphérique et sont considérées comme des inclusions rigides, augmentant ainsi la viscosité macroscopique. Gardant en tête ces deux régimes, il devrait être possible d'expliquer le mode d'action des AEA. Nos résultats sur mortiers montrent qu'il semble possible d'entraîner des bulles d'air déformables fluidifiant le système.

3.2. Constatation expérimentale

3.2.1. Matériel et protocole expérimental

Un ciment Portland ASTM Type 1 et du sable de Seine 0/4 mm sont utilisés. Les mortiers préparés sont composés en volume de 40% de sable et 60% de pâte de rapport E/C=0,30. L'AEA testé est un produit commercial sous forme liquide. Son dosage est exprimé en pourcentage de la masse de ciment. Certains des mortiers sont préparés avec un dosage fixe de SP (0,25% du PCE présenté dans la partie 2.2.1.).

Pour les mortiers sans SP (mortiers fermes), l'AEA, l'eau et le ciment sont d'abord mélangés dans le malaxeur pendant 4 min. Le sable est ensuite rajouté et l'ensemble est finalement mélangé pendant 6 min.

Pour les mortiers avec 0,25% de PCE (mortiers fluides), l'AEA, un tiers du PCE, l'eau et le ciment sont d'abord mélangés dans le malaxeur pendant 2 min 30 s. Le sable est

ensuite rajouté et l'ensemble est mélangé pendant 1 min 30 s. Les parois de la cuve du malaxeur sont raclées et le reste de SP est ajouté. Le mortier est finalement mélangé pendant 6 min.

Pour les mesures de teneur en air, le mortier est placé, après le malaxage, dans un aéromètre de capacité 1 litre. La teneur en air est la moyenne de trois mesures.

Pour les mesures de rhéologie, le rhéomètre BTRHEOM [HU 96] est utilisé. Il est équipé d'une géométrie à ailettes. Après le malaxage, la cuve du rhéomètre est remplie avec le mortier et un pré-cisaillement est appliqué suivi d'une rampe de vitesse de cisaillement croissante.

3.2.2. Mesures de la teneur en air

La figure 4 montre la teneur en air pour les mortiers préparés avec différents dosages en AEA. Nous remarquons que la teneur en air augmente rapidement pour des dosages de 0% à 1% et se stabilise ensuite autour de 17%. Par ailleurs, il n'y a pas de différence significative entre le mortier ferme et le mortier fluide.

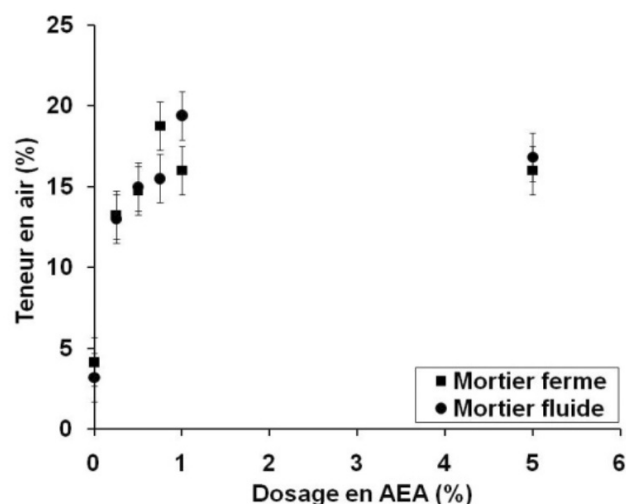


Figure 4. Teneur en air en fonction du dosage en AEA (0, 0,25, 0,50, 0,75, 1 et 5%).

3.2.3. Mesures de rhéologie

La contrainte seuil et la viscosité plastique sont identifiées avec la relation de Bingham (τ_0 : contrainte seuil, μ_{pl} : viscosité plastique, $\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement) :

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \dot{\gamma} \quad [2]$$

La figure 5 représente la contrainte seuil relative en fonction de la teneur en air. La contrainte seuil relative est le rapport de la contrainte seuil du mortier avec AEA par la contrainte seuil du mortier sans AEA. Nous remarquons que le comportement est dépendant de la présence de SP. La contrainte seuil du mortier fluide préparé avec du PCE augmente avec la teneur en air. L'inverse est observé pour le mortier ferme sans SP qui a une contrainte seuil divisée par 2 pour une teneur en air de 15%.

La figure 6 représente la viscosité plastique relative en fonction de la teneur en air. La viscosité plastique relative est le rapport de la viscosité plastique du mortier avec AEA par la viscosité plastique du mortier sans AEA. Nous

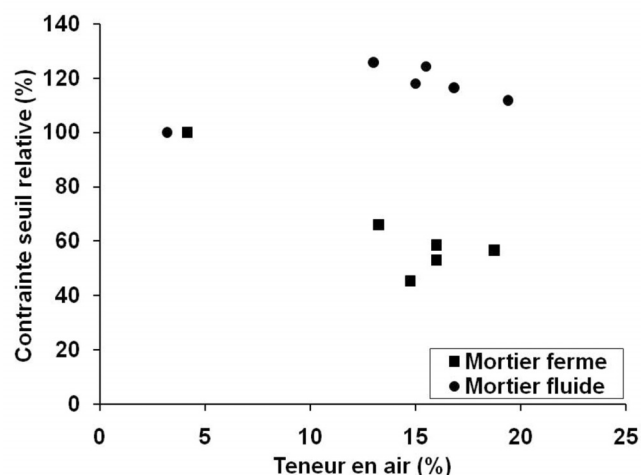


Figure 5. Contrainte seuil relative en fonction de la teneur en air.

remarquons que la viscosité plastique diminue pour les deux types de mortiers lorsque la teneur en air augmente. Pour une teneur en air de 15%, la viscosité plastique est divisée par 2.

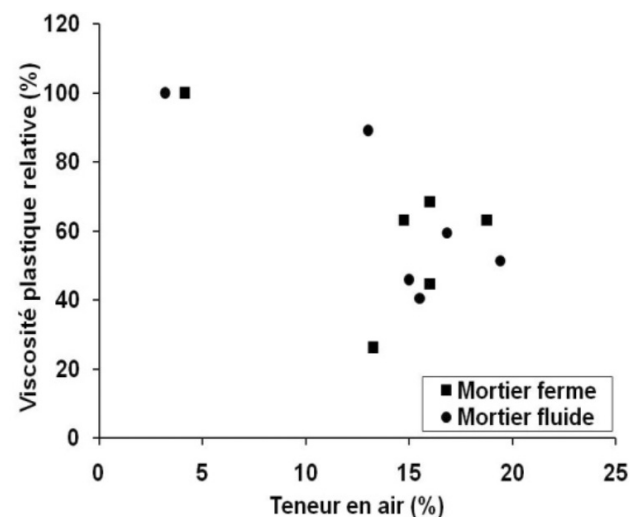


Figure 6. Viscosité plastique relative en fonction de la teneur en air.

3.3. Analyses

Les deux mortiers considérés ici ont un comportement différent lorsque la teneur en air augmente dans le mélange. Pour le mortier ferme, la contrainte seuil et la viscosité plastique diminuent, et pour le mortier fluide, la contrainte seuil augmente alors que la viscosité plastique diminue. L'augmentation de la contrainte seuil avec la teneur en air est un résultat quelque peu inattendu. Nous essayons d'expliquer les tendances observées en utilisant un nombre capillaire adimensionnel Ca qui est le rapport entre la contrainte de cisaillement qui tend à déformer les bulles et la tension de surface qui tend à empêcher cette déformation (d_b : diamètre de la bulle, τ : contrainte appliquée, Γ : tension de surface entre la suspension et l'air) :

$Ca=d_0\tau/\Gamma$ [3]
La transition entre le régime de bulles d'air rigides et le régime de bulles d'air déformables se situe autour de $Ca=1$ ($Ca<1$, inclusions rigides ; $Ca>1$, bulles déformables). Dans le tableau 1, nous calculons deux types de nombre capillaire : Ca qui correspond à la situation où l'écoulement s'arrête ou démarre ($\tau\approx\tau_0$ et $\dot{\gamma}=0\text{ s}^{-1}$), et Ca qui correspond à la situation où le système s'écoule dans la cadre de pratiques industrielles ($\dot{\gamma}=5\text{ s}^{-1}$). La tension de surface est prise égale à $0,04\text{ Pa.m}$ du fait de la présence de l'AEA. Les valeurs de diamètre moyen de bulles de $60\text{ }\mu\text{m}$ et $80\text{ }\mu\text{m}$ pour les mortiers de référence ferme et fluide respectivement sont utilisées.
Nous pouvons identifier deux situations différentes. Premièrement, si $Ca<1$ (cellules blanches), les bulles d'air ne peuvent pas être déformées, et se comportent donc comme des inclusions rigides. Dans ce cas là, la contrainte seuil pour le nombre capillaire au repos et la viscosité plastique pour le nombre capillaire en écoulement devraient augmenter. Deuxièmement, si $Ca>1$ (cellules grises), les bulles d'air peuvent être déformées, et se comportent donc comme des inclusions déformables. Dans ce cas là, la contrainte seuil pour le nombre capillaire au repos et la viscosité plastique pour le nombre capillaire en écoulement devraient diminuer. Nous retrouvons bien les comportements observés expérimentalement.
Ainsi, en fonction du niveau de contrainte dans le système et du diamètre des bulles, le nombre capillaire peut passer de valeurs inférieures à 1 à des valeurs supérieures à 1. Il est donc possible de prédire les conséquences de l'entraînement d'air sur la rhéologie des mortiers fermes et fluides.

4. CONCLUSION

Les études sur le mode d'action des SP et des AEA présentées précédemment montrent qu'il est possible de diminuer la viscosité macroscopique de pâtes de ciment et de mortiers fortement concentrés.
Les polymères adsorbants (SP) changent l'état de floculation de la suspension et donc sa capacité à concentrer le cisaillement et dissiper l'énergie dans le fluide interstitiel. L'intensité des interactions hydrodynamiques est donc diminuée. Les SP apparaissent alors comme une solution au problème de fluidité des bétons à faibles impacts environnementaux. En plus d'agir sur le seuil d'écoulement, ils diminuent l'autre paramètre rhéologique, la viscosité.
Les AEA, quant à eux, peuvent modifier la viscosité macroscopique d'une suspension. Grâce à l'utilisation du

nombre capillaire, il est possible de définir le type de régime (soit « bulles d'air rigides », soit « bulles d'air déformables ») et de prévoir ainsi les conséquences de l'entraînement d'air sur le comportement rhéologique, c'est à dire sur les paramètres rhéologiques seuil d'écoulement et viscosité. Ainsi, les AEA, dans certaines conditions, peuvent être utilisés comme agents fluidifiants.

5. BIBLIOGRAPHIE

[AIT 00] AITCIN P.C., Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 9, 2000, p. 1349-1359.
[BOY 11] BOYER F., Suspensions concentrées : Expériences originales de rhéologie, Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, France, 2011.
[BRA 97] BRADY J. F., MORRIS J. F., Microstructure of strongly sheared suspensions and its impact on rheology and diffusion, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 348, 1997, p. 103-139.
[CAP 11] CAPROS P., KOUVARITAKIS N., MANTZOS L., Economic evaluation of sectoral emission reduction objectives for climate change: Top-down analysis of greenhouse gas emission reduction possibilities in the EU, Contribution to a Study for DG Environment, European commission, 2011.
[CEM 12] CEMBUREAU Association Européenne du Ciment, Rapport d'activité 2011, 2012.
[CIM 03] CIMENTON, Documentation Technique - Le développement durable, *Routes*, n° 84, 2003, p. 7-14.
[CIM 06] CIMENTON, Les bétons : Formulation, fabrication et mise en œuvre, *Fiches Techniques*, tome 2, 2006, chap. 2.
[CIM 07] CIMENTON, Solutions Béton - Les nouveaux bétons, des solutions bétons éprouvées et performantes, *Construction Moderne*, n° 126, 2007, p. 15-25.
[COL 98] COLLEPARDI M., Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete, *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, n° 2, 1998, p. 103-112.
[CYR 00] CYR M., LEGRAND C., MOURET M., Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 9, 2000, p. 1477-1483.
[DOL 95] DOLCH W. L., *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology*, Second Edition, chap. 8, p. 518-557, Noyes Publications, 1995.
[FLA 01] FLATT R. J., HOUST Y. F., A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n° 8, 2001, p. 1169-1176.
[FLA 04] FLATT R. J., Towards a prediction of superplasticized concrete rheology, *Materials and Structures*, vol. 37, n° 5, 2004, p. 289-300.

	Contrainte à 0 s ⁻¹ (Pa)	Contrainte à 5 s ⁻¹ (Pa)	Viscosité plastique (Pa.s)	Ca à 0 s ⁻¹	Ca à 5 s ⁻¹
Mortier ferme	1220	1410	38	1,83	2,1
Mortier fluide	322	507	37	0,64	1,01

Tableau 1. Ordres de grandeurs de la contrainte à 0 s⁻¹ et 5 s⁻¹, de la viscosité plastique et du nombre capillaire à 0 s⁻¹ et 5 s⁻¹.

- [FLA 12] FLATT R. J., BOWEN P., Yodel: A yield stress model for suspensions, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 89, n° 4, 2006, p. 1244-1256.
- [HAB 09] HABERT G., ROUSSEL N., Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives, *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, n° 6, 2009, p. 397-402.
- [HAB 10] HABERT G., BILLARD C., ROSSI P., CHEN C., ROUSSEL N., Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives, *Cement and Concrete Research*, vol. 40, n° 5, 2010, p. 820-826.
- [HOT 13] HOT J., BESSAIES H., BRUMAUD C., DUC M., CASTELLA C., ROUSSEL N., Adsorbing polymers and viscosity of cement pastes, submitted in *Cement and Concrete Research*.
- [HOU 99] HOUST Y. F., FLATT R. J., BOWEN P., HOFMANN H., Influence of superplasticizer adsorption on the rheology of cement paste, *Proceedings of the International RILEM Conference on The Role of Chemical Admixtures in High Performance Concrete*, Mexico, mars 1999, p. 387-402.
- [HU 96] HU C., DE LARRARD F., SEDRAN T., BOULAY C., BOSCH F., DEFLORENNE F., Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete, *Materials and Structures*, vol. 29, n° 10, 1996, p. 620-631.
- [JOL 98] JOLICOEUR C., SIMARD M. A., Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts, *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, n° 2, 1998, p. 87-120.
- [JOL 03] JOLICOEUR C., TO T. C., NGUYEN T. S., HILL R., PAGÉ M., Investigation of physico-chemical aspects of air entrainment in cementitious systems, *Proceedings of the 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Berlin, octobre 2003, ACI SP-217, p. 595-619.
- [KEN 87] KENDALL K., Interparticle friction in slurries, *Tribology in Particulate Technology*, Dunod Technique, Briscoe and Adam Edition, 1987, p. 91-102.
- [KHA 00] KHAYAT K. H., Optimization and performance of air-entrained, self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, vol. 97, n° 5, 2000, p. 526-535.
- [LAF 10] LAFARGE, Rapport de développement durable 2009, 2010.
- [LEM 09] LEMAÎTRE A., ROUX J. N., CHEVOIR F., What do dry granular flows tell us about dense non-Brownian suspension rheology?, *Rheological Acta*, vol. 48, n° 8, 2009, p. 925-942.
- [LOM 08] LOMBOIS-BURGER H., COLOMBET P., HALARY J. L., VAN DAMME H., On the frictional contribution to the viscosity of cement and silica pastes in the presence of adsorbing and non adsorbing polymers, *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n° 11, 2008, p. 1306-1314.
- [MAN 99] MANSOUTRE S., COLOMBET P., VAN DAMME H., Water retention and granular rheological behavior of fresh C_3S paste as a function of concentration, *Cement and Concrete Research*, vol. 29, n° 9, 1999, p. 1441-1453.
- [MIE 58] MIELENZ R. C., Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete Part 1 - Entrained Air in unhardened concrete, *ACI Journal Proceedings*, 1958.
- [NIE 07] NIELSEN C.V., GLAVIND M., Danish experiences with a decade of green concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 5, n° 1, 2007, p. 3-12.
- [PAP 04] PAPO A., PIANI L., Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 11, 2004, p. 2097-2101.
- [PER 12] PERROT A., LECOMPTE T., KHELIFI H., BRUMAUD C., HOT J., ROUSSEL N., Yield stress and bleeding of fresh cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol. 42, n° 7, 2012, p. 937-944.
- [PHA 06] PHAN T. H., CHAOUICHE M., MORANVILLE M., Influence of organic admixtures on the rheological behaviour of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 10, 2006, p. 1807-1813.
- [PIG 95] PIGEON M., PLEAU R., *Durability of concrete in cold climates*, Modern Concrete Technology 4, Edition E&FN SPON, Londres, 1995.
- [PRO 11] PROPARCO Groupe Agence française de développement, Le ciment, entre responsabilité écologique et impératifs économiques, *Secteur Privé & Développement*, n° 10, 2011.
- [ROU 10] ROUSSEL N., LEMAÎTRE A., FLATT R. J., COUSOT P., Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art, *Cement and Concrete Research*, vol. 40, n° 1, 2010, p. 77-84.
- [SHA 10] SHARP J., GARTNER E., MACPHEE D., Novel cement systems (sustainability). Session 2 of the Fred Glasser Cement Science Symposium, *Advances in Cement Research*, vol. 22, n° 4, 2010, p. 195-202.
- [STR 04] STRUBLE L. J., JIANG Q., Effects of air entrainment on rheology, *ACI Materials Journal*, vol. 101, n° 6, 2004, p. 448-456.
- [UCH 97] UCHIKAWA H., HANEHARA S., SAWAKI D., The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture, *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n° 1, 1997, p. 37-50.
- [WAL 03] WALLEVIK O., Rheology - a scientific approach to develop self-compacting concrete, *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, août 2003, p. 23-31.

ÉTUDE DE L'OUVRABILITÉ ET DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE MORTIERS À BASE DE SABLE RECYCLÉ

H. GOMART, E. GHORBEL, G. WARDEH

Laboratoire L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, 95031 Neuville-sur-Oise Cedex, Cergy-Pontoise

(hector.gomart@u-cergy.fr)

hector.gomart@u-cergy.fr

elhem.ghorbel@u-cergy.fr

george.wardeh@u-cergy.fr

1. INTRODUCTION

La production de granulats de recyclage est une activité de grande ampleur en France et ne cesse d'augmenter. D'après l'UNPG, Union Nationale des Producteurs de Granulats, la production totale de granulats recyclés en 2007 s'est élevée à 15 millions de tonnes issus essentiellement des travaux de démolitions. De plus, la directive européenne 2008/98/CE a fixé aux États membres un objectif de valorisation des déchets de chantiers du BTP, de l'ordre de 70 % à l'horizon 2020. La valorisation de ces déchets est un enjeu environnemental, permettant de préserver les ressources naturelles des granulats et de réduire les émissions de CO₂ des chantiers du BTP. Dans ce contexte, la réutilisation des granulats issus de la déconstruction est une solution permettant de répondre à la fois aux objectifs économiques et environnementaux.

L'utilisation des granulats recyclés dans le béton hydraulique n'est pas récente et de nombreuses études prouvent qu'un béton formulé avec des granulats recyclés peut avoir des caractéristiques mécaniques satisfaisantes par comparaison à celles d'un béton traditionnel formulé avec des

granulats naturels [EVA 07]. Cependant, la majorité des études se limitent à l'utilisation de gravillons et très peu se sont intéressées à la substitution du sable naturel par un sable recyclé. Les travaux disponibles se sont limités à la caractérisation des propriétés mécaniques en fonction du taux de substitution du sable. Récemment les auteurs ont présenté une étude [GOM 12] qui montrait l'influence du sable recyclé sur les propriétés à l'état frais et le comportement mécanique, en se limitant à des mortiers à ouvrabilité variable. Les résultats ont montré une diminution de l'ouvrabilité et de la résistance mécanique en fonction du taux de substitution, avec des propriétés mécaniques relativement élevées de l'ordre de 75% par rapport au mortier de référence.

L'objectif de ce présent travail est de déterminer l'influence de la substitution volumique du sable naturel par du sable recyclé, ainsi que l'influence du rapport E/C , sur les propriétés à l'état frais et les caractéristiques mécaniques de mortiers. Pour ce faire, deux séries de mortiers ont été fabriquées en substituant le sable naturel par un sable recyclé, l'une en maintenant les dosages en constituants constants, l'autre à ouvrabilité constante. À l'état

frais, des mesures du taux d'air occlus et de l'affaissement ont été réalisées de façon systématique sur l'ensemble des échantillons. L'évolution de l'ouvrabilité au cours du temps a également été étudiée. À l'état durci, la microstructure a été finement décrite par des essais de porosité accessible à l'eau, complétés par des mesures de porosité par intrusion mercure. La résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique ont été mesurés sur des éprouvettes à l'âge de 28 jours. Des corrélations entre les propriétés mécaniques et les paramètres microstructuraux (porosité totale, taux d'air occlus) ont été établies.

2. FORMULATION

2.1. Matériaux utilisés

- Les mortiers ont été fabriqués en utilisant :
- un ciment Calcia de type CEM I – 52,5 N CE CP2, en conformité avec la norme NF EN 197-1,
 - un superplastifiant Cimfluid 3002, produit par la société Axim Italcementi. Le pourcentage d'extrait sec est de 35% et est conforme à la norme EN 934-2,
 - un sable naturel de type silico-calcaire roulé de classe granulaire 0/4,
 - un sable recyclé issu du tamisage au laboratoire de granulats provenant d'une usine de retraitement des matériaux de démolition.

Les propriétés des deux types de sable sont données dans le Tableau 1. On remarque que l'équivalent de sable du recyclé (défini par la norme NF EN 933-8) est inférieur à celui du sable naturel, mais correspond tout de même à un sable propre, apte à la fabrication des mortiers. La compacité du sable recyclé est également inférieure à celle du sable naturel. En revanche le sable recyclé présente un coefficient d'absorption (WA_{24}), mesuré selon la norme NF EN 1097-6, bien supérieur à celui du sable naturel. Ceci est dû à la présence de la matrice cimentaire dans le sable recyclé.

La distribution granulométrique de ces deux types de sables a été mesurée par la méthode classique de tamisage décrite dans la norme EN 933-1. Les mesures ont été effectuées à cinq reprises et les résultats donnés ci-après correspondent à la moyenne de ces valeurs. Les courbes granulométriques représentées à la Figure 1 montrent que les deux sables possèdent des répartitions granulomé-

triques proches l'une de l'autre. Cependant, le sable recyclé est plus riche en éléments fins que le sable naturel et possède un module de finesse plus faible quoique admissible pour la formulation d'un béton classique (cf. Tableau 1).

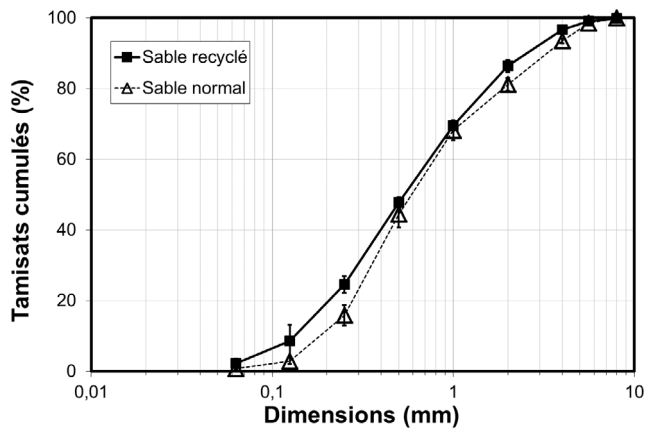


Figure 1. Courbes granulométriques du sable normal et du sable recyclé.

2.2. Formulation des mortiers

Deux séries de mortiers ont été élaborées en remplaçant une partie du sable naturel par du sable recyclé. Le mortier de référence correspond au mortier de béton équivalent (MBE) d'un béton ordinaire de classe S4 (étalement 18 ± 2 cm) et de résistance à la compression $f_{c,28} = 30$ MPa [MOH 11]. Pour chaque série, le taux de substitution volumique varie entre 0% et 100%. Les sables naturels et recyclés ont été séchés au préalable à l'étuve à 110 ± 5 °C, jusqu'à stabilisation de la masse. Dans ce qui suit on définit l'eau efficace, E_{eff} , la quantité d'eau totale, E_{tot} , de laquelle on soustrait celle absorbée par le sable, M_s , dans l'hypothèse où le phénomène est considéré rapide et ayant lieu pendant la période de malaxage ($E_{eff} = E_{tot} - WA_{24} \times M_s$). Cette hypothèse est discutable mais correspondrait à un mode opératoire dans lequel les granulats seraient introduits à l'état humide. Les compositions massiques des deux séries sont données dans le Tableau 2. On remarque que :

	Sable naturel	Sable recyclé
Compacité (%)	89,5	85,8
Équivalent de sable (%)	85	72
Coefficient d'absorption d'eau WA_{24} (%)	1,7	9,0
Masse volumique absolue (kg/m³)	2550	2145
Module de finesse	2,82	2,66

Tableau 1. Propriétés des granulats

- La première série (série 1) est à ouvrabilité variable. Elle est formulée en maintenant constants les dosages en ciment, en eau totale et en superplastifiant [GOM 12]. Il est à noter qu'au-delà de 75% ce mortier ne peut plus être mis en œuvre par manque d'ouvrabilité ; le taux de substitution à 100% n'a donc pas été formulé. On remarque que le rapport E_{eff}/C diminue, puisqu'à eau totale fixe, la quantité du sable recyclé, fortement poreux, augmente.
- La seconde (série 2) a été formulée pour les mêmes taux de substitution volumique en sable, mais de telle sorte que l'ouvrabilité reste constante (classe S4), en jouant sur le volume d'eau et sans modifier la quantité de superplastifiant.

Les mortiers ont été élaborés dans un malaxeur à béton en mélangeant dans un premier temps les matériaux secs pendant 1 min, puis 4 min après l'ajout de l'eau mélangée au superplastifiant. Tous les mortiers ont été mis en place à la table vibrante.

3. PROPRIÉTÉS DES MORTIERS À L'ÉTAT FRAIS

Les propriétés à l'état frais des deux séries de mortiers ont été analysées. Les résultats de la masse volumique reportés au Tableau 3 correspondent à une moyenne des valeurs obtenues pour cinq essais. Globalement, la masse volumique du mortier diminue avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable recyclé, ce qui est conforme à nos attentes puisque la masse volumique du sable recyclé est inférieure à celle du sable naturel (Tableau 1).

Des mesures de l'air occlus ont été réalisées (aéromètre CONTROLS / 1L). On observe un accroissement de l'air occlus pour les deux séries de mortiers. Cet accroissement est comparable pour les deux séries ; pour un taux de substitution de 75%, l'air occlus enregistre une augmentation de l'ordre de 73% pour la série 1 et 87% pour la série 2.

	SR 0%	SR 30%	SR 50%	SR 75%	SR 100%
<i>Série 1 – ouvrabilité variable</i>					
Ciment (kg/m ³)	600	600	600	600	—
Eau totale E_{tot} (kg/m ³)	280	280	280	280	—
E_{eff}/C	0,47	0,42	0,39	0,34	—
Sable naturel (kg/m ³)	1275	893	637	318	—
Sable recyclé (kg/m ³)	—	326	544	816	—
Superplastifiant (kg/m ³)	1	1	1	1	—
Masse volumique théorique (kg/m ³)	2156	2100	2062	2015	—
<i>Série 2 – ouvrabilité constante (18 ± 2 cm)</i>					
Ciment (kg/m ³)	600	576	559	544	528
Eau totale E_{tot} (kg/m ³)	280	306	326	343	361
E_{eff}/C	0,47	0,48	0,50	0,51	0,52
Sable naturel (kg/m ³)	1275	858	593	288	—
Sable recyclé (kg/m ³)	—	313	507	740	957
Superplastifiant (kg/m ³)	1	1	0,9	0,9	0,9
Masse volumique théorique (kg/m ³)	2156	2054	1986	1915	1846

Tableau 2. Composition des deux séries de mortiers de sables recyclés

	SR 0%	SR 30%	SR 50%	SR 75%	SR 100%
<i>Série 1 – ouvrabilité variable</i>					
Air occlus (%)	1,5±0,3	2,1±0,4	2,8±0,3	2,6±0,4	—
Masse volumique (kg/m ³)	2139±9	2066±7	2062±3	2052±8	—
Affaissement (cm)	12,0	5,0	2,3	0	—
<i>Série 2 – ouvrabilité constante (18 ± 2 cm)</i>					
Air occlus (%)	1,5±0,3	2,0±0,5	3,0±0,4	2,8±0,1	3,0±0,4
Masse volumique (kg/m ³)	2139±9	2105±7	2096±8	2029±15	1970±6

Tableau 3. Propriétés à l'état frais des deux séries de mortiers.

Cette augmentation est probablement liée à l'excédent d'eau contenu dans les mortiers qui en s'évaporant génère des bulles d'air piégé (air occlus plus important pour la série 2). Elle peut également être due à la moins bonne compacité du sable recyclé. L'un des effets des vides provoqués par l'air occlus est la réduction de la résistance à la compression du béton. D'après l'équation de Férret, le volume d'air joue un rôle important sur la résistance mécanique de la pâte de ciment hydraté, au même titre que le volume d'eau et de ciment, au regard de la résistance mécanique à la compression.

L'ouvrabilité au cours du temps a également été mesurée. Les résultats de la série 1 montrent une augmentation de la cinétique de la perte d'ouvrabilité avec le taux de substitution [GOM 12]. L'évolution de l'affaissement normalisé de la série 1 est représentée sur la Figure 2a, celle de la série à ouvrabilité constante sur la Figure 2b. On observe :

- une diminution de l'affaissement normalisé au cours du temps pour les mortiers recyclés quel que soit la méthode de formulation. Cette diminution est expliquée en partie par le fait que le sable recyclé continue à absorber une partie de l'eau au cours du temps.
- Pour des taux de substitution supérieurs à 50% l'évolution du maintien au cours du temps est identique pour

tous les mortiers quel que soit la série. Elle est modélisée par l'équation suivante :

- Pour la série 2, on remarque que la diminution du maintien au cours du temps du SR30% est moins importante que celles notées pour les compositions avec un taux de substitution > 50%.

4. PROPRIÉTÉS DES MORTIERS À L'ÉTAT DURCI

4.1. Microstructure porale

4.1.1. Porosité à l'eau

Des mesures de porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique ont été menées sur chaque jeu d'échantillons, selon la procédure proposée par l'AFPC – AFREM [AFPC 97]. Celles-ci ont été effectuées après conservation des échantillons dans un bain d'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours. Chaque essai a été réalisé sur deux prélèvements d'environ 36 cm³ découpé au centre d'éprouvettes de dimensions 11x22 cm.

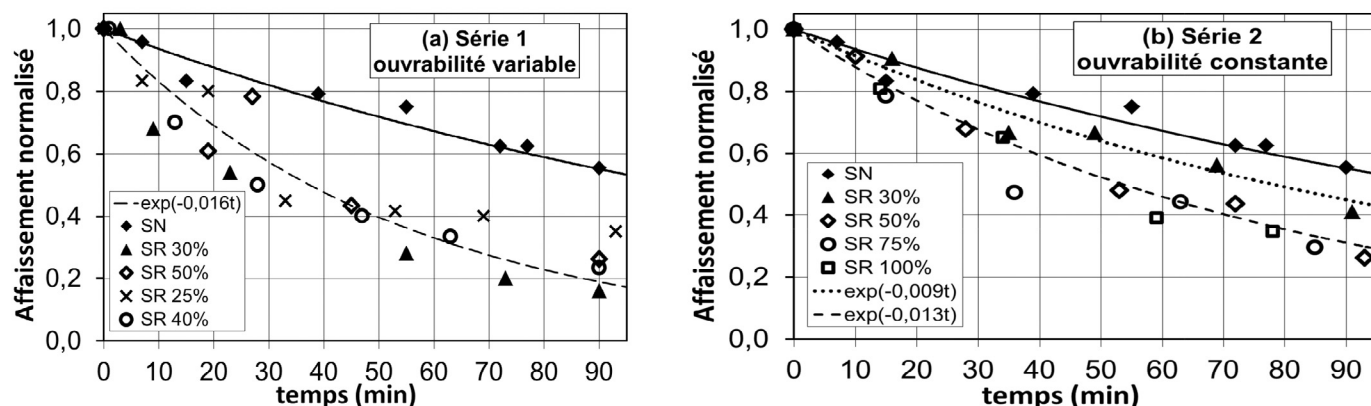


Figure 2. Évolution de l'affaissement normalisé de (a) la série 1 [GOM 12] et de la (b) série 2 au cours du temps.

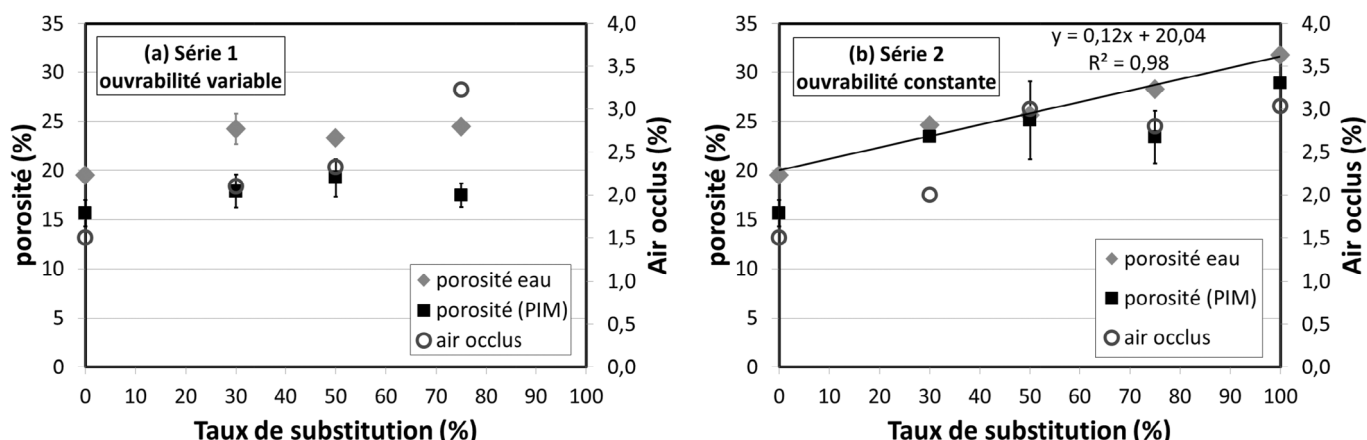


Figure 3. Porosité à l'eau, porosité par injection de mercure (PIM) et air occlus pour (a) la série 1 et (b) la série 2.

Les résultats de la porosité à l'eau sont représentés à la Figure 3. Le mortier de référence possède une porosité de 19%. Pour les mortiers à ouvrabilité variable, la porosité des mortiers recyclés augmente mais ne semble pas être affectée par le taux de substitution. Elle atteint une valeur moyenne égale à 24% (Figure 3a). Ce phénomène peut s'expliquer par la compétition entre la diminution du rapport E_{eff}/C , responsable de la diminution de la porosité [BAR 01], et par l'augmentation de la quantité de sable recyclé, capable d'absorber l'excédent d'eau responsable des espaces libres laissés dans le mortier (cf. air occlus Tableau 3). En revanche, pour la série à ouvrabilité constante, la porosité croît linéairement de 19% à 32%, pour l'échantillon SR100% (Figure 3b). Pour cette série la quantité totale d'eau introduite lors du malaxage conduit inévitablement à l'augmentation de l'air occlus et de la porosité à l'état durci.

4.1.2. Porosité mercure

Afin de compléter la description microstructurale de ces mortiers, une étude de porosimétrie par intrusion de mercure (AutoPore IV 9500 – Micromeritics) a été réalisée sur les deux séries. Chaque échantillon a été conservé dans un bain d'eau à température ambiante jusqu'à la conduite des mesures (28 jours), puis séché à l'étuve à $(75 \pm 5)^\circ\text{C}$ pendant 48 h, afin de ne pas fragiliser la matrice cimentaire. Chaque mesure est réalisée sur deux cubes d'environ 4 cm^3 , découpés au cœur des éprouvettes.

La porosité par intrusion de mercure (PIM) est également représentée sur la Figure 3. Les valeurs obtenues par la méthode PIM viennent corroborer les résultats obtenus par la porosité accessible à l'eau. En effet, l'évolution de la porosité mercure montre un comportement comparable aux résultats de la porosité à l'eau pour les séries 1 et 2, respectivement, avec toutefois une sous-estimation des valeurs ; ceci est dû au fait que la méthode PIM ne permet pas d'atteindre ni les petits pores (6 nm) ni ceux dont le diamètre est supérieur à $360\text{ }\mu\text{m}$.

La Figure 4 montre la répartition porométrique des deux séries de mortiers. La distribution porale du mortier de référence présente deux familles de pores très rapprochées, la principale étant centrée autour de 60 nm et la

seconde autour de 100 nm . Les courbes des mortiers à ouvrabilité variable (Figure 4a) montrent un comportement similaire à celui de référence jusqu'à 50% de taux de substitution. À 75%, la seconde famille de pores est centrée autour de 200 nm . Pour la série 2, les résultats montrent une microstructure très différente. En effet, dès 30%, il apparaît une famille de pores supplémentaire, cf. Figure 4b. Les diamètres des pores sont de l'ordre de 60 nm , 300 nm et $1,3\text{ }\mu\text{m}$ (pores capillaires). Le décalage et la création de la nouvelle famille de pores pour la série 2 pourraient être liés à l'augmentation de la quantité d'eau totale [VER 68].

4.2. Propriétés mécaniques

Des éprouvettes cylindriques $11 \times 22\text{ cm}$ ont été fabriquées afin de caractériser la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique. Ces éprouvettes ont été démoulées au bout de 24 h, puis immergées dans un bain d'eau à température ambiante, jusqu'à l'âge de 28 jours. Les éprouvettes ont été systématiquement retirées du bain 3 h avant les essais. Les essais de compression ont été réalisés à l'aide d'une presse de type Schenck à asservissement hydraulique d'une capacité de 3500 kN , assistée par ordinateur. Les essais sont réalisés à une vitesse de contrainte de $0,5\text{ MPa/s}$. Le module d'élasticité dynamique, E_d , a été déterminé à l'aide d'un appareil de mesure de la fréquence de résonance (E-Meter MK II). Chaque essai de compression et du module d'élasticité dynamique a été réalisé sur cinq éprouvettes et les résultats présentés ci-dessous correspondent à la moyenne des valeurs obtenues.

La résistance à la compression, R_c , à 28 jours en fonction du taux de substitution est reportée sur la Figure 5. La résistance R_c du mortier de référence s'élève à 48 MPa . On observe :

- Pour la série 1, une diminution de la résistance mécanique pour SR30%, ($R_c = 40\text{ MPa}$) suivie immédiatement d'un palier jusqu'à SR75%. Bien qu'on note une légère diminution pour ce dernier échantillon, les résistances restent élevées puisqu'elles représentent encore 75% de celles du mortier de référence.

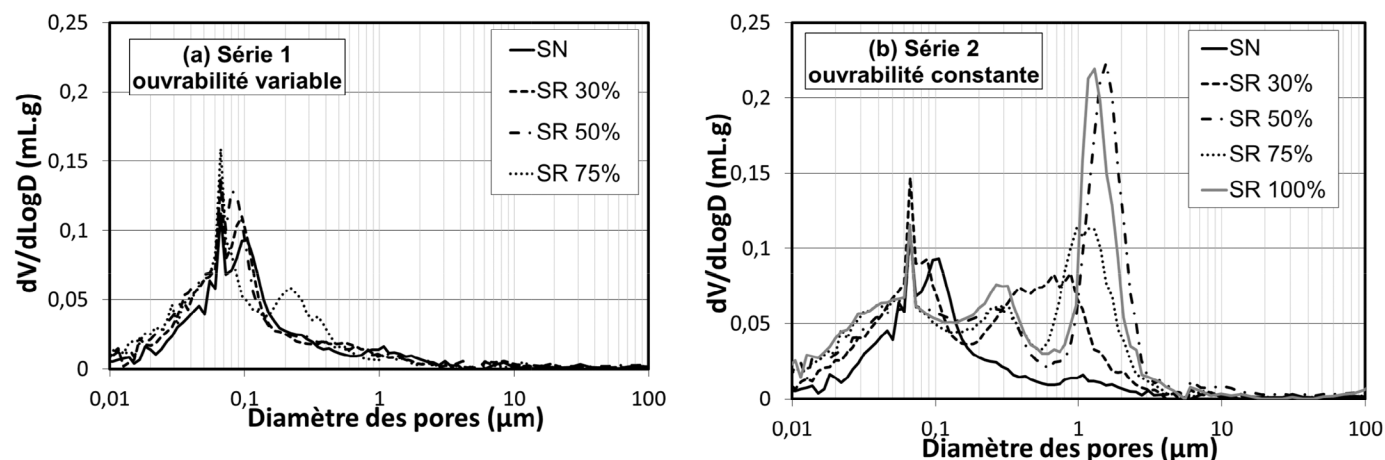


Figure 4. Distribution de la taille des pores (a) de la série 1 et (b) de la série 2.

– Pour la série 2 à ouvrabilité constante, les valeurs de R_c décroissent linéairement pour atteindre 28 MPa pour SR100%, soit 60% de la résistance du mortier de sable naturel. Pour SR75% on note que R_c vaut 65% de celle du mortier de référence.

La Figure 6 illustre l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la porosité à l'eau. On observe une très bonne corrélation entre la porosité et la résistance à la compression d'une part, et le module d'élasticité d'autre part. Il est à noter que dans le cas de la série 1, les points correspondant à R_c et E_d , respectivement sont très rapprochés pour les échantillons contenant du sable recyclé, ce qui correspond au palier observé pour la porosité à l'eau (cf. Figure 3a).

5. CONCLUSIONS

Le présent travail s'intéresse à l'effet de l'utilisation du sable recyclé sur les propriétés à l'état frais et durci de

deux séries mortiers : l'une à ouvrabilité variable (série 1), l'autre à ouvrabilité constante (série 2). Les résultats de cette étude ont montré que :

1. Pour la série 2 à ouvrabilité constante, le sable recyclé joue un rôle prépondérant sur le maintien au cours du temps, puisque du fait de sa forte porosité, il continue à absorber une partie de l'eau libre.
2. Les deux séries ont des microstructures très différentes dues en partie à des rapports E/C distincts et à la structure poreuse du sable recyclé.
3. L'étude des propriétés mécaniques a permis de montrer une bonne corrélation avec l'évolution de la porosité. Dans le cas des mortiers à ouvrabilité variable R_c et E_d diminuent pour atteindre un palier dès 30% de sable recyclé, tandis que la série à ouvrabilité constante R_c et E_d décroissent linéairement.
4. A des taux de substitution élevés, ces mortiers présentent des caractéristiques mécaniques performantes. Il est donc envisageable de substituer le sable naturel par du recyclé dans des bétons de classe S4, voire des bétons auto-plaçant.

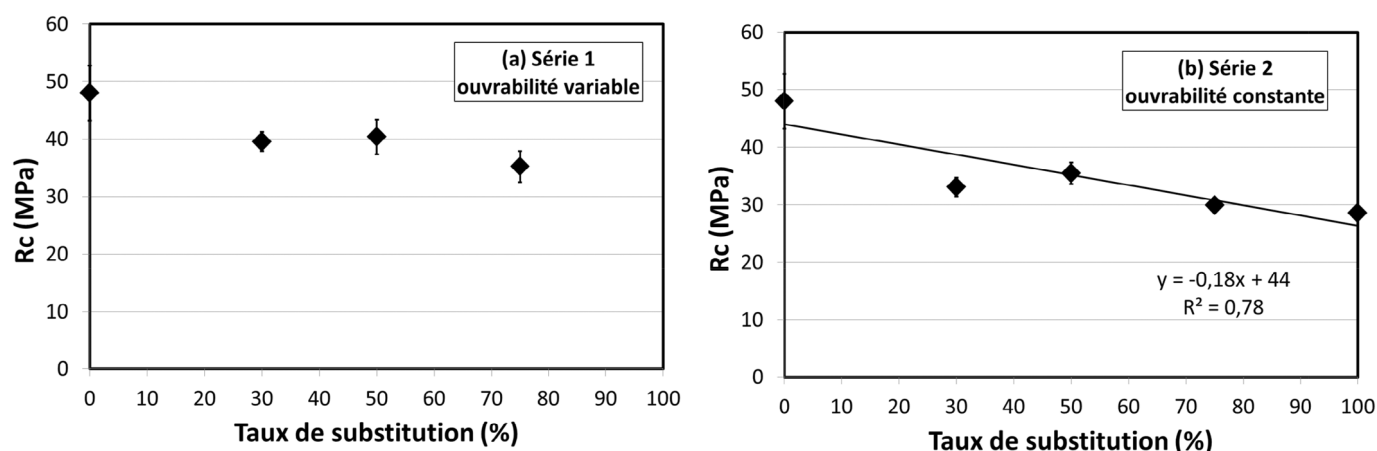


Figure 5. Évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du taux de substitution.

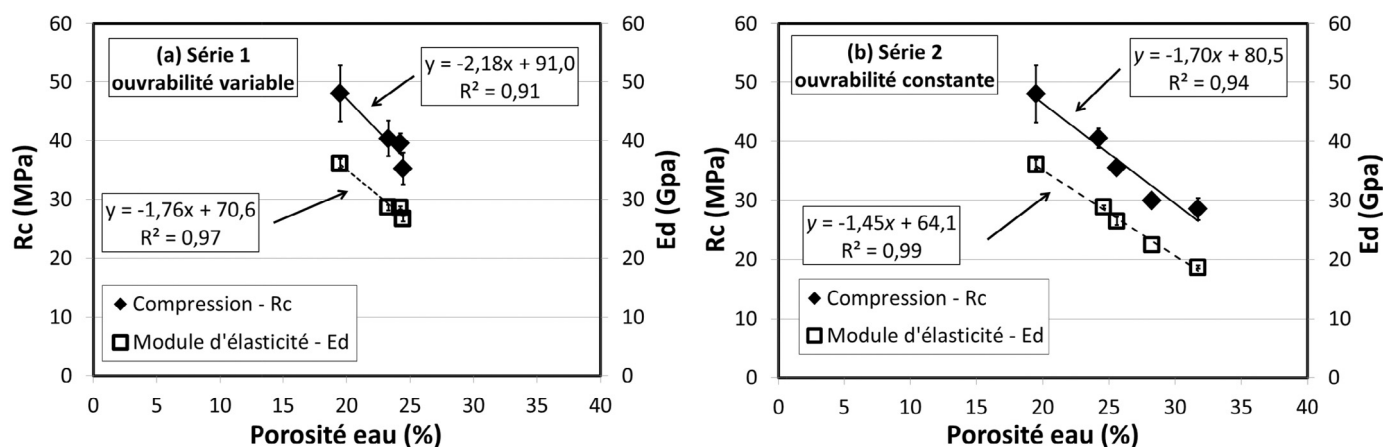


Figure 6. Évolution de la résistance à la compression et du module d'élasticité à 28 jours en fonction de la porosité.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [AFPC 97] AFPC-AFREM, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », Compte rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM : Durabilité des Bétons, Toulouse, 11-12 décembre 1997, France, p. 59-64.
- [BAR 01] BAROGHEL-BOUNY V., AMMOUCHE A., HORNAIN H., « Matrices cimentaires Analyse de la microstructure et propriétés de transfert », *Revue française de génie civil*, vol 5 n°2-3, 2001, p.149-177.
- [EVA 07] EVANGELISTA L., DE BRITO J. (2007), « Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates », *Cement & Concrete Composites*, vol. 29, n°5, 2007, p. 397-401.
- [GOM 12] GOMART H., GHORBEL E., WARDEH G., « Formulation et caractérisation mécanique de mortiers à base de sable de bétons recyclés », *Conférence internationale francophone Nouveaux matériaux et durabilité NoMaD 2012*, Toulouse, 19-20 novembre 2012, France, p. 386-397.
- [MOH 11] MOHAMED A.S.M., Influence de la valorisation de micro-fibres végétales sur la formation et la résistance aux cycles de gel-dégel de BAP, Thèse de doctorat, Université Cergy-Pontoise, 2011.
- [VER 68] VERBECK, G.J., HELMUTH R.H., « Structures and Physical Properties of Cement Paste », *Proceedings of the 5th International Symposium on Chemistry of Cement*, Tokyo, 7-11 octobre 1968, Japon, p. 1-32.

INFLUENCE DU SÉCHAGE SUR LES PROPRIÉTÉS D'ADHÉRENCE D'UN MORTIER ADJUVANTÉ PAR UN ÉTHER DE CELLULOSE

T. MAUROUX¹, Ph. TURCRY^{1,*}, F. BENBOUDJEMA², A. AIT-MOKHTAR¹, B. RUOT³

¹ LaSIE, FRE-CNRS 3474, Université de La Rochelle, Avenue Michel Crépeau, 17000 La Rochelle

² LMT-Cachan, ENS-Cachan, Paris 6 University, CNRS, UniverSud Paris PRES, 61 Avenue du président Wilson, 94230 Cachan

³ CSTB, 84 Avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée

*philippe.turcry@univ-lr.fr
benboud@ens-cachan.fr
karim.ait-mokhtar@univ-lr.fr
bertrand.ruot@cstb.fr

1. INTRODUCTION

A la différence des bétons de structure, les mortiers industriels – enduits, chapes ou colles – ont fait l'objet de peu de travaux de recherche. Ces matériaux à la formulation complexe contiennent, en plus du sable et des liants, des polymères (éther de cellulose, latex, etc.) qui modifient fortement leurs comportements.

C'est dans ce contexte qu'un consortium d'étude et de recherche sur les mortiers (CEReM) regroupant une vingtaine d'industriels nationaux et internationaux du secteur (mortiers industriels, adjuvants, additions minérales, etc.) et de laboratoires universitaires a été créé sous l'égide du CSTB afin de mener des études sur les performances à court et à long terme (durabilité) de ces matériaux.

Le phénomène étudié ici est la perte d'adhérence liée au séchage d'un mortier enduit sur un support. Le retrait de séchage génère des contraintes de traction au sein du mortier et/ou à l'interface entre le mortier et son support. La fissuration résultante dégrade la qualité de l'adhérence entre les deux matériaux et la viabilité du système. Pour

contrôler le risque de fissuration, une cure prolongée, c'est-à-dire une protection contre le séchage après la mise en place, est a priori une solution efficace, si on se réfère à la littérature sur le retrait des bétons [NEV 90]. Il est connu que le séchage ralentit l'hydratation du ciment et modifie le développement des propriétés mécaniques (diminution du module de Young et de la résistance en traction et augmentation de la résistance en compression, e.g. [YUR 06]). Pour étudier l'influence de la cure sur l'adhérence entre un mortier et un support, une campagne expérimentale a été menée sur une composition de mortier industriel « type » contenant pour adjuvant des éthers de cellulose.

Dans un premier temps, le mortier a été caractérisé seul, en conditions endogènes et pour différents temps de cure (1, 3 et 7 jours). L'hydratation du ciment a été étudiée par analyse thermogravimétrique. Le retrait de séchage et la perte de masse due au séchage ont été mesurés, en conditions contrôlées, en fonction du temps pour les trois durées de cure. Les propriétés mécaniques, résistance à la traction et module élastique, ont été déterminées dès le jeune âge au moyen d'essais de flexion.

Dans un second temps, le complexe mortier/support a été étudié. Le support utilisé est un bloc de béton avec différents états de surface (lisse ou sablée). L'adhérence du système a été déterminée à l'aide d'essais de cisaillement à l'interface et d'essais d'arrachement. Les conséquences du retrait, c'est-à-dire la fissuration du mortier et/ou de l'interface mortier/support, ont été observées avec un dispositif original basé sur la corrélation d'images.

L'ensemble des résultats nous permet d'évaluer et d'analyser l'influence de la cure sur l'adhérence entre le mortier étudié et son support.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1. Matériaux étudiés

Typique des mortiers industriels, la composition étudiée contient un ciment CEMI 52.5, un sable siliceux 0/2 mm et un filler siliceux, dont les proportions massiques dans le mélange sec sont respectivement 30, 65 et 5%. A ces constituants s'ajoute un éther de cellulose (hydroxypropyl-méthyl cellulose ou MHPC) dosé à 0,1%. Le rapport E/C est égal à 1 (la stabilité du mélange est assurée par l'éther de cellulose). Après un malaxage de 30 min, le mortier obtenu est très fluide avec environ 5% d'air occlus.

Différentes durées de cure ont été étudiées : 1, 3 et 7 jours. La cure s'entend ici comme une protection contre la dessiccation des échantillons (conservation à 23°C dans le moule enveloppé dans un polyane et aluminium adhésif). Dans le cas des essais d'adhérence, le mortier a été appliqué sur des supports en béton cubiques (20x20x20 cm³) respectant la norme EN 1766:2000, réalisés par une société spécialisée avec trois traitements de surface : une surface sciée et deux surfaces sablées de profondeur (1-2 mm) et (3-4 mm). Deux semaines avant les essais, les blocs sont placés dans les conditions d'humidité et de température d'essais (60±5% H.R. et 23±2°C).

2.2. Protocoles expérimentaux

2.2.1. Caractérisation du mortier

La caractérisation du mortier a été effectuée au moyen de prismes 2x4x16 cm. La cinétique d'hydratation du ciment a été étudiée par analyse thermogravimétrique (ATG). Des échantillons ont été prélevés, à diverses échéances, dans des prismes conservés en conditions endogènes. Afin d'évaluer l'impact du séchage, des éprouvettes prismatiques ont été conservées, après décoffrage à 1 ou 7 jours, dans une enceinte à 60% HR et 23°C. A diverses échéances, des échantillons de 5 mm de côté ont été prélevés par sciage en bordure des prismes (proche de la surface à l'air libre).

La porosité accessible à l'eau a été mesurée en suivant le protocole de l'AFPC-AFREM. Le retrait et la perte de masse due au séchage ont été mesurés, à 60% HR et 23°C, sur les prismes équipés de plots aux extrémités. Pour assurer un séchage symétrique, les côtés (2x4 cm) ont été étanchéifiés avec de l'aluminium adhésif. Cette disposition permet d'être représentatif d'un mortier séchant sur une seule face. Des isothermes de sorption et désorption ont été mesurées avec des méthodes « statiques » et dynamiques » [MAU 11]. Enfin, les propriétés mécaniques, résistance à la traction et module élastique, ont été déterminées dès le jeune âge au moyen d'essais de flexion avec mesure des déplacements par analyse d'images.

2.2.2. Caractérisation du système « mortier / support »

Les performances mécaniques du système « mortier / support » (adhérence) ont été déterminées à l'aide d'essais de cisaillement pratiqués à l'interface, dits essais « bi-surface », et d'essais d'arrachement, dits « pull off » (fig. 1). La fissuration due au retrait, dans le mortier et/ou à l'interface mortier/support, a été observée avec un dispositif original basé sur la corrélation d'images (fig. 2) [HIL 02]. Les dispositifs expérimentaux sont décrits en détails dans [MAU 11] [MAU 12].

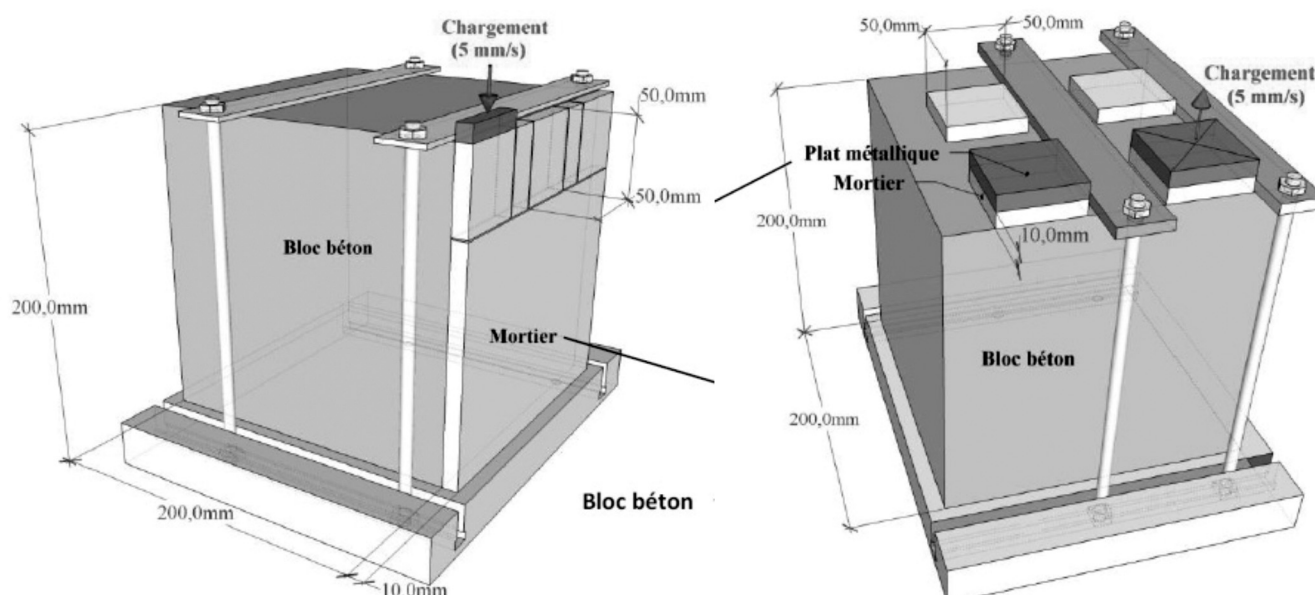


Figure 1. Dispositifs de caractérisation de l'adhérence entre mortier et support : essai « bi-surface » (à droite) et « pull-off » (à gauche).

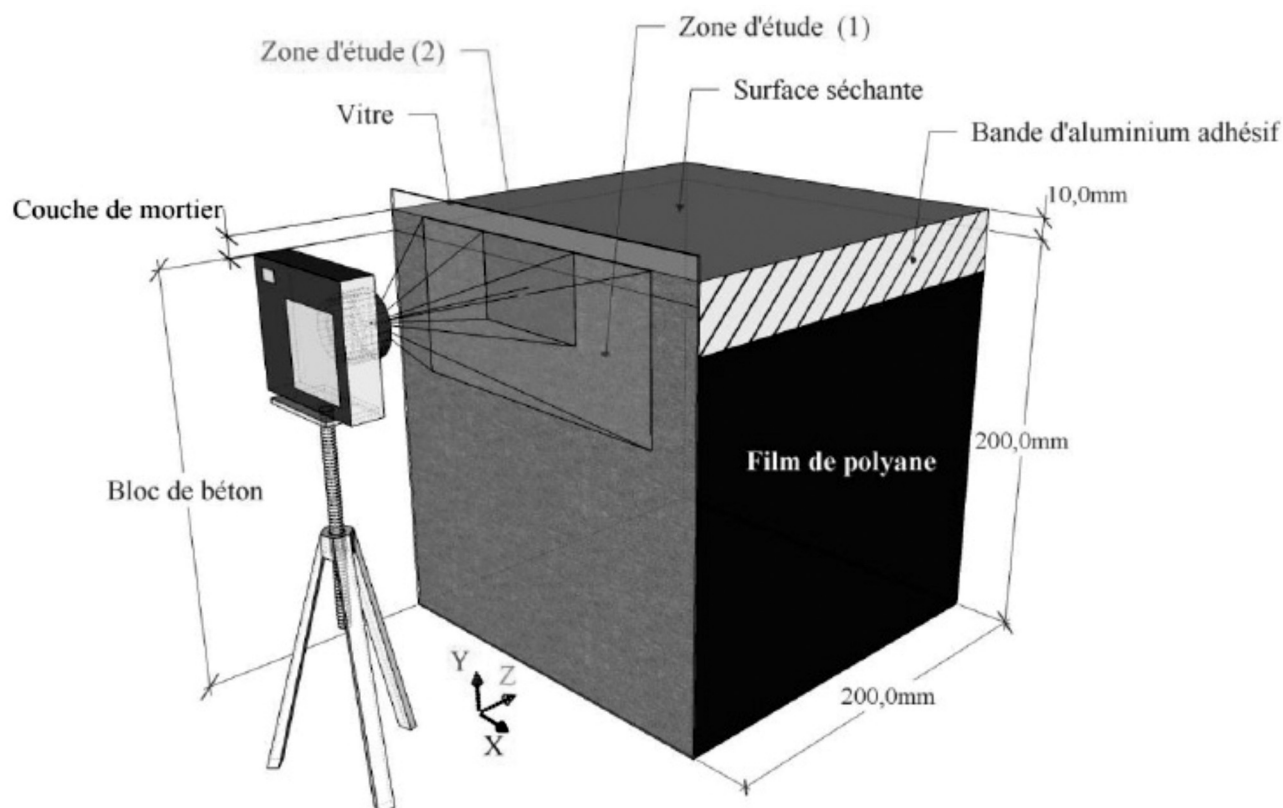


Figure 2. Dispositif de suivi de la fissuration due au retrait dans une zone d'étude à l'interface mortier / support.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Influence du temps de décoffrage sur l'adhérence

Quel que soit le mode de mesure, « bi-surface » ou « pull-off », une cure prolongée, de 1 à 7 jours, n'a pas d'effet bénéfique sur l'adhérence du mortier sur le support. Le seul cas où la cure améliore l'adhérence est celui du support lisse (surface sciée) pour lequel le mortier décoffré à 1 jour est complètement décollé après quelques jours de

séchage (les essais d'adhérence n'ont pas été réalisés et la contrainte à la rupture a été posée nulle sur la figure 3). Pour les deux supports à surface sablée, l'adhérence à 30 jours est du même ordre de grandeur pour toutes les durées de cure. Les contraintes à la rupture obtenues par « pull-off » se sont même révélées plus élevées pour un décoffrage à 1 jour.

Ces résultats sont en contradiction avec les tendances classiquement observées dans le cas des bétons. En effet, la cure améliore la plupart des propriétés du matériau. Nous analysons dans la suite les causes de cette contradiction.

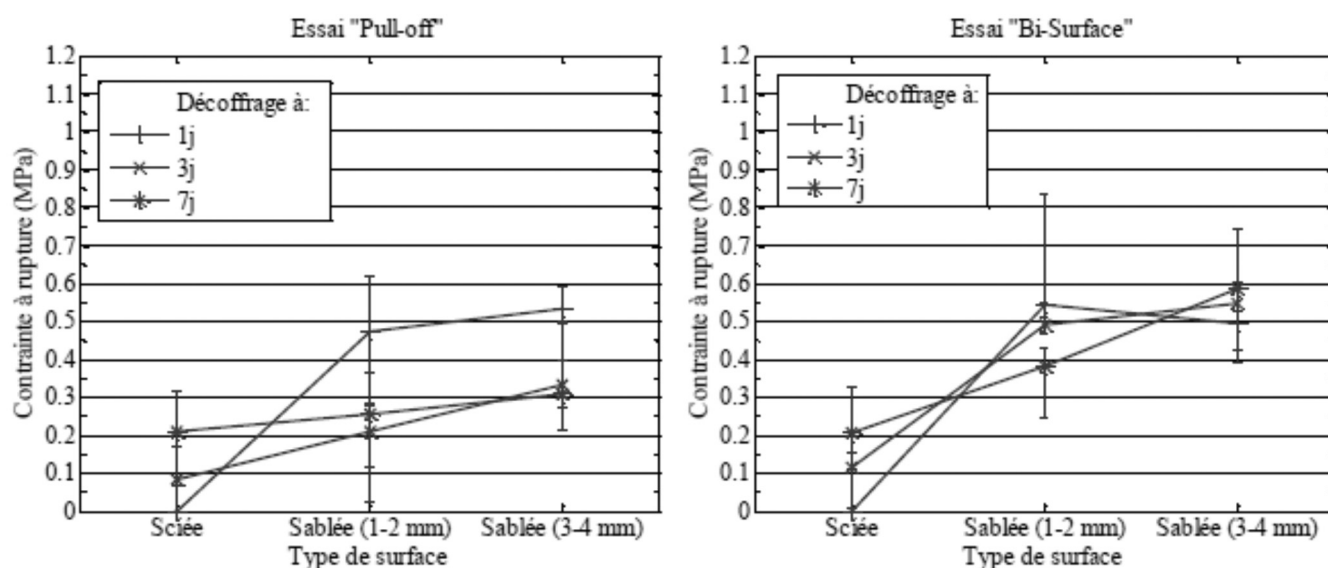


Figure 3. Contraintes à la rupture mesurées par essais « pull-off » ou « bi-surface », à 30 jours, pour 3 durées de cure et 3 types de surfaces.

3.2. Fissuration à l'interface

La figure 4 donne un exemple de cartographie de l'endommagement calculé à partir des images prises à l'aide du dispositif de suivi de la fissuration (fig. 2). Connaissant les champs de déplacement, il est possible d'estimer l'ouverture des fissures à l'interface (discontinuité du déplacement).

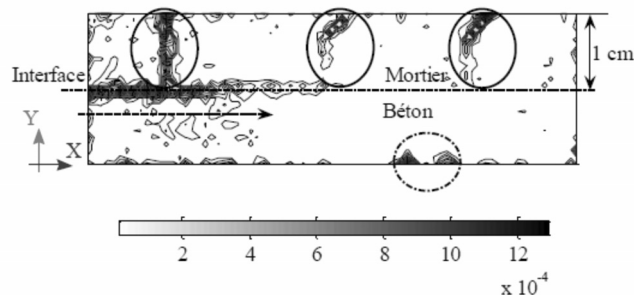


Figure 4. Exemple de cartographie de l'endommagement calculé, à partir d'une analyse par corrélation d'images, dans la zone à l'interface entre mortier et support.

ment). La figure 5 donne les ouvertures à l'interface pour chaque durée de cure et support. Les ouvertures ont été tracées en fonction du retrait libre de séchage (moteur de la fissuration).

Le résultat pour la surface sciée confirme les observations précédentes sur l'adhérence : le mortier décoffré à 1 jour est totalement désolidarisé du support (ouverture de fissure de plus de 100 μm mesurée en fin d'essai). De même, les tendances obtenues avec les essais d'adhérence pour les supports sablés se corrént bien avec celles obtenues pour la fissuration : la cure n'a pas d'effet bénéfique et, au contraire, de plus grandes ouvertures sont mesurées pour les durées de cure les plus longues.

3.3. Influence de la cure sur les propriétés du mortier

Le suivi de l'hydratation par ATG montre que le séchage affecte l'hydratation du ciment : la quantité de Portlandite

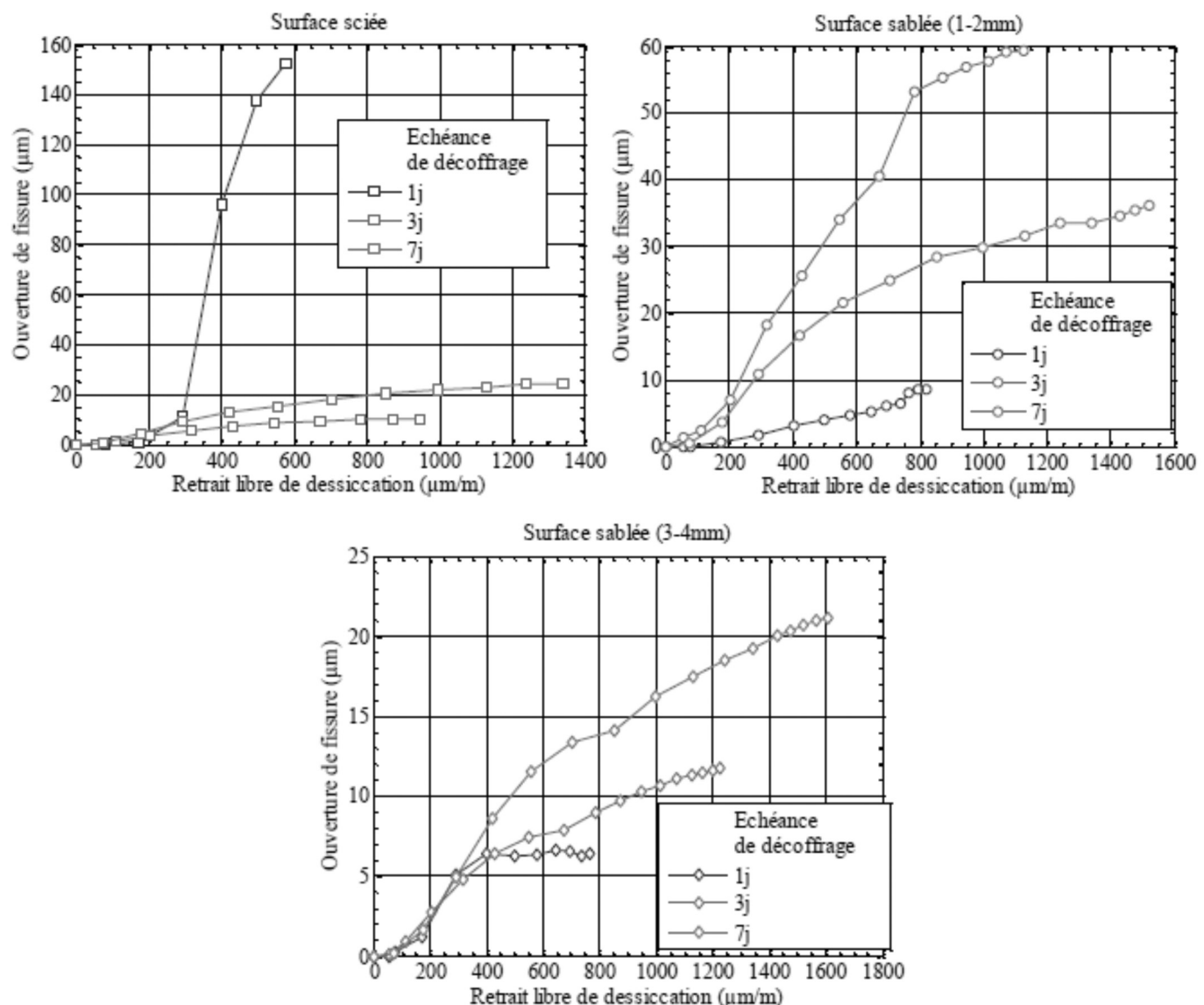


Figure 5. Ouverture de fissures à l'interface mortier/support en fonction du retrait libre, pour les 3 durées de cures et les 3 types de support.

dans les échantillons prélevés à proximité de la surface soumise au séchage n'évolue quasiment plus après le décoffrage à 1 jour (fig. 6). Plus la cure est longue, plus l'hydratation est avancée [POW 47]. Les essais de flexion le confirment : la résistance à la traction et le module élastique mesurés à l'âge de 30 jours sont environ 20% plus faibles pour un décoffrage à 1 jour que pour une conservation en conditions endogènes.

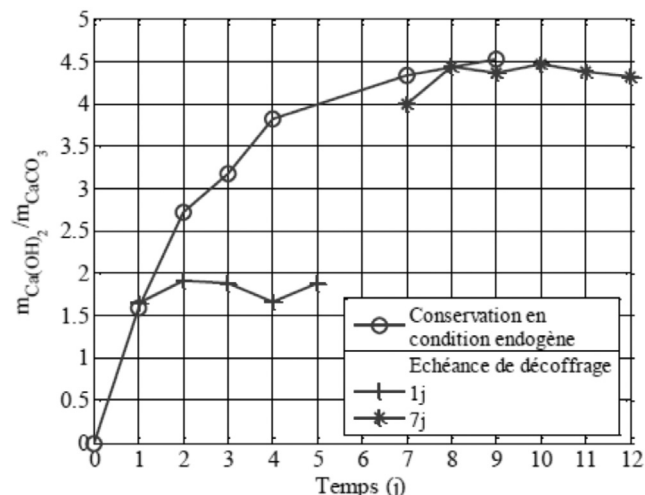


Figure 6. Masses de Portlandite mesurées par ATG dans des échantillons en conditions endogènes ou prélevés proche de la surface à l'air libre (rapportées au CaCO_3 , qui sert de marqueur du ciment car présent uniquement dans ce celui-ci).

En définitive, la seule propriété mesurée qui s'accorde bien aux résultats des essais de l'adhérence ou du suivi de la fissuration à l'interface est le retrait de séchage. En effet, le retrait libre a une amplitude plus grande dans le cas d'un décoffrage à 7 jours que dans le cas d'un décoffrage à 1 jour (fig. 7). C'est un phénomène étonnant au regard de la littérature sur les bétons. Notons néanmoins que Monge avait obtenu une même tendance sur des mortiers contenant des latex ou des éthers de cellulose [MON 07]. Les résultats sur pâte de ciment de Ferraris montrent des tendances en accord avec nos résultats ou en contradiction, selon le rapport E/C [FER 86]. Nos résultats soulèvent en tout cas la question de l'influence de la cure sur le méca-

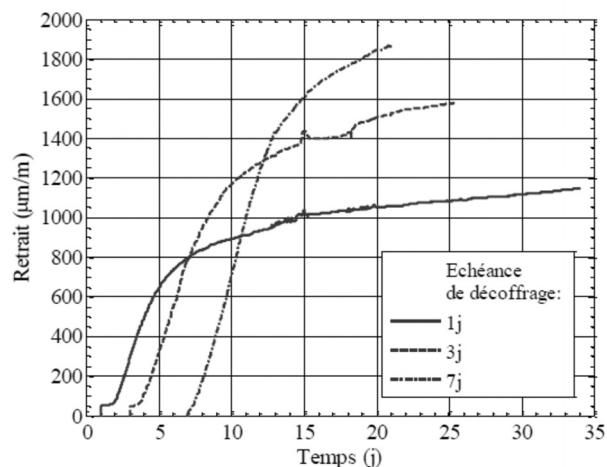


Figure 7. Retrait libre de séchage pour trois échéances de décoffrage.

nisme même du retrait des mortiers adjuvantés par des éthers de cellulose.

Sur la figure 8, le retrait a été tracé en fonction de la perte de masse due au séchage. Cette représentation permet classiquement de mettre en évidence plusieurs phases : une première avec une grande perte de masse et l'absence de retrait et une seconde pendant laquelle la perte de masse s'accompagne d'un retrait. On retrouve ces deux phases dans le cas de notre mortier. Dans le cas des bétons, la première phase « dormante » est attribuée au développement d'une fissuration à la surface des éprouvettes, qui conduirait à limiter les déformations de retrait mesurées [YUR 06]. Cette hypothèse s'appuie d'une part sur des mesures de retrait libre sur des éprouvettes de faibles dimensions pour lesquelles aucune phase « dormante » n'est observée, d'autre part sur des simulations numériques [DES 08]. Cette hypothèse sert souvent à expliquer la diminution de la durée de la première phase avec l'augmentation du temps de décoffrage : le matériau étant plus résistant, la fissuration de surface serait en conséquence limitée.

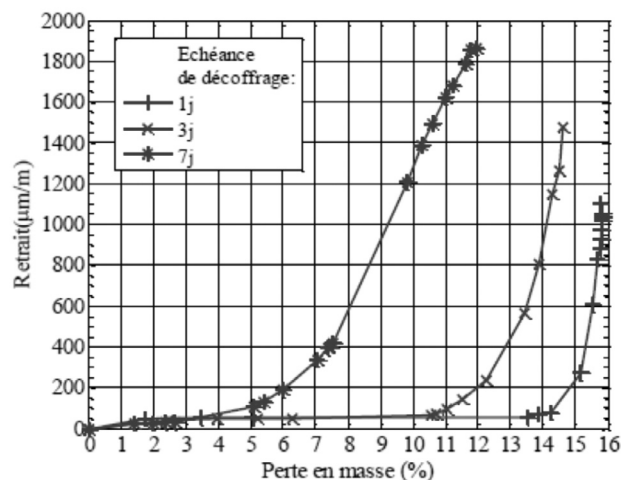


Figure 8. Retrait libre en fonction de la perte de masse due au séchage.

Dans notre cas, les éprouvettes sont de faibles dimensions et le mortier très poreux (porosité ~ 40%) ; donc la fissuration due aux gradients de retrait entre le cœur et la peau des éprouvettes est peu probable. D'ailleurs, des observations par fissuromètre optique de la surface n'ont révélé aucune fissure. Knapen montre par des observations au MEB sur des mortiers adjuvantés avec des éthers de cellulose que la présence du polymère limite la microfissuration de la matrice cimentaire [KNA 09]. La fissuration de surface du mortier étudié ici ne semble pas être à l'origine de la première phase.

Pour expliquer cette phase dormante, une autre hypothèse a déjà été proposée dans la littérature sur les bétons [NEV 90]. Le départ de l'eau libre des capillaires de grands diamètres n'entraînerait pas de retrait significatif, car la dépression capillaire responsable de la contraction du squelette solide serait trop faible. Rappelons que la dépression capillaire est inversement proportionnelle au diamètre des pores. Comme le montrent les isothermes de désorp-

tion, notre mortier est un matériau macro-poreux. On remarque en effet une forte désaturation du mortier quand l'humidité relative ambiante passe de 100 à 90% (fig. 9). Selon la loi de Kelvin, une humidité relative donnée correspond au diamètre de pores en deçà duquel la porosité est saturée en eau. Les isothermes de désorption nous conduisent donc à penser que, dans le cas de notre mortier, l'origine de la phase « dormante » est liée au départ de l'eau de la macroporosité.

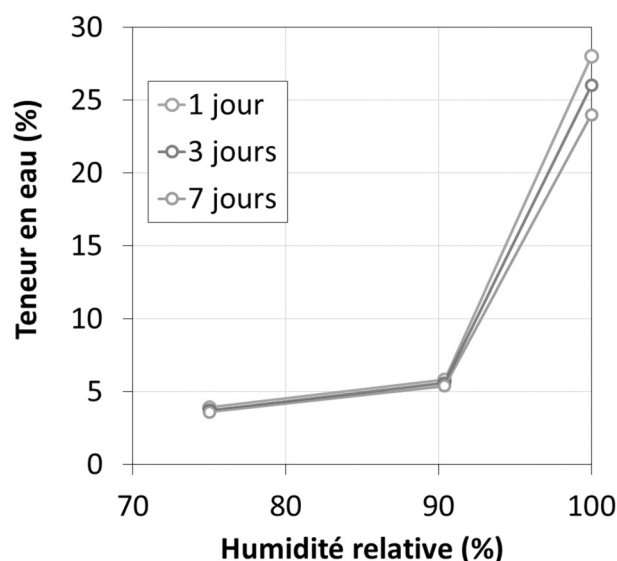


Figure 9. Isothermes de désorption mesurées par la méthode des solutions salines [MAU 11]

4. CONCLUSION

L'influence de la cure sur l'adhérence entre un mortier adjuvanté par un éther de cellulose et un support en béton a été étudiée expérimentalement. Les essais montrent un effet négatif d'une cure longue sur l'adhérence (sauf dans le cas d'un support totalement lisse). En outre, les retraits libres dus au séchage sont aussi plus élevés lorsque la cure est prolongée. Si ces deux résultats sont bien corrélés, ils contredisent nos *a priori* issus de nos expertises sur les

bétons. Du point de vue pratique, d'autres paramètres, comme le dosage en polymère, peuvent être envisagés pour diminuer le risque de fissuration et la perte d'adhérence [MAU 11].

5. REMERCIEMENT

Nous remercions le CEReM, coordonné par le CSTB, pour le financement de ces travaux de recherche.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [DES 08] DE SA C., Benboudjema F., Thierry M., Sicard J., « Analysis of microcracking induced by differential drying shrinkage », *Cem. Concr. Comp.*, v. 30, 2008, p. 947-956.
- [FER 86] Ferraris C.F., Mécanismes du retrait de la pâte de ciment, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1986.
- [HIL 02] Hild F., Raka B., Baudequin M., Roux S., Cantelaube F., « Multi-scale displacement field measurements of compressed mineral wool samples by digital image correlation », *Appl. Opt.*, vol. 32, 2002, p. 6815-6828.
- [KNA 09] Knapen E., Van Gemert D., « Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers », *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, 2009, p. 6-13.
- [MAU 11] Mauroux T., Impact du séchage sur les propriétés d'adhérence entre un mortier et un support, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2011.
- [MAU 12] Mauroux T., Benboudjema F., Turcry Ph., Ait-Mokhtar A., Deves O., « Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation », *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, n° 7, 2012, p. 1014-1023.
- [NEV 90] Neville A.M., *Propriétés des bétons*, Editions Eyrolles, 1990.
- [MON 07] Monge J., Fissuration des mortiers en couches minces- Effets de l'hydratation, du séchage et de la carbonatation, Thèse de doctorat, ENS Cachan, 2007.
- [POW 47] Powers T.C., « A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete », *Highway Res. Bd. Proc.*, 27, 1947, p. 178-188.
- [YUR 06] YURTDAS I., PENG H., BURLION N., SKOCZYLAS F., « Influence of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying », *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, 2006, p. 1286-1293.

annonces de colloques

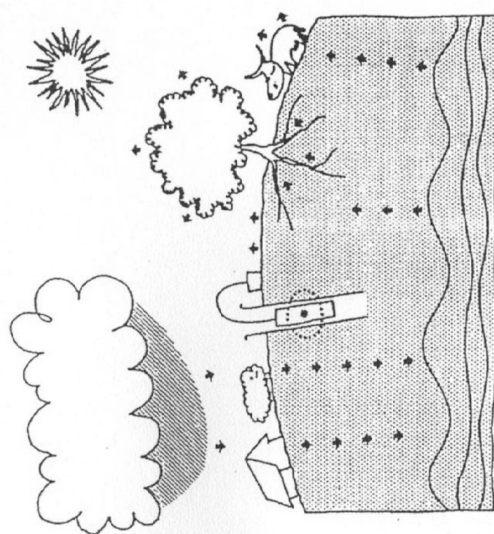
38^{èmes} Journées scientifiques

GFHN 2013

18 - 21 novembre 2013

Les Matériaux Argileux, des Sols aux Géomatériaux

ENSIP
Poitiers



Frais de participation

(repas exclus)

- **55 € pour les adhérents**
 - **80 € pour les non-adhérents**
- somme à verser lors de l'inscription définitive.

Adhésion au GFHN

comprenant l'abonnement au Bulletin

Organisme : 50 €

Individuel : 15 €

Étudiant et chômeur : 7 €

**Toute la correspondance
relative aux Journées doit être adressée à :**

Patrick Dudoignon

ENSIP, 1 rue M. Doré

86022 Poitiers cedex

FRANCE

Tél : 33 (0) 05.49.45.35.29

Fax : 33 (0) 05.49.45.36.34

E-mail : patrick.dudoignon@univ-poitiers.fr

Site web : <http://gfhn2013.conference.univ-poitiers.fr>



Site WEB IC2MP

Site WEB ENSIP

38 èmes JOURNÉES SCIENTIFIQUES du GFHN organisées par L'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers

Organisées annuellement par le Groupe Francophone d'Humidité et de Transferts en milieux poreux (GFHN), ces Journées sont le lieu de rencontre privilégié des agronomes, géotechniciens, pédologues, physiciens, mécaniciens du sol, hydrologues, géographes, et tous professionnels dont les préoccupations sont liées à la connaissance des transferts de l'eau dans les sols et autres matériaux poreux.

Cette année, les Journées sont organisées par l'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (IC2MP) à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers (ENSIP).

Il est envisagé, en fonction du nombre de propositions reçues, que les communications présentées par les doctorants fassent l'objet d'un concours doté d'un prix offert par le GFHN.

<http://gfhn2013.conference.univ-poitiers.fr/>

L'activité du GFHN ne se limite pas aux Journées scientifiques ; l'association édite une revue à comité de lecture,

**"Milieu poreux et transferts hydriques,
Bulletin du G.F.H.N."**

qui peut publier des articles et toute information que vous nous feriez parvenir.

COMITE D'ORGANISATION

P. COZENZA, ENSIP-IC2MP, Poitiers
P. DUDOIGNON, ENSIP-IC2MP, Poitiers
S. HEDAN, ENSIP-IC2MP, Poitiers
C. ISBERIE, LERMI Irstea, Aix en Provence
P. JALLADEAU, IC2MP, Poitiers
C. LAFOREST, ENSIP-IC2MP, Poitiers
J.P. RAMEL, CIRAME, Carpentras
M. UBERTOSI, AGROSUP, Dijon
S. VIGNEUX, ENSIP, Poitiers

Les Matériaux Argileux, des Sols aux Géomatériaux

Transferts et Microstructure

- Eau, polluants, vapeur et chaleur transport
 lessivage, colmatage, interaction argiles-intrants,
 réactivité de surface, ...

Géomatériaux

- Géosynthétiques, matériaux de construction,
 matériaux biosourcés, géopolymères, barrières
 ouvrages...

Sols et Agrosystèmes

- texture et structure, retrait gonflement,
 engorgement-hydromorphie, drainage, salinité,
 pratiques culturales...

Hydromécanique

- texture et structure, retrait gonflement,
 engorgement-hydromorphie.

Méthodes et mesures

- porométrie et porosité, perméabilité, état hydrique,
 macro et microstructure, observation et imagerie,
 instrumentation laboratoire in-situ...

Les communications retenues, orales et posters, devront faire l'objet d'un texte (figures, tableaux et bibliographie inclus) de présentation en **6 pages** et **4 pages** respectivement. L'article sera publié dans le Bulletin du G.F.H.N. à envoyer avant le **15 septembre 2013**.

Fiche de pré-inscription et de
 proposition de communication
 à retourner à patrick.dudoignon@univ-poitiers.fr

avant le **15 juillet 2013**

☐ M ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Fonction :

Organisme :

.....

Adresse :

.....

.....

Tél :

Fax :

E.mail :

* Je participe aux Journées : ☐ oui ☐ non

* Je présente :

- une communication ☐ oui ☐ non

- un poster ☐ oui ☐ non

Titre proposé :

.....

.....

.....

Le titre, suivi du nom du (ou des) auteur(s) et le résumé en français d'une page maximum, sont à joindre à la présente fiche et à envoyer par courrier postal (adresse au verso) ou par e-mail à

patrick.dudoignon@univ-poitiers.fr

* Je ne participe pas aux Journées mais souhaite adhérer au GFHN à titre individuel et recevoir le Bulletin des Journées pour la somme de 15 € :

☐ oui ☐ non

Groupe Francophone Humidimétrie et TraNsferTs en Milieux Poreux

Le Groupe Francophone Humidimétrie et TraNsferTs en Milieux Poreux est le lieu de rencontre privilégié des

- agronomes,
- géotechniciens,
- pédologues,
- physiciens et mécaniciens du sol,
- hydrologues, ...

dont les préoccupations sont liées à la connaissance des transferts d'eau dans les sols et les matériaux poreux. A cet effet, il organise chaque année des journées scientifiques et édite régulièrement un bulletin.

En 2013 les XXXVIII^{èmes} journées scientifiques du GFHN
sont organisées à

L'ENSIP
Université de Poitiers

à POITIERS

par
l'Institut Chimie Milieux et Matériaux de Poitiers (UMR 7285)
en partenariat avec
le Centre INRA Poitou-Charentes
le Parc Interrégional du Marais Poitevin

18 novembre : Visite Technique du site INRA de Lusignan
19-20 novembre : Journées Thématiques du GFHN
21 novembre : Journée d'étude dans le Marais Poitevin

Ces journées porteront sur le rôle des argiles dans un milieu poreux vis-à-vis de sa caractérisation, de ses propriétés et des transferts au travers des thèmes suivants :

- **Transferts et Microstructure** : eau, polluants, vapeur et chaleur, transport lessivage colmatage, interaction argiles-intrants, réactivité de surface
- **Géomatériaux** : géosynthétiques, matériaux de construction, matériaux biosourcés, géopolymères, barrières ouvragées
- **Sols et Agrosystèmes** : texture et structure, retrait et gonflement, engorgement-hydromorphie, drainage, salinité, pratiques culturales
- **Hydromécanique** : géotechnique, forages, fluides bentonitiques, retrait-gonflement irréversibilité, traitements de sols
- **Méthodes et Mesures** : porométrie et porosité, perméabilité, état hydrique, macro et microstructure, observation et imagerie, instrumentation laboratoire in-situ

Informations, Programme, Inscription et Soumissions des communications sur le site dédié : <http://gfhn2013.conference.univ-poitiers.fr/>

Soumission

Date limite de soumission d'un résumé pour une communication orale ou un poster : 15 juillet 2013

Date limite de réception des résumés étendus des communications et posters retenus (respectivement 6 ou 4 pages) : 15 septembre 2013

Inscription

Date limite d'inscription : 21 Octobre 2013

Renseignements et inscriptions :

Patrick Dudoignon
ENSIP, 1 rue M. Doré, 86022 Poitiers cedex

Tel : 05 49 45 35 29

e.mail : patrick.dudoignon@univ-poitiers.fr

Soumettre une communication

L'ensemble des propositions de communication sous forme orale ou poster (résumé d'une page) sera examiné par le comité scientifique. L'ensemble des communications retenues (orales et posters) devront faire l'objet d'un article résumé de 6 et 4 pages des travaux présentés. Des demandes de révision pourront être demandées par le Comité scientifique aux auteurs. Les communications et posters sélectionnés au programme des journées du GFHN seront publiées dans la Revue "Milieux Poreux et Transferts Hydrauliques" édité par le GFHN.

L'appel à communications est ouvert du 1 juin au 15 juillet 2013.

Un résumé d'une page est à renvoyer au Comité d'organisation ([Patrick Dudoignon](#) et [Philippe Jalladeau](#)) sous la forme du modèle ci-joint (cf. tableau ci-dessous).

Étape 1	Du 1 Juin au 15 Juillet	Envoyer un résumé d'1 page au format résumé joint
Étape 2	15 Septembre	Réponse aux auteurs
Étape 3	Du 15 Septembre au 19 Octobre	Envoi de l'article résumé destiné aux proceedings du Colloque au format article joint : <ul style="list-style-type: none">• 6 pages pour les communications• 4 pages pour les posters

Membres du Comité scientifique

Nom	Etablissement
COSENZA Philippe	Professeur, HydrASA –IC2MP
DUDOIGNON Patrick	Professeur, HydrASA –IC2MP
BILLIOTTE Joël	Professeur, Centre de Géosciences /GIG, MINES-Paris Tech
CANER Laurent	Maître de Conférences, HydrASA –IC2MP
FABIEN Hubert	Maître de Conférences, HydrASA –IC2MP
DURAND Jean-Louis	Directeur de Recherche, INRA Lusignan
CHABOSSEAU Jean-Marc	Directeur de Recherche, INRA Lusignan
UBERTOSI Marjorie	Maître de Conférences, AGROSUP Dijon
ISBÉRIE Carole	Directeur de Recherche, LERMI IrsteaAix-en-provence
LEGRET Michel	Professeur, DEE IFSTTAR



Programme et communications

Programme des 38^{èmes} journées du GFHN du 18 au 21 Novembre 2013

Sommaire

- lundi 18 Novembre, visite technique du site INRA de Lusignan
- Mardi 19 Novembre, 38^{èmes} Journées du GFHN, Conférence internationale francophone
- Mercredi 20 Novembre, 38^{èmes} Journées du GFHN, Conférence internationale francophone
- Jeudi 21 Novembre, visite technique du Marais Poitevin

Lundi 18 Novembre 2013, Visite technique site INRA de Lusignan

Centre INRA Poitou-Charentes (site de Lusignan – Les Verrines)

12h30	Accueil des participants centre ville Poitiers et/ou gare SNCF
14h00	Départ en bus pour le site INRA de Lusignan (2,5 km)
14h30	Conférence introductive Jean-Marc Chabosseau puis visite
	Le Système d'observation et d'expérimentation pour la recherche en environnement (SOERE) Agro-écosystèmes, cycles biogéochimiques et biodiversité (ACBB)
	Pause café
18h00	Retour sur Poitiers
18h30	Accueil à l'ENSIP, inscriptions et apéro-découverte spécialités de la Région Poitou-Charentes

Mardi 19 Novembre 2013, 38^{èmes} Journées du GFHN, Conférence internationale francophone

ENSIP

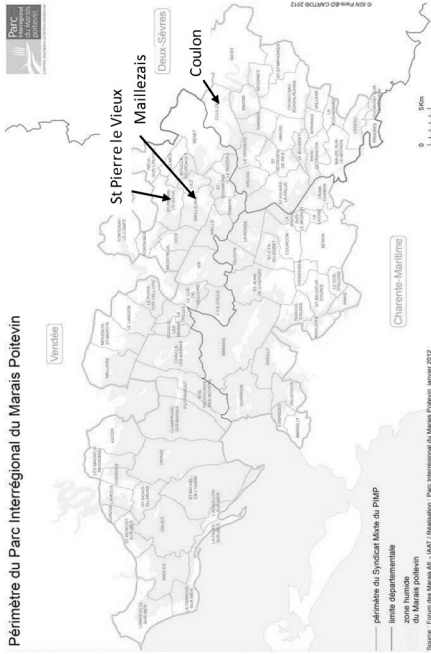
8h30	Inscriptions et accueil
9h00	Séance d'ouverture
9h20 – 12h40	Session I : Transferts et Microstructure
9h20	Conférence Dr E. Ferrage (IC2MP-HydrASA, Poitiers): « L'eau interfoliaire dans les smectites »
9h50	Conférence Dr A. Mazurier (Etudes-Recherches-Matériaux, Poitiers): "Evaluation de la porosité des géomatériaux par combinaison de la tomographie de rayons X et de l'autoradiographie"
10h00 – 12h40	Communications orales
12h40 – 14h00	Pause déjeuner et session posters
14h00 – 16h30	Session II : Géo-matériaux
14h00	Conférence Dr J.D. Mertz (Laboratoire Recherche Monuments Historiques, Champs sur Marne): « Argile et durabilité des pierres »
14h30 – 16h30	Communications orales
16h30 – 19h00	Visite centre historique Poitiers
19h00 – 23h00	Accueil et dîner de gala aux « Archives »

Mercredi 20 Novembre 2013, 38^{èmes} Journées du GFHN,
 Conférence internationale francophone

ENSIP

8h40 – 10h20	Session III : Sols-Agrosystèmes
8h40	Conférence Dr J-L. Durand (INRA Lusignan) « L'eau dans les systèmes sol-plantes »
9h20 – 10h20	Communications orales
10h20 – 10h40	Pause café et session posters
10h40 – 12h00	Session IV : Hydromécanique
10h40 – 12h00	Communications orales
12h00 – 12h30	Assemblée générale GFHNR
12h30 – 14h00	Pause déjeuner et session posters
14h00 – 15h20	Session V : Méthodes et Mesures
14 h00 – 15h20	Communications orales
15 h20 – 16h00	Remise du prix des doctorants et conclusion des journées

Jeudi 21 Novembre 2013, Circuit Le Marais Poitevin
 Parc Interrégional du Marais Poitevin (Maillezais - Coulon)



9h00	Départ centre ville Poitiers en bus
	Visite du Marais
10h00 – 12h00	10h00: lecture de Paysage - Saint-Pierre-le-Vieux 85420. Transition coteaux calcaires – marais mouillé – marais desséché 11h00 : Circuit de découverte du bois de la Loyauté en marais mouillé – Commune de Doix 85200
12h30 – 14h00	Déjeuner à l'Auberge de la Repentie 79460Magné
14h00 – 16h00	14h00 : Diaporamas / conférences et discussion sur le Marais poitevin au Siège du Parc interrégional du Marais poitevin 2 rue de l'église 79510 Coulon : « Liens entre substrat, gestion hydraulique et biodiversité »Odile Cardot, chargée de mission environnement, Parc Marais poitevin « Hydrogéologie de la zone humide : enjeux et fonctionnement »François-Marie Pellerin, Président de la Coordination pour la Défense du Marais poitevin
17h30	Retour à Poitiers

Informations pratiques


Sommaire

- Lieu du Colloque : ENSIP 1 rue M. Doré, 86022 Poitiers cedex
- Lieu de la journée INRA : Centre INRA Poitou Charentes, 86600 Lusignan
- Lieu de la journée Marais Poitevin : 79510 Coulon
- Hébergement


Lieu du Colloque :

Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers

Mardi 20 Novembre, Mercredi 21 Novembre



S'appuyant sur de nombreuses collaborations avec le secteur professionnel, l'ENSIP forme en 3 ans des ingénieurs spécialisés dans des domaines en plein essor, notamment en ingénierie pour la protection de l'environnement



Comment venir

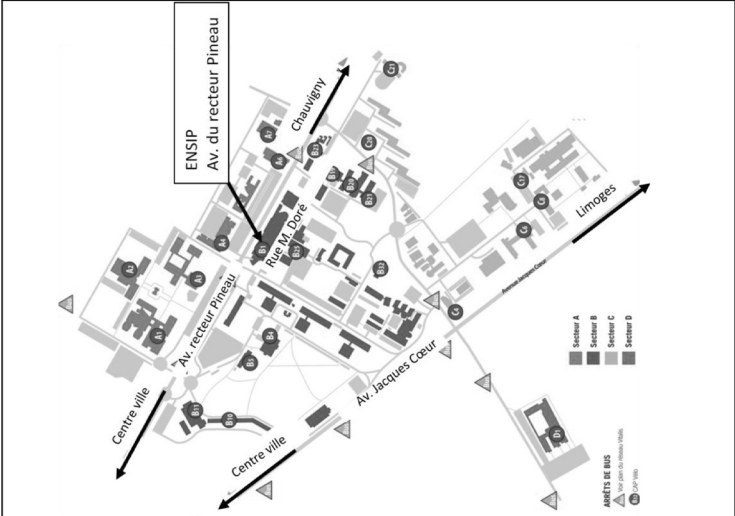
ENSIP
Université de Poitiers
Bâtiment B1
1, rue Marcel Doré
86022 Poitiers Cedex
France
esip@univ-poitiers.fr

Pour tous renseignements : patrick.dudoignon@univ-poitiers.fr

philippe.ialladeau@univ-poitiers.fr

Si vous arrivez par l'autoroute **A10**, sortir à la sortie Poitiers nord (sortie 29) puis continuer sur 1,2km. Prendre à droite la **N147** sur 9,6 km direction "Poitiers, Limoges Toulouse". Prendre à droite **Route de Chauvigny** direction "Chateauroux, Bourges St Julien l'ars, Chauvigny" et continuer sur 600 mètres. Arrivé au rond point prendre à droite **Route de Chauvigny** 600 mètres. Au rond point prendre direction Poitiers **Avenue du recteur Pineau**. Passer le premier rond point, aller tout droit et laisser le centre équestre sur votre droite. Au deuxième rond point poursuivre tout droit, vous entrez sur le campus. L'ENSIP Poitiers se situe sur votre droite avant le rond point suivant.

Vous pouvez consulter le plan du campus.
Les coordonnées GPS de l'école sont :
Latitude : 46.56759 nord ou 46° 34' 3,319"
Longitude : 0.38840 est ou 0° 23' 18,249"



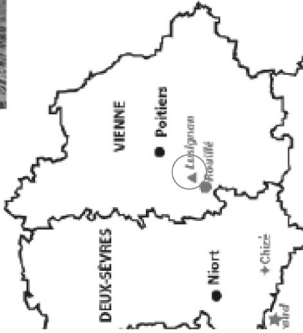
Lieu de la journée INRA, Lusignan

Lundi18 Novembre Centre INRA Poitou-Charentes (Lusignan – Les Verrines)

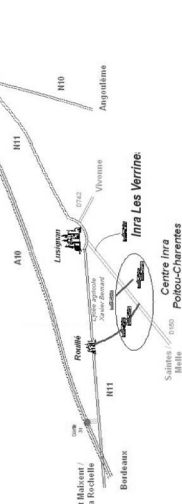
Un bus est prévu pour l'ensemble des personnes inscrites.
Le départ se fera du centre ville et/ou de la gare SNCF à 14h00.
Le retour se fera centre ville et à l'ENSIP, lieu du Colloque, 1 rue M. Doré à Poitiers à 18h00.



INRA Les Verrines
86600 Lusignan
Tel : 05 49 55 60 24



• Accès route :
N 11 Poitiers – Saintes
Centre INRA Poitou-Charentes



Le centre de recherche de Poitou-Charentes est l'un des 19 centres régionaux de l'inra. Il compte environ 240 agents permanents et dispose d'un budget d'environ 20 millions d'euros (salaires compris). Il est implanté sur 4 sites répartis dans 3 départements : Lusignan-Rouillé dans la Vienne (86), Le Magneraud et Saint Laurent-de-la-Prée en Charente-Maritime (17) et Chizé dans les Deux-Sèvres (79).

Thématiques de recherche et plates-formes expérimentales :

- Gestion durable des prairies, systèmes fourragers et territoires
- Gestion durable des productions animales
- Plateformes expérimentales ouvertes aux partenaires scientifiques et agricoles

> Une prédominance de l'expérimentation
Sur les 10 unités du centre, 6 sont des unités expérimentales.

>> Unité de recherche pluridisciplinaire prairies et plantes fourragères (▲)
>> Unités expérimentales

- Fourrages, environnement, ruminants (▲)
- Domaine de St Laurent-de-la-Prée (■)
- Entomologie (★)
- Elevage alternatif et santé des monogastriques (★)
- Génétique, expérimentations et systèmes innovants (●) (★)

>> Unité sous contrat Inra-CNRS Agripop (◆)
>> Services déconcentrés d'appui à la recherche (▲) (★)
>> Groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences (Geves) (★)

- Unité expérimentale Geves
- Laboratoire BioGeves

> Des disciplines multiples

Les unités du centre couvrent un large spectre de disciplines :
- Secteur végétal : génétique, écophysiologie, entomologie, agronomie, écologie.
- Secteur animal : génétique, reproduction, nutrition, santé.

Visite centre historique de Poitiers

Mardi 19 Novembre

La visite du centre historique de Poitiers est organisée le mardi en fin d'après midi.

D'importantes opérations de restauration ont été engagées depuis 2002 à Poitiers et dans le département avec la restauration des verrières de la cathédrale Saint-Pierre de Poitiers (86), l'Hypogée des dunes, les peintures murales de l'abbatiale Saint-Savin (86) Visite guidée à la fois par l'historique et la thématique de restauration, des diagnostics aux travaux et « arrivée » au restaurant « Les Archives » pour le diner de gala



Portail de l'Eglise notre dame la grande après restauration

En 1870, la chapelle des jésuites est fermée au culte... En 1950, le Département de la Vienne en fait l'acquisition afin de pouvoir recueillir les archives autrefois stockées à la Préfecture.....

En 2010, les travaux commencent. En 2012 le restaurant prend place dans la nef et le chœur de l'ancienne chapelle et est fin prêt à recevoir ses hôtes...



Lieu de la journée Circuit Marais Poitevin

Jedi 21 Novembre : Parc Interrégional du Marais Poitevin, 2 rue de l'Eglise 79510 Coulon

Un bus est prévu pour l'ensemble des personnes inscrites.
Le départ se fera du centre ville de Poitiers (proximité immédiate des hôtels) à 8h30
Le retour se fera à la gare SNCF de Poitiers et au centre ville.



Abbaye de Maillezais en bordure du marais mouillé

10h00 : accueil à Saint-Pierre-le-Vieux 85420 (à côté de Maillezais) puis **Lecture de Paysage** avec

Richard Joseph- Parc interrégional du Marais poitevin :

« **Différences de Paysages entre les marais dits « mouillés » et « desséchés ».**

11h00 : **Circuit de découverte** du bois de la Loyauté en marais mouillé – Commune de Doix 85200

12h30 : **Déjeuner** à l'Auberge de la Repentie 79460Magné

14h00 : **Diaporamas / conférences** sur le Marais poitevin au Siège du Parc interrégional du Marais poitevin 2 rue de l'église 79510 Coulon avec

Odile Cardot, chargée de mission environnement, Parc Marais poitevin :

« **Liens entre substrat, gestion hydraulique et biodiversité** »

et **François-Marie Pellerin**, Président de la Coordination pour la Défense du Marais poitevin :
« **Hydrogéologie de la zone humide : enjeux et fonctionnement** »

Hébergement

Les organisateurs ne prennent pas en charge les réservations d'hôtels. Toutefois, ils vous conseillent de réserver votre hôtel. Une vingtaine d'hôtels sont disponibles sur le plateau en centre ville à 5-10 mn à pied de la gare SNCF et à 13 mn de l'ENSIP par la ligne de bus n°1.

L'Hôtel de l'Europe se trouve au cœur de Poitiers, 88 chambres, à 15 minutes en voiture du Futuroscope. Il dispose d'une cour, d'un jardin et d'une connexion Wi-Fi gratuite.

L'Adagio Access Poitiers est situé à Poitiers, 126 chambres, à seulement 600 mètres de la gare. Il propose des appartements et des studios climatisés dotés d'une connexion Internet par câble

Best Western Poitiers Centre Le Grand Hôtel, 47 chambres, est un établissement design situé dans le centre de Poitiers, à seulement quelques minutes à pied de Notre-Dame la Grande et du palais de Poitiers

L'Hôtel Central, 20 chambres, se trouve dans le centre de Poitiers, à 10 minutes de marche de la gare TGV de Poitiers. Il propose des chambres avec salle de bains et connexion Wi-Fi gratuite

Le Mercure Poitiers Centre, 50 chambres, est à situé à 800 mètres de la gare de Poitiers, cet hôtel propose des chambres climatisées avec salle de bains privative, un bar et une réception ouverte 24h/24

Les hôtels sont disponibles auprès :

- office de tourisme ou syndicat d'initiative
- Hôtels à Poitiers

Contact

Pour toutes vos questions, vous pouvez contacter l'équipe organisatrice :

patrick.dudoignon@univ-poitiers.fr

philippe.ialladeau@univ-poitiers.fr

Tel Secrétariat : 05.49.45.37.39

38 èmes journées 38 èmes journées..... 38 èmes journées..... 38 èmes journées
GFHN 2013 : POITIERS, 18-21 novembre 2013
<http://gfhn2013.conference.univ-poitiers.fr/>

LES MATERIAUX ARGILEUX, DES SOLS AUX GEOMATERIAUX

Fiche d'Inscription

☐ M ☐ M^{me} ☐ M^{lle}

Nom :

Prénom :

Fonction :

Organisme :

Adresse :

Tél :

Fax :

e-mail :

Participe à la visite (gratuite) du site INRA de Lusignan le 18 novembre 2013 ☐ oui ☐ non

Participe aux conférences des Journées le 19 novembre 2013 ☐ oui ☐ non
et 20 novembre 2013 ☐ oui ☐ non

Participe à la journée d'étude dans le Marais Poitevin le 21 novembre ☐ oui ☐ non

Participe au repas de gala du 19 novembre en soirée (38 €) ☐ oui ☐ non

Ne participe pas aux Journées mais souhaite adhérer au GFHN à titre individuel et recevoir le bulletin des Journées pour la somme de 15 € ☐ oui ☐ non

Décompte des frais de participation aux Journées et modalités de règlement.

Adhésion GFHN 15 € (7 € pour les étudiants) à payer directement au GFHN

Conférences : 19 et 20 novembre

- 55 € pour les adhérents GFHN ☐ =
- 80 € pour les non-adhérents ☐ =
- 30 € pour les étudiants ☐ =

Repas :

- Midi 15€ x ☐ 1 (jour) ou ☐ 2 (jours) =
- Dîner gala du 19 aux « archives » 38 € x (nb de personnes) =
- Déjeuner Marais Poitevin du 21a Coulon 20 € x (nb personnes) =
- Total =

Je souhaite pour les repas une facture séparée de celle du règlement des conférences ☐ oui ☐ non

Paiement en ligne : <http://paiementenligne.univ-poitiers.fr/GFHN2013/> ☐ oui ☐ non


Ci-joint un chèque à l'ordre de l'Agent comptable de l'Université de Poitiers ☐ oui ☐ non

Je réglerai par virement sur le compte de l'Agent comptable de l'Université de Poitiers ☐ oui ☐ non

Ci-joint un bon de commande à l'ordre de l'Agent de Poitiers - ENSIP- GFHN2013 ☐ oui ☐ non

Le règlement s'effectuera lors de l'accueil des Journées ☐ oui ☐ non

Observations :

 Fiche à retourner avant le 15 octobre 2013 à :

Patrick Dudoignon	Tél : secrétariat	« 05.49.45.37.39 »
ENSIP	Tél : ligne directe	05 49 45 35 29
1 rue M. Doré	Fax :	05 49 45 36 34
86022 Poitiers Cedex	e-mail :	patrick.dudoignon@univ-poitiers.fr

et de structures et ouvrages complexes. Ce thème traite la question de l'évaluation de la fiabilité des structures et des ouvrages existants pouvant comporter plusieurs composants et/ou modes de défaillance. Il a vocation à rassembler les contributions relatives à l'évaluation d'une probabilité de défaillance d'un système et à l'analyse de sensibilité locale et globale. Il aborde également la question de la conception robuste sous contrainte de fiabilité des structures et ouvrages et a vocation à rassembler les contributions relatives aux méthodes d'optimisation. Les communications attendues doivent présenter des applications industrielles d'envergure.

Thème 7. Inspection, Maintenance et Réparation sous incertitude / **Animateurs : Denys Breysse, Alaa Chateaufort, Franck Schoefs.**

Les décisions de maintenance s'appuient sur les informations issues de l'inspection et sur l'évaluation des risques. L'élaboration de la stratégie optimale d'inspection, de maintenance et de réparation (IMR) nécessite la prise en compte des incertitudes liées au système lui-même et à son environnement, aux conséquences des défaillances, et à leur évolution dans le temps. Il s'agit également de prendre en compte les contraintes industrielles, techniques et financières, pour l'optimisation de l'inspection et de la réparation sous exigence d'exploitation des structures et ouvrages en service et de résistance à des événements extrêmes. Ce thème s'intéresse donc à l'optimisation de la politique d'IMR à travers la présentation des avancées en termes de développements méthodologiques et d'applications aux cas industriels, en particulier de grande dimension où une stratégie d'inspection adaptée doit être proposée. Les stratégies pourront être placées dans le cadre des adaptations au changement climatique.



Photo : Catherine Tailleur/Irstea

Comité de programme

Corinne Curt (Irstea) (présidente) - 04.42.66.99.38

corinne.curt@irstea.fr

Laurent Peyras (Irstea)

Julien Baroth (Université Grenoble)

Alaa Chateaufort (Université Clermont II)

Comité scientifique

Aix-Marseille Université : V. Garnier

CEA : M. Eid, A. Millard

CEREGE & ECCOREV, OSU Institut Pythéas (AMU, CNRS,

IRD) : O. Bellier

École Centrale de Nantes : A. Nouy

École des Ingénieurs de la Ville de Paris - Université Paris

Est : Y. Diab, M. Vuillet

École des Mines d'Alès : G. Dusserre

École des Mines de Nantes : B. Castanier

École Polytechnique Fédérale de Zurich : B. Sudret

IFMA : JM. Bourinet, N. Gayton

IMdR : A. Lannoy

INERIS : G. Prod'homme

INSA Lyon : P. Le Gaultre

IRSN : E. Chojnacki

Irstea : C. Carvajal, C. Curt, N. Eckert, L. Peyras, JM. Tacnet

LGM : C. Bauduin

LJK/ASTE : L. Pierrat

OXAND : B. Capra

Phimeca : M. Lemaire, T. Yalamas

Polytech Marseille : Y. Burtshell

Thalès : F. Boyle

Université d'Angers : F. Guérin

Université Blaise Pascal, ClermontII : C. Baccannet, D. Boissier,

P. Brassolette, A. Chateaufort, A. Talon

Université de Bordeaux : D. Breysse, S.M. Elachachi

Université de Grenoble : J. Baroth, L. Doyen, O. Gaudoin

Université de Lorraine : O. Deck, F. Masrouji, T. Verdel

Université de Marne-la-Vallée : A. Mebarki

Université de Nantes : F. Schoefs, A. Soubra

Université de Toulouse, LMDC UPS/INSA : F. Duprat, A. Sellier

Université de Technologie Compiègne : P. Feissel, P. Villon

Université de Technologie de Troyes : A. Barros, P. Lafon

8^{èmes} Journées Fiabilité des MATÉRIAUX & DES STRUCTURES

Aix-en-Provence,
9 et 10 avril 2014

ANALYSE DE RISQUES ET FIABILITÉ DES
SYSTÈMES DANS LEUR ENVIRONNEMENT

<http://jfms2014.irstea.fr>

Depuis 1994, le colloque JFMS rassemble tous les 2 ans, chercheurs confirmés et doctorants, consultants ou ingénieurs, familiers de l'analyse de fiabilité ou de risques appliquée aux matériaux et aux structures et privilégie les développements méthodologiques de traitement de l'incertain (probabilistes, possibilistes ou autres).

L'édition 2014 des JFMS organisée par Irstea portera notamment sur le thème de l'interaction systèmes-aléas, les systèmes considérés pouvant être des matériaux, des structures ou des ouvrages.



Les résumés de 700 mots maximum sont à envoyer à jfms2014@irstea.fr. Chaque résumé doit préciser les noms des auteurs ainsi que le thème scientifique auquel se rattache l'étude présentée. Le contexte de l'étude, la méthodologie, ainsi que les principaux résultats attendus ou obtenus y seront décrits. L'essentiel des communications, sous réserve de validation par le comité scientifique, sera publié dans un livre édité dans une maison d'édition scientifique. Cet ouvrage paraîtra en juin 2014 (date prévisionnelle).

Dates Importantes :

Date limite de soumission des résumés : 1^{er} septembre 2013
Retour de l'acceptation des résumés : 1^{er} octobre 2013
Date limite de soumission des articles : 15 décembre 2013
Retour de l'acceptation des articles : 15 février 2014
Date de retour des articles révisés : 15 mars 2014

Thème 1. Méthodes qualitatives pour la sûreté de fonctionnement des structures et des ouvrages / **Animateurs : Daniel Boissier, Laurent Peyras, Aurélie Talon.**

L'analyse de la sûreté de fonctionnement des structures et des ouvrages, et la prise de décision qui en résulte, se font souvent dans des cadres qualitatifs. Ainsi, pour les systèmes complexes, la démarche qualitative constitue une étape préliminaire souvent incontournable aux démarches probabilistes. La démarche qualitative peut être aussi une nécessité dans des contextes où les données disponibles ne se prêtent pas aux approches quantitatives, soit à cause de leur insuffisance et de leur incomplétude, soit à cause de leur nature même. Ce thème porte ainsi sur les approches d'analyse, de qualification et de décision s'appuyant sur des méthodes qualitatives d'analyse de risques des systèmes dans leur environnement réel ; une attention particulière sera portée sur le contexte industriel, en prenant en compte la complexité des systèmes et de leurs interactions avec leurs environnements physique et organisationnel. Les exposés et discussions sur les apports et les techniques des approches qualitatives permettront en particulier de préciser leur complémentarité par rapport aux approches quantitatives.

Thème 2. Modèle des données et des connaissances / **Animateurs : Corinne Curt, Vincent Garnier, Jean-Marc Tacnet.**

La modélisation des données et des connaissances est à la base de toute exploitation des méthodes d'analyse probabiliste ou fiable ; dans la pratique, elle est souvent trop rapide, reprenant sans discussion des modèles de la littérature. De nombreuses techniques de modélisation de la variabilité et de l'incertitude sur les données existent, faisant appel aux méthodes probabilistes, possibilistes ou déterministes (par exemple l'algèbre des intervalles). Ce thème portera sur ces techniques et sur leur utilisation dans des contextes industriels et de recherche. Une attention particulière sera accordée au cas des données rares ou incomplètes, aux interactions entre les composants et les systèmes complexes, à la prise en compte de la non-qualité des données et à la combinaison de données hétérogènes. Ce thème pourra concerner des développements académiques ou des études de cas réels. L'analyse des résultats d'essais destructifs ou CND et des essais accélérés fait partie de cette problématique. Il s'agit ainsi de faire le point de l'avancée sur les méthodes qui permettent de recenser les causes d'incertitude, ainsi que sur les méthodes qui permettent de proposer des modèles probabilistes ou possibilistes et leurs paramètres.

Thème 3. Evaluation des sollicitations liées aux aléas naturels et aux conditions opérationnelles / **Animateurs : Olivier Bellier, Nicolas Eckert, Thierry Verdel.**

Dans la plupart des cas réels, les incertitudes sur les sollicitations et sur l'environnement mécanique, naturel et anthropique conditionnent l'évaluation de la fiabilité des structures et des ouvrages. Il est donc indispensable de disposer de modèles stochastiques représentatifs de l'environnement et des actions envisagées pendant toute la durée d'exploitation. Il s'agit non seulement de modèles de caractérisation de l'historique disponible, mais surtout de modèles prévisionnels à court et à long terme. Cette analyse portera ainsi sur les incertitudes sur les sollicitations envisagées tout au long de la durée de vie, en passant par les phases de conception, de réalisation, d'exploitation, de démolition et de recyclage.

Thème 4. Modèles probabilistes de la dégradation des matériaux, structures et ouvrages / **Animateurs : Claudio Carvajal, Frédéric Duprat, Fabrice Guérin.**

La dégradation des matériaux, des structures et des ouvrages constitue aujourd'hui une préoccupation industrielle majeure, compte tenu des parcs construits dans les différents secteurs de l'économie. Disposer de modèles prévisionnels de dégradation est par conséquent essentiel pour la prise de décision vis-à-vis de la maintenance et de la prolongation de la durée de vie des installations. Ce thème porte sur la modélisation probabiliste des dégradations dues au fonctionnement mécanique (fatigue, usure, endommagement, fluage...) et à l'environnement naturel (corrosion, érosion, variation des propriétés des matériaux...). Il s'agit de considérer les deux approches : physique, à travers une modélisation du comportement physique en contexte incertain et statistique, à travers l'analyse des observations sur les systèmes en exploitation.

Thème 5. Méthodes d'évaluation de la fiabilité / **Animateurs : Nicolas Gayton, Ahmed Mebarki, Bruno Sudret.**

Ce thème porte sur les méthodes d'évaluation de la fiabilité. La complexité des modèles de comportement, les temps de calcul, le grand nombre de variables aléatoires et les ressources numériques et humaines nécessaires sont des obstacles réels pour l'application des méthodes probabilistes. Ce thème a vocation à rassembler les contributions relatives aux méthodes de propagation des incertitudes dans les modèles de traitement (numériques et/ou analytiques) notamment pour la résolution des problèmes de fiabilité. Il aborde les aspects méthodologiques, algorithmiques et applicatifs de l'analyse de fiabilité.

Thème 6. Fiabilité système et optimisation sous incertitude appliquées aux structures et ouvrages / **Animateurs : Julien Baroth, Sidi Mohammed Elachachi, Thierry Yalamas.**

La maîtrise des risques passe nécessairement par la prise de décision (choix d'une solution optimale, comparaison multicritère, prise en compte d'indicateurs de performance...) dans un contexte d'environnement incertain



Colloque « Le Pont » 8 et 9 octobre 2013 à Toulouse

Les ouvrages d'art au service de la mobilité durable

Mardi 8 octobre 2013

8h30 : Accueil des participants et contacts exposants

9h15 : Ouverture et présentation du colloque

Rémi LOLOUM (Journaliste), Daniel POINEAU (Consultant)

9h20 : Les infrastructures de transport au service de la mobilité
Le réseau routier, ferroviaire et fluvial

Marie Dominique SALAUN (TDIE)

9h40 : Le rôle de l'importance politico-économique des ouvrages d'art
La notion d'utilité et de fonctionnalité

X (IFSTTAR)

10h20 : Généralités sur la surveillance des ouvrages d'art
La nouvelle ITSEOA (circulaire du 16 février 2011)

Evelyne HUMBERT (CGEDD)

10h40 : Pause café et visite de l'exposition technique

La maintenance des équipements de ponts

11h00 : Les appareils d'appuis (éléments de structure)

Yves PICARD (Consultant)

11h20 : Les joints de chaussée

Laurent CHAT (SETRA)

11h40 : Les dispositifs de retenue

Judith BARES-MENCIA (SETRA)

La lutte contre les effets de la corrosion

12h00 : La protection cathodique et les anodes sacrificielles

Guy TACHE (CEFRACOR)





Interventions Entreprises




12h20 : Présentation des entreprises intervenantes

Entreprise 1

Entreprise 2

12h50 : Déjeuner sur place et visite de l'exposition technique

<div></div>	<div>Table ronde (Débat)</div> <div>14h00 : Le projet d'assistance technique aux communes Dominique SUTRA DEL GALY (CINOV), Jean-Louis PUISSEGUR (AMF), Laurent LABOURIE (MEDD), Pascale DUMEZ (IMGC), Pascal RAOUL ADSTP), Marc TASSONE (IDRRIM)</div> <div><i>Débat animé par Rémi LOLOUM</i></div> <div>15h30 : Pause café et visite de l'exposition technique</div> <div>La réorganisation du réseau technique des services de l'Etat 15h50 : Présentation du CEREMA Eric LE GUERN (SETRA)</div> <div>Intervention des étudiants 16h10 : Etude diagnostic et calculs aux éléments finis Masters 1^{ère} et 2^{ème} année (FST Egletons)</div> <div>Interventions Entreprises 16h40 : Présentation des entreprises intervenantes Entreprise 3</div> <div>Et si on reconstruisait des ponts en maçonnerie ? 16h55 : Un exemple : Le pont routier de Chaldecoste en Lozère Yannick TARDIVEL (SETRA)</div> <div>L'histoire des constructions en maçonnerie 17h35 : La grande époque des bâtisseurs de cathédrales Jean-Louis TAUPIN (Architecte des Monuments Historiques)</div> <div>19h00 : Visite de l'église et du cloître des Jacobins</div> <div></div> <div>20h00 : Dîner dans une cave du vieux Toulouse</div>
--	---

<div></div>	<div>Mercredi 9 octobre 2013</div> <div>8h30 : Accueil des participants et contacts exposants</div> <div>Les ouvrages de soutènement 9h00 : La typologie Frédéric ROCHER-LACOSTE (SETRA) 9h10 : Les risques Frédéric ROCHER-LACOSTE (SETRA) 9h20 : La maintenance et les principes de renforcement Frédéric ROCHER-LACOSTE (SETRA)</div> <div>Interventions Entreprises 9h40 : Présentation des entreprises intervenantes Entreprise 4 Entreprise 5 Entreprise 6 Entreprise 7</div> <div>10h40 : Pause café et visite de l'exposition technique</div> <div>L'Algérie et ses infrastructures de transports 11h00 : Présentation du patrimoine d'ouvrages d'art (ponts, viaducs, tunnels) routiers et ferroviaires Youcef MOKHTARI et Zahir DJIDJELI (Ministère des Travaux Publics)</div> <div>Les conséquences des incendies sur les ouvrages d'art 11h45 : Conséquences sur les structures en béton armé Loïc DIVET (IFSTTAR) 11h55 : Conséquences sur les structures métalliques Jacques BERTHELLEMY (SETRA)</div> <div>Les ponts en maçonnerie en milieu fluvial 12h05 : La protection des fondations par enrochements Jean-Pierre LEVILAIN (Consultant)</div> <div>Présentation de l'AFGC, du STRRES et de l'IMGC 12h25 : Présentation de l'AFGC, du STRRES et le l'IMGC et actualités Jean-Marc TANIS, Président de l'AFGC, Christian TRIDON, Président du STRRES, Pascale DUMEZ, IMGC</div> <div>Clôture du colloque 13h00 : Déjeuner sur place et visite de l'exposition technique</div>
--	--

Concevoir et Construire en BFUP :
de l'innovation aux réalisations
à grande échelle

Marseille, 1 - 3 octobre 2013

Nom : Prénom :

Titre:

Société:

Adresse:

.....

.....

Tél: Fax:

E-mail:

☐ Je suis intéressé(e) par le Colloque BFUP 2013
et je souhaite des informations concernant :

☐ l'inscription ☐ l'exposition

☐ J'ai l'intention de présenter une conférence

Titre:.....

.....

☐ J'ai l'intention de présenter un poster

Calendrier

Soumission des résumés	15 septembre 2012
Acceptation des résumés	30 octobre 2012
Soumission des articles	31 janvier 2013
Articles en version finale	31 mai 2013
Envoi des présentations	23 septembre 2013

INFORMATIONS PRATIQUES

Le colloque aura lieu à Marseille, du 1^{er} au 3 octobre 2013. Les articles seront rédigés en anglais. Les présentations orales seront faites en français ou en anglais avec **traduction simultanée anglais-français et français-anglais**. Les actes seront édités dans la collection de la RILEM.

Proposition de communications

Si vous souhaitez présenter une communication, votre résumé (2 pages) doit parvenir au secrétariat de la manifestation (afgc@enpc.fr) avant le 31 juillet 2012.

Exposition technique - Posters

Un espace d'exposition technique est proposé aux entreprises et industriels pour promouvoir leur savoir-faire et leurs produits.

Comité d'organisation

Président : Jacques RESPLENDINO (SETEC TPI - AFGC)

Comité scientifique

Président : François TOUTLEMONDE (IFSTTAR) assisté de 35 experts dont 20 étrangers provenant de pays où les BFUP ont fait l'objet d'applications



Le MuCEM - Photo : Agence Ricciotti



BFUP 2013

Invitation préliminaire
Appel à communications

2^{ème} Colloque International
sur les Bétons Fibrés à

Ultra-hautes Performances (BFUP)

Concevoir et Construire en BFUP :
de l'innovation aux réalisations
à grande échelle

Marseille (France)
1^{er} au 3 octobre 2013



OBJECTIFS

Quatre ans après le colloque BFUP 2009 qui s'est tenu à Marseille sous l'égide de la fib et de l'AFGC et a fait le point sur le savoir faire et les applications réalisées avec les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP), force est de constater que les projets et les constructions utilisant les BFUP ont connu une nette montée en puissance tant en Europe qu'en Amérique du Nord, au Japon ou en Australie.

L'objectif du Colloque International de 2013 est de faire le point sur les compléments d'expérience acquise dans la connaissance et l'utilisation des BFUP :

- conception de structures, éléments et d'ouvrages
- réalisation industrielle
- applications à grande échelle.

Le colloque présentera les réalisations concrètes les plus récentes tant en génie civil, en bâtiment que dans le domaine des équipements et infrastructures, en construction neuve et en réhabilitation. Il analysera les enseignements techniques et organisationnels qui peuvent être tirés de ce retour d'expérience, en termes de conception et calcul, justification de la sécurité, fiabilité de réalisation, performances atteintes en œuvre et durabilité.

Sans entrer dans le détail des actions de recherche réalisées en amont des projets, un point sera fait sur les travaux nationaux et internationaux. En particulier ceux réalisés au sein de la fib, pour faire émerger une doctrine technique et scientifique commune de conception et calcul, et d'identification des paramètres d'analyse du cycle de vie.

L'AFGC lance le présent appel à communications à l'attention de tous les acteurs de la Construction, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises, industries, sociétés d'ingénierie, architectes, laboratoires, universités, organismes de contrôle qui ont été ou sont impliqués dans des réalisations en BFUP. Explicitant les raisons du recours à ces matériaux (esthétique, technique, structurelle ou environnementale) les présentations pourront faire le bilan de l'expérience acquise et en tirer des enseignements pour les réalisations futures.

THÈMES DES CONFÉRENCES

Les trois jours seront consacrés à des présentations en séance plénière sur les thèmes suivants :

- Applications structurelles en Génie Civil et ouvrages d'art, grands projets, ouvrages maritimes, fluviaux, structures offshore
- Ossatures et enveloppes de bâtiments
- Eléments et composants fonctionnels et architecturaux
- Renforcement, réhabilitation
- Durabilité (retours d'expérience, utilisations dans des environnements agressifs)
- Développement Durable, Analyse de Cycle de Vie, recyclage
- Résistance en conditions extrêmes (feu, séisme, chocs, impacts,...)
- Mise en œuvre, application in situ, contrôles
- Recommandations, codes et normes nationaux et internationaux
- Modélisations, calculs et justifications, fiabilité
- Aspects réglementaires et contractuels pour l'emploi des BFUP : variantes, économie, sécurité, assurances.

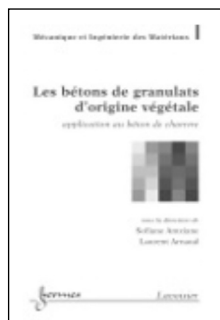


Le MuCEM - Photo : Agence Ricciotti

Secrétariat du colloque
Nadjet Berrahou-Daoud
AFGC - 15 rue de la Fontaine au Roi
F- 75127 Paris Cedex 11
afgc@enpc.fr **Tel. +33 (1) 44 58 24 70**

AFGC
A l'attention de Nadjet BERRAHOU-DAOUD
15, rue de la Fontaine au Roi
75127 - PARIS Cedex 11
FRANCE

Lavoisier



Les bétons de granulats d'origine végétale

application au béton de chanvre

Traité MIM - Série Matériaux de construction

sous la direction de **Sofiane Amziane - Laurent Arnaud**

ISBN : 978-2-7462-3809-1 - Format : 16,5 x 24 - 348 p. - 117 €

Editions Lavoisier

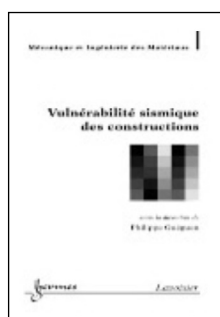
Hermès

Ce livre est un des tout premiers « si non le premier » exclusivement dédié au domaine des bétons de végétaux. Nous nous employons au fur et à mesure des chapitres de décrire l'intérêt de l'usage de tels matériaux, de décliner les nombreuses propriétés multiphysiques et enfin d'illustrer les modes de fabrication et de mise en œuvre.

L'ouvrage se focalise principalement sur l'exemple du béton de chanvre. Ce matériau est aujourd'hui très largement utilisé dans l'industrie de la maison individuelle. Le confort thermique, hygrothermique et acoustique est induit par la structure exceptionnelle du matériau dans le sens où elle associe porosité, légèreté et inertie. Le comportement mécanique n'est pas en reste, une grande ductilité et des propriétés loin des standards habituels sont précisées dans cet ouvrage.

Par ailleurs, l'Analyse de cycle de vie dont la plus grande partie du volume est d'origine végétale fait ressortir un bilan qui lui est très favorable.

Lavoisier



Vulnérabilité sismique des constructions

série Risques naturels (MIM)

dirigée par François Nicot

sous la direction de Philippe Guéguen

ISBN : 978-2-7462-3814-5 - Format : 15,5 x 24 - 340 p. - 100 €

Editions Lavoisier

Hermès

Savoir évaluer la vulnérabilité des constructions existantes

Ce ne sont pas les séismes qui tuent mais l'effondrement des constructions.

C'est ainsi au génie parasismique, au travers de la réglementation, de concevoir des ouvrages résistants à l'aléa sismique dit réglementaire.

Cependant, sachant que ces règles se sont améliorées en même temps que notre connaissance du phénomène naturel et des événements passés, force est de constater que la majorité des centres urbains est composée de bâtiments anciens, conçus selon des concepts et des règles de l'art souvent inadaptés au contexte sismique.

Savoir évaluer la vulnérabilité des constructions existantes est donc une étape indispensable à une meilleure gestion du risque sismique et de sa politique de prévention.

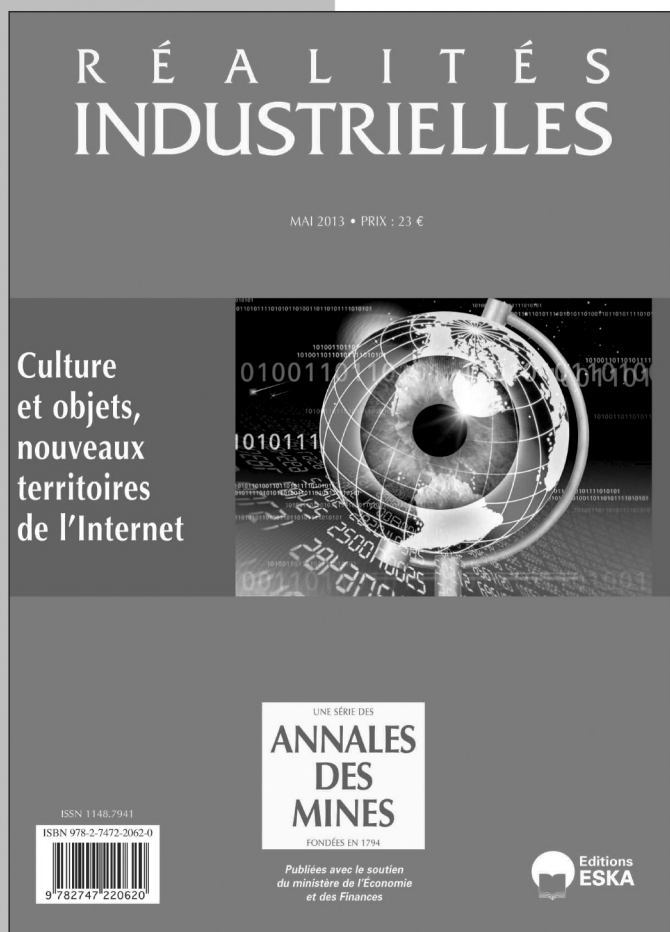
Après quelques rappels essentiels suivis d'exemples, cet ouvrage décrit des développements récents sur l'évaluation sismique de zones urbaines constituées d'un grand nombre de structures, dans des contextes à sismicité modérée (France, Suisse) ou forte (Italie, Grèce).

R É A L I T É S INDUSTRIELLES

une série des Annales des Mines

S O M M A I R E

CULTURE ET OBJETS, NOUVEAUX TERRITOIRES DE L'INTERNET



Editorial - Pierre COUVEINHES

Introduction - Jean-Pierre DARDAYROL

A. Culture et loisirs au risque de l'Internet

a) Facteurs de rupture et de continuité

Les industries culturelles et créatives sont l'avenir numérique de l'Europe - Jean-Noël TRONC

Les enjeux des industries culturelles - Laurence FRANCESCHINI

Industries culturelles, propriété intellectuelle, protection sur Internet : la technique, miroir du droit ? - Jean BERBINAU

À tu et à vous, ou la diachronie des pronoms d'adresse à l'ère du numérique - Anne-Élisabeth CRÉDEVILLE

b) Pratiques culturelles et Internet

La télévision connectée - Philippe LEVRIER

Comment sortir du paradoxe inacceptable d'une France qui perd ses emplois malgré sa créativité dans les jeux vidéo ? - Patrice MARTIN-LALANDE

Le livre numérique - Jacques TOUBON

La gratuité sur Internet : de la logique marchande à la logique communautaire - Godefroy DANG NGUYEN, Sylvain DEJEAN et Thierry PENARD

c) Créateurs et producteurs

Le rôle des fournisseurs d'accès à Internet - Yves LE MOUËL

Les enjeux de l'industrie musicale à l'heure de l'Internet - David EL SAYEGH

B. Internet des objets, Internet de la productivité

a) Les grands débats

La vie privée des objets - Alain BENSOUSSAN et Éric BARBRY

L'Internet des objets : un nouveau champ d'action pour la cybercriminalité - Lieutenant-Colonel Éric FREYSSINET

L'Internet des objets : d'une vision globale à des applications bien plus éparses - Hervé RANNOU

b) Un avenir en devenir

L'Internet des objets : les limites d'un concept essentiellement marketing - Olivier ROUXEL

Le marché actuel du machine-to-machine (M2M) et ses perspectives - Samuel ROPERT

L'Internet des objets : quelles perspectives pour les acteurs de la logistique ? - Jean-Pierre DARDAYROL, Claudine DUCHESNE et Loïc de LA COCHETIÈRE

Objets anciens et nouveaux objets - Gabriel KÉPÉKLIAN

Internet(s) des objets logistiques et modèles d'affaires - Yann LE ROCH et Éric BALLOT

Hors dossier

In memoriam : Albert Messiah - Alexandre MOATTI

Le dossier est coordonné par Jean-Pierre DARDAYROL

BULLETIN DE COMMANDE

A retourner aux Éditions ESKA, 12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS

Tél. : 01 42 86 55 65 - Fax : 01 42 60 45 35 - <http://www.eska.fr>

☐ Je désire recevoir exemplaire(s) du numéro de **Réalités Industrielles** Mai 2013 « Culture et objets, nouveaux territoires de l'Internet » (ISBN 978-2-7472-2062-0) au prix unitaire de 23 € TTC.

Je joins ☐ un chèque bancaire à l'ordre des Éditions ESKA

☐ un virement postal aux Éditions ESKA CCP PARIS 1667-494-Z

Nom Prénom

Adresse

Code postal Ville

recommandations aux auteurs

CONTEXTE GÉNÉRAL

Les Annales du BTP sont avant tout une revue technique francophone s'adressant à un public d'ingénieurs et de décideurs œuvrant dans les multiples secteurs du BTP au sens le plus large du terme, à savoir la construction, le bâtiment, les travaux publics, l'ingénierie, les infrastructures urbaines et territoriales.

Les grands enjeux sous-tendus dans tout article pouvant paraître dans la revue sont à mettre en regard avec les problématiques d'aujourd'hui, progrès et innovation technologiques, développement économique dans le respect de l'environnement, valorisation des produits de la recherche dans le monde professionnel, défense du secteur de la construction dans l'économie mondiale...

Les auteurs sont invités à prendre en considération ces aspects dans toute leur diversité. Beaucoup d'articles en effet ne manqueront pas de se baser sur une présentation de travaux de recherche, qu'elle soit fondamentale ou appliquée. Néanmoins, à la différence d'une revue scientifique, les Annales attendent de ses contributeurs plus une description exhaustive de l'intérêt que leurs travaux pourraient présenter à la communauté professionnelle qu'une description précise de leur cheminement intellectuel.

Quand un article est le prolongement d'un colloque ou d'une rencontre scientifique, l'auteur devra donc veiller dans la réécriture à ne pas trop détailler sa démarche, mais à montrer l'intérêt de sa recherche pour le lectorat de la revue, en montrant en particulier dans l'introduction et la conclusion quels étaient ses grands objectifs. Il ne s'approfondira pas plus que nécessaire sur l'aspect scientifique, sachant que le lecteur ne sera pas forcément un spécialiste de sa discipline. En un mot l'auteur doit chercher à vulgariser son discours.

PRÉSENTATION DU MANUSCRIT

Le texte doit être soumis sous format électronique .doc ou .odt envoyé au rédacteur en chef François BUYLE-BODIN à l'adresse annalesbtp@gmail.com

En cas de refus de transmission pour cause de lourdeur des fichiers, l'auteur pourra envoyer un cédérom à **M. BUYLE-BODIN, rédacteur en chef de la revue Annales du BTP, Polytech'Lille – Université Lille 1, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex.**

Afin de faciliter la diffusion du savoir, l'éditeur n'exige pas des auteurs une mise en forme particulière de leur article. Aucune contrainte de longueur n'est posée, mais l'idéal est aux alentours de 15 pages en arial 10 interligne simple.

Les unités de mesures et les symboles doivent respecter les règles typographiques internationales.

Il est nécessaire de préciser :

- le titre en français et en anglais ;
- le ou les auteurs : nom, prénom, titres, coordonnées ;
- un résumé de 15 lignes maximum en français et en anglais ;
- les figures et photographies originales peuvent être fournies à part en .eps, .tif ou .jpg. Elles seront publiées en noir et blanc et doivent donc être d'un bon niveau de gris, au moins 400 dpi ;
- une illustration caractéristique de l'article pourra figurer en couleur sur la une de couverture et devra donc être d'une résolution maximale. Ne pas oublier de mentionner les crédits photographiques.

FONCTIONNEMENT DE LA RELECTURE

Le rédacteur en chef accuse réception du manuscrit et lance la phase d'approbation. Il s'appuie pour la relecture et la sélection finale des articles sur un comité comprenant des experts reconnus de la profession, ainsi que des membres des conseils scientifiques des principales associations du BTP partenaires des Annales.

Le rédacteur en chef de la revue fait part à l'auteur de la décision de publier ou non le texte, il précise éventuellement les corrections à apporter.

Le rédacteur en chef se charge de la transmission du manuscrit à l'éditeur.

AGPA Editions, 4, rue Camélinat, 42000 Saint-Etienne.

L'auteur recevra gratuitement quelques exemplaires du numéro de la revue dans lequel est publié son article.