



ISSN : 1270-9840

SÉRIE BIMESTRIELLE N° 3-4/2012

(anciennement : Annales de l'I.T.B.T.P.,
Revue créée en 1948)

SEPTEMBRE 2012

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
scientifiqueHélène CARRÉ (université de Pau),
chargée du prix jeunes

chercheurs René Houpert

Jean-Jacques ROUX (INSA Lyon),

Président du comité scientifique

des 30^{es} rencontres de l'AUGC de Chambéry**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

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**Matériaux de construction**

Transfert d'humidité dans les murs massifs en terre cuite, influence des enduits	7
<i>Michel KORNMANN, Daniel PALENZUELA, Olivier DUPONT</i>	
Application de la polarisation au décoffrage des éléments en béton - Étude de faisabilité.....	18
<i>N. GOUDJIL, Y. VANHOVE, C. DJELAL, H. KADA</i>	
Pérennisation des Ouvrages en Génie Civil : Diagnostic et Inspection des Bétons d'Egouts	25
<i>Mehena OUALIT, Med Tahar ABADLIA, Raoul JAUBERTHIE</i>	

**Articles proposés par des auteurs étrangers
évalués par les comités de lecture des associations
partenaires des Annales du BTP (CNISF et AUGC)**

Caractéristiques du béton à base de granulats recyclés Étude expérimentale.....	32
<i>Pierre MATAR, Rouba EL DALATI</i>	
Évaluation des performances des nœuds poteau-poutre en béton armé renforcés par tissu de fibres de carbone	40
<i>L. HAKIMI, M. IDDIR</i>	
Caractérisation géométrique des barres d'acier pour béton armé par des méthodes expérimentales	47
<i>Moncef MAKNI, Atef DAOUD</i>	

abstracts — résumés	4
annonces de colloques	53
bulletin d'abonnement	2
recommandations aux auteurs	couv 3



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 **2012** (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

* 3-4/2012

LISTE DES ANNONCEURS

ANNALES DES MINES : 2^e et 4^e de couverture
 ANNONCES DE COLLOQUES : CERGY, p. 53
 ALGER, p. 54-55
 TOULOUSE, p. 56-57
 CACHAN, p. 58-60





éditorial

Chères lectrices, chers lecteurs,

Le rédacteur en chef et l'éditeur des Annales du Bâtiment et des Travaux publics sont heureux de vous proposer le numéro de milieu d'année 2012.

Ce numéro est en partie consacré aux matériaux de construction.

Un article est proposé par des spécialistes des matériaux naturels de construction et porte sur les transferts d'humidité, qui deviennent de plus en plus problématiques avec les nouveaux bâtiments à haute performance énergétique.

Des chercheurs nous présentent une méthode électrique permettant le décoffrage du béton sans utilisation d'huile, appelée à un bel avenir à notre époque de respect de l'environnement.

Un article franco-algérien aborde la problématique de la durée de vie des ouvrages d'assainissement en béton et détaille une méthode de diagnostic et d'inspection des bétons d'égout.

Enfin une étude expérimentale d'un béton à base de granulats recyclés est proposée par des chercheurs libanais.

Nous aurons l'occasion de revenir sur cette thématique des bétons recyclés au moment où démarre un Projet National de Recherche RECYBETON coordonné par l'IREX, qui fut et reste un partenaire des Annales du BTP.

Vous trouverez des informations sur l'IREX sur son site <http://www.irex.asso.fr/>

et sur le projet national sur son site <http://www.pnrecybeton.fr/>

Deux autres articles se préoccupent de structure.

Le premier est proposé par un centre technique de référence en Algérie, le CNERIB, et évalue les performances des nœuds de structure renforcés par des tissus composites pour améliorer leur résistance aux séismes.

Le second porte sur un sujet d'étude récurrent dans le domaine du béton armé, qui aborde la relation entre l'adhérence et la forme des crénelures des barres, qui varie d'un pays à l'autre. Ici est abordé le cas de la Tunisie.

Bonne lecture.

Pr. François BUYLE-BODIN
Rédacteur en chef





résumés — abstracts

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

TRANSFERT D'HUMIDITÉ DANS LES MURS MASSIFS EN TERRE CUITE, INFLUENCE DES ENDUITS

Michel KORNMANN, Daniel PALENZUELA, Olivier DUPONT

Un enduit extérieur protège le mur contre la pluie et la condensation tout en laissant s'échapper l'humidité du mur. Un enduit présente une certaine porosité et laisse passer partiellement l'eau liquide et la vapeur. Il n'est donc pas entièrement étanche. Durant une période de pluie, le mur absorbe de l'humidité mais il sèche plus ou moins rapidement par la suite.

Des mesures des propriétés thermo hydriques de la brique et de l'enduit ont été réalisées. Sur cette base et avec le logiciel Wufi4.2 1d, des calculs de transfert d'humidité dans des murs soumis à des climats français réalistes ont été réalisés.

Les calculs montrent qu'à Marseille, il n'est pas nécessaire d'exiger de l'enduit des propriétés thermo hydriques élevées. Par contre dans des climats plus sévères d'un point de vue humidité, comme à Brest, la qualité de l'enduit devient très importante. Les prises d'humidité peuvent être significatives et le mur n'est plus capable d'évaporer par l'extérieur l'humidité absorbée. Cette humidité peut diminuer sensiblement les propriétés thermiques du mur. Il conviendrait donc employer en ces lieux des enduits de qualité W2 et même supérieurs.

MOISTURE TRANSPORT IN MONOLITHIC BRICK WALLS, INFLUENCE OF RENDERING

A rendering protects a wall against rain and vapour condensation. A rendering is not leak proof; it is porous and some vapour and liquid water can enter it. It should allow that the wall dries afterward.

Measurements of the thermal and moisture related properties of the brick and of the rendering were carried out. Moisture transfers through a rendered brick wall were then computed with typical French climatic conditions by the software Wufi4.2 1d.

In Marseille, the rendering properties are not critical because a wetted wall dries very quickly from the external side. In more severe climates from the moisture aspect, such as in Brest, the properties of the rendering are more critical. The wall can be significantly wetted and the wall cannot dry easily from the external side. Moisture in addition decreases significantly the thermal insulation of the wall. It is necessary to apply W2 grade rendering or even better.

APPLICATION DE LA POLARISATION AU DÉCOFFRAGE DES ÉLÉMENTS EN BÉTON - ÉTUDE DE FAISABILITÉ

N. GOUDJIL, Y. VANHOVE, C. DJELAL, H. KADA

Une nouvelle technique de décoffrage, utilisant le phénomène de l'électro-osmose, a été développée dans le but de pallier les inconvénients liés aux produits de démoulage actuellement utilisés. Le principe consiste à appliquer un courant électrique

entre le ferrailage et le coffrage afin de provoquer une migration d'eau vers l'interface béton/coffrage créant ainsi un écran capable d'éviter l'adhérence du béton au coffrage. Ce papier présente la mise au point du dispositif et les résultats obtenus en laboratoire ainsi que la transposition de la technique in-situ. Les résultats obtenus font l'objet d'un dépôt de brevet par l'entreprise qui a financé cette étude. Aussi, les valeurs ne seront pas divulguées dans ce papier.

APPLICATION OF POLARIZATION FOR DEMOULDING OF CONCRETE ELEMENTS – FEASIBILITY STUDY

A new demoulding technique, based on electro-osmosis phenomenon, was developed in order to avoid the inconveniences caused by demoulding products currently used. The principle consists in applying an electric current between steel bar and formwork to generate water migration at concrete/formwork interface, thus forming a screen able to avoid concrete adhesion to the formwork. This paper presents a development of the device and the results obtained from laboratory as well as in-situ tests. The obtained results give rise to a patent deposit by the company which funded the study. Also, the values will not be revealed in this paper.

PÉRENNISATION DES OUVRAGES EN GÉNIE CIVIL : DIAGNOSTIC ET INSPECTION DES BÉTONS D'ÉGOUTS

Mehena OUALIT, Med Tahar ABADLIA, Raoul JAUBERTHIE

La durabilité des bétons dans les réseaux d'assainissement est principalement affectée par l'action combinée, chimique (sels, sulfates, acides...), mécaniques (poinçonnement, abrasion...) et biologiques (bactéries aérobies, anaérobies...) provoquant une détérioration souvent de la matrice cimentaire. Ces dégradations sont souvent aggravées en fonction de la vitesse, la nature, la concentration et le pH ainsi que les conditions environnementales aux alentours (taux d'oxygène, température... etc).

L'objectif de ce travail qui a été réalisé à l'INSA de Rennes consiste à effectuer une étude sur la dégradation et les facteurs responsables d'altération du béton employé dans le réseau d'égouts de la ville de Rennes. Ainsi, des échantillons prélevés dans différentes zones (radier, medium et toit) des conduites ont été analysés à l'aide de moyens d'investigation afin de mettre en évidence l'état d'endommagement interne due aux effluents et externe (sol) de réseau ainsi que les modifications chimiques et minéralogiques enregistrées. Ces essais sont complétés par une caractérisation physique et mécanique.

Dans cet article, nous présentons les résultats trouvés de l'inspection d'un tronçon dont les sollicitations prédominantes sont en majorité chimiques et abrasives.

Cette étude met clairement en évidence la très forte anisotropie des dégradations aussi bien internes qu'externes.

Enfin, des recommandations seront proposées en adéquation avec l'environnement ainsi qu'une évaluation de la perte de performance des conduits.





DURABILITY OF STRUCTURES IN CIVIL ENGINEERING: DIAGNOSIS AND INSPECTION OF SEWER CONCRETE

The durability of concrete in sewerage systems is mainly affected by the combined action, chemical (salts, sulfates, acids ...), mechanical (puncture, abrasion ...) and biological (aerobic, anaerobic bacterium ...) causing deterioration often the cement matrix. These are often aggravated damages based on the speed, nature, concentration and pH as well as environmental conditions around (oxygen, temperature... etc).

The objective of this work has been done at INSA of Rennes is to conduct a study of degradation and the factors responsible for deterioration of concrete used in the sewage of the city of Rennes. Thus, samples taken from different zones (strike, medium and roof) lines were analyzed using investigation methods in order to highlight the state of damage due to internal and external waste (soil) network as well as chemical and mineralogical changes recorded. These tests are supplemented by physical and mechanical characterization.

In this paper, we present the results of the inspection found a line where the stresses are predominant in most chemical and abrasive.

This study clearly shows the strong anisotropy of both internal and external damage. Finally, recommendations will be proposed in line with the environment and an assessment of the performance loss ducts.

ARTICLES PROPOSÉS PAR DES AUTEURS ÉTRANGERS, ÉVALUÉS PAR LES COMITÉS DE LECTURE DES ASSOCIATIONS PARTENAIRES DES ANNALES DU BTP (CNISF ET AUGC)

CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Pierre Matar, Rouba El Dalati

L'objectif de cette recherche est d'étudier le problème de l'utilisation des granulats provenant du recyclage du béton comme substitution partielle des granulats naturels. Cette étude a pour but de déterminer l'influence des granulats recyclés sur les caractéristiques physico-mécaniques du béton.

Les taux de substitution sont 10, 20 et 30 % et les dimensions des granulats recyclés utilisés sont entre 4 et 16 mm.

Afin de pouvoir évaluer les résultats des essais des bétons contenant des granulats recyclés, un béton témoin ne contenant que des granulats naturels a été préparé.

CHARACTERISTICS OF CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES EXPERIMENTAL STUDY

The objective of this research is to study the problem of the use of aggregates resulted from recycled concrete as a partial substitution of natural aggregates. The aim of this study is to determine the influence of recycled aggregates on the physic-mechanical characteristics of concrete.

The substitution rates are 10, 20 and 30 % and the dimensions of used recycled aggregates are between 4 and 16 mm.

In order to evaluate the results of tests of concrete containing recycled aggregates, a reference concrete containing only natural aggregates has been prepared.

ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES NŒUDS POTEAU-POUTRE EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉS PAR TISSU DE FIBRES DE CARBONE

L. HAKIMI, M. IDDIR

La réparation des constructions existantes constitue une préoccupation majeure des gestionnaires d'ouvrages en raison du nombre important de situations nécessitant l'augmentation de leurs capacités de résistance. Les méthodes traditionnelles de réparation et de renforcement ont largement été utilisées avec des matériaux conventionnels. Les développements récents dans le domaine des matériaux composites en polymères renforcés de fibres ont permis une nouvelle et efficace alternative. Ils présentent l'avantage d'être, légers, non corrosifs, de grande résistance à la traction et peuvent s'adapter à des usages variés.

Le présent article a pour objet l'étude numérique du comportement de la zone nodale dans une structure poteau poutre après renforcement par un tissu de fibre carbone. Les simulations numériques effectuées sont basées sur la méthode des éléments finis dans l'environnement du logiciel ANSYS, en considérant le comportement non linéaire des matériaux. L'évolution de la propagation de la fissuration, des déformations, et la variation de la capacité d'absorption d'énergie sont les paramètres mesurés. Une amélioration des performances de la zone renforcée a été constatée. Les valeurs de ces performances peuvent être utilisées dans les situations pratiques de dimensionnement des structures renforcées.

PERFORMANCE ASSESSMENT OF CONCRETE BEAM-COLUMN JOINT REINFORCED WITH CARBON FIBER FABRIC

The repair of existing buildings is a major concern for managers of buildings due to the large number of situations requiring an increase in their strength capacity. Traditional methods of repair and reinforcement have been widely used with conventional materials. Recent developments in the field of composite materials in fiber-reinforced polymers have enabled a new and effective alternative. They have the advantage of being lightweight, non-corrosive, high tensile strength and can adapt to different uses.

This article concerns the numerical study of the behavior of the joint zone in a beam-column structure reinforced with a carbon fiber fabric. Numerical simulations are performed based on the finite element method in ANSYS software environment, considering the nonlinear behavior of materials. The evolution of the propagation of cracking, deformation, and the change in the capacity energy absorption are measured parameters. Improved performance of the reinforced zone was found. The values of these performances can be used in practical situations for design of strengthening structures.

CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES BARRES D'ACIER POUR BÉTON ARMÉ PAR DES MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Moncef MAKNI, Atef DAOUD

L'article présente une approche expérimentale intermédiaire pour caractériser un coefficient seuil d'adhérence acier béton (f_r),



appelé aire relative des verrous. La méthode proposée est basée sur deux techniques complémentaires à savoir : la technique de l’empreinte bidimensionnelle permettant la mesure de l’inclinaison et de l’espacement des verrous et la technique de la photoprojection donnant la hauteur, la largeur, l’espacement et la pente de la face des verrous.

Les paramètres mesurés serviront dans un premier lieu à calculer la valeur du coefficient (fR) et dans un second lieu à construire la géométrie en 3D de la barre sur le logiciel « Autcad2009 ».

Cette méthode a été appliquée sur trois types de barre ayant des géométries différentes (barre française, barre tunisienne et barre brésilienne).

Les résultats obtenus sont acceptables et comparables à ceux obtenus avec des techniques plus sophistiquées à savoir celles du scanner laser tridimensionnel.

EXPERIMENTAL METHODS TOWARDS GEOMETRICAL CHARACTERIZATION OF STEEL REINFORCEMENT

The paper presents an experimental approach to characterize the coefficient (fR) called the relative rib area of steel bars. The proposed method is based on two complementary techniques: two-dimensional fingerprinting technique to measure the slope and spacing of ribs and the technique of photoprojection to give the height, width and face slope of ribs. The measured parameters are used firstly to determine the relative rib area (fR) and secondly to build the 3D geometry of the reinforcement using « autocad2009 » software.

This method was applied to three types of bar with different geometries : Tunisian and French reinforcement bar diameter of 12 mm and Brazilian reinforcement bar diameter of 12.5 mm .

The obtained results are acceptable and compared to those obtained with three-dimensional laser scanner.



TRANSFERT D'HUMIDITÉ DANS LES MURS MASSIFS EN TERRE CUITE, INFLUENCE DES ENDUITS

Michel KORNMANN*, **Daniel PALENZUELA****, **Olivier DUPONT*****

* Consultant technique, MKC, CH-1212 Grand Lancy
m.kornmann@tuiles-briques.com

** Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction, ingénieur thermicien, service produits et ouvrages,
F-92140 Clamart
d.palenzuela@ctmnc.fr

*** Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction, chef de service, service produits et ouvrages,
F-92140 Clamart
o.dupont@ctmnc.fr

1. INTRODUCTION

1.1. Dégradation des ouvrages par l'humidité

L'accumulation incontrôlée d'humidité dans les murs en maçonnerie d'un bâtiment a un effet très néfaste sur l'intégrité de ses composants. Les dommages causés par l'humidité comprennent la formation d'efflorescences, la sensibilisation au gel, les effritements dus aux cristallisations de sels, le gonflement et le décollement des enduits intérieurs et extérieurs, la corrosion des fixations et des renforcements métalliques, la déformation et le pourrissement des éventuelles menuiseries de bois.

L'humidité excessive peut en outre favoriser la croissance de mousses et lichens sur les enduits extérieurs avec un effet inesthétique et probablement un effet destructif à long terme. Sur les revêtements intérieurs, apparaissent des décollements des papiers peints, des peintures cloquées, des odeurs et des taches d'humidité, des dépôts noirâtres, et finalement le relargage de spores nuisibles à la santé des

habitants. Ces aspects ont déjà été étudiés de nombreuses fois.

1.2. Humidité et isolation thermique des murs monolithiques

Dans un mur monolithique (brique Monomur terre cuite ou béton cellulaire par exemple), il n'y a pas de couche qui bloque le transfert d'humidité par capillarité. L'humidité présente peut donc migrer assez facilement dans le mur. Cette humidité augmente significativement la conductivité thermique du tesson et compromet les performances thermiques des briques. Un mur monolithique pourrait donc voir baisser sa résistance thermique de façon significative par la présence d'humidité. Il est donc industriellement, et socialement, très important de mieux évaluer le risque de ce transfert d'humidité et de pouvoir sélectionner des enduits qui garantiront que le mur enduit reste bien sec et isolant thermiquement. Cet aspect important pour les murs monolithiques n'a été que peu étudié jusqu'à présent et sûrement pas dans les conditions françaises.





1.3. Fonctions d'un enduit dans le transfert d'humidité

Un mur extérieur monolithique est exposé à de nombreuses sources d'humidité, internes et externes :

- les remontées d'humidité du sol si la bande de coupure de capillarité n'est pas bien posée sur les fondations du mur,
- la production d'humidité intérieure par les habitants qui se lavent, qui cuisinent, qui entretiennent des plantes vertes... Cette humidité peut diffuser dans le mur,
- la condensation liée aux refroidissements, en particulier chaque nuit,
- la pluie battante quand le mur n'est pas protégé par les avancées du toit.

Un mur monolithique en brique de structure est protégé de cette dernière agression par un enduit extérieur. Cependant l'enduit présente une protection limitée mais n'est pas complètement étanche. Par ailleurs, il peut être partiellement fissuré ou écaillé. L'enduit et le mur sous-jacent vont donc subir un certain nombre de cycles de mouillage et de séchage. Le mur enduit sera entièrement efficace si globalement, et sur le long terme, la partie intérieure du mur reste bien sèche, l'humidité absorbée par temps de pluie étant évaporé par beau temps, de telle sorte que l'humidité reste limitée et ne dégrade pas la conductivité thermique.

La résistance à l'humidité d'un mur enduit dépendra d'abord de sa nature propre : type de maçonnerie et épaisseur, type et épaisseur de l'enduit, propriétés thermo hydriques des matériaux ainsi que de la situation exacte du mur : orientation, exposition liée à la hauteur, ensoleillement et ombre,...

Le bon comportement du mur enduit est aussi fonction du climat local :

- La pluie battante peut atteindre le mur exposé et la quantité d'eau reçue par le mur exposé sera fonction des précipitations, du vent et de son écoulement autour du bâtiment.
- L'eau condensée dépend de l'humidité de l'air et des variations locales de températures
- L'humidité accumulée dans le mur doit pouvoir s'évaporer entre deux pluies. L'ensoleillement, la température et l'humidité du lieu vont caractériser la facilité du séchage.

On imagine donc qu'un enduit peut être entièrement efficace dans certaines situations et être insuffisant pour d'autres.

1.4. Approche suivie

C'est cette combinaison enduit et conditions climatiques qu'on va étudier dans cette publication. On examinera le comportement de différents enduits dans différentes climats français sur la base d'un calcul de simulation des

transferts thermiques et hydriques dans un mur extérieur enduit.

Les propriétés thermo hydriques des matériaux ont été mesurées en laboratoire.

Les calculs ont été réalisés pour un mur en briques Monomur, protégé extérieurement par un enduit monocouche, recouvert de plâtre intérieurement et exposé à l'environnement extérieur. Pour ces calculs, on a utilisé le logiciel de transfert d'humidité et chaleur Wufi4.2 1d¹ développé par IBP Holzkirchen (RFA), déjà validé à de multiples occasions.

2. MATÉRIAUX DU MUR ET PROPRIÉTÉS

Pour connaître les propriétés de la brique terre cuite Monomur et de l'enduit et permettre le calcul, une série de tests thermo-hydriques a été réalisée à IBP Holzkirchen, sur le tesson, la brique elle-même, ainsi que sur l'enduit.

2.1. Brique Monomur

Les mesures sur des briques Monomur ont été décrites précédemment².

Les présents calculs ont été effectués avec le « Monomur 2 » qui semblait le plus sensible à l'humidité. Les propriétés mesurées (tesson et brique, avec ses perforations) sont résumées dans le tableau 1.

On voit que le tesson n'est pas hygroscopique et absorbe peu d'eau de l'atmosphère humide; par contre, il absorbe beaucoup d'eau par capillarité. Par rapport au tesson, la brique est plus isolante thermiquement, plus résistante du point de vue capillarité et permet une meilleure diffusion de la vapeur.

Le transfert par capillarité est décrit dans le calcul par un coefficient de transport capillaire (ou diffusivité capillaire). Ce coefficient n'est pas constant et varie de façon complexe avec l'humidité du matériau. Sa mesure précise est difficile. Il est donc évalué par approximation³. On mesure deux points de la courbe de diffusivité à deux différentes humidités et le logiciel fait l'hypothèse d'une variation exponentielle entre ces deux points :

- Le premier point est calculé à partir du taux initial d'absorption, qui est facilement mesurable et souvent disponible. Il a été montré qu'il est lié à la diffusivité du matériau saturé d'humidité (humidité u_{100}).
- L'autre point, à faible humidité (humidité u_{80} , en équilibre avec de l'air humide à 80% d'humidité) est déduit de façon théorique.

Ces évaluations se font à l'absorption (mouillage) et au séchage après redistribution de l'eau dans les pores.

1. www.wufi.de

2. Moisture transfers in perforated bricks, Feuchttransport in Lochziegeln, M. Kornmann¹, D. Palenzuela, O. Dupont, ZiegelIndustrie International 1-2/p 22-35 (2011).

3. Kunzel H M, Simultaneous heat and moisture transport in building components, calculation using simple parameters, thesis (1995) IRB Verlag.





2.2. Enduit extérieur monocouche - propriétés

Un enduit extérieur monocouche comprend différents ingrédients : des liants minéraux, ciment et chaux, un granulats fin et de l'eau. Différents additifs peuvent être ajoutés : des pigments pour la coloration, des émulsifiants comme les éthers de cellulose ou les éthers d'amidon, pour obtenir de bonnes propriétés de rétention d'eau et de mise en œuvre, des liants polymères organiques pour améliorer l'adhésion, des fibres pour augmenter la flexibilité, et des hydrofuges comme des savons métalliques, des polymères hydrophobes ou des composés siliconés pour limiter la capillarité.

Un enduit monocouche de bonne qualité d'un grand producteur français a été testé par IBP de deux façons différentes, éprouvette en enduit massif et éprouvette d'enduit déposé sur une brique Monomur 2 sèche.

Les propriétés mesurées sont aussi indiquées dans le tableau 1.

L'enduit a à peu près la même porosité que le tesson. Il est beaucoup plus hygroscopique mais moins capillaire. Il

contient à peu près la même quantité d'eau à saturation. L'enduit diminue la diffusion de la vapeur par rapport à la brique. Il est très efficace contre la pénétration de l'eau liquide en limitant le taux initial d'absorption capillaire par un facteur 100. Cette efficacité est liée à la présence d'hydrofuges et à l'absence de fissuration. On a réalisé le calcul en supposant que cette efficacité peut se maintenir dans le temps.

2.3. Enduit extérieur monocouche - normalisation et certification

Les enduits font l'objet de plusieurs normes ou certifications comme EN 998-1, DIN4108-3, Enduit monocouche certifié CSTB.

En ce qui concerne la limitation des transferts d'humidité, une fonction fondamentale des enduits extérieurs, deux propriétés sont généralement discutées :

- Le taux initial d'absorption d'eau par capillarité, qui caractérise globalement la résistance à l'absorption de la pluie et les transferts internes par capillarité,

	Unité	Tesson	Brique (29cm)	Enduit seul	Enduit sur brique
Masse volumique	kg/m ³	1434 +/-27	733 +/-8	1369+/-56	
Masse volumique théorique	kg/m ³	2662 +/-27		2619+/- 29	
Porosité (y compris perforations des briques)	%	46,1	72,5	47,7	
Résistance thermique	m ² .K/W		2,57*		
Conductivité thermique sèche 10°C (orient. perpendiculaire) (orient. parallèle)	W/ m.K	0,34 0,44	0,11*	0,3**	
Chaleur spécifique	J/kgK	850**	850**	850**	850**
Concentration en humidité à 23°C et 80%RH	Vol %	1,1	0,56	1,7	
Concentration en humidité à 23°C et 93%RH	Vol %	1	0,53	2,3	
Concentration en humidité à 23°C et 97%RH	Vol %	1,5	0,74	3,6	
Concentration en humidité à 23°C à saturation (100% RH)	Vol % kg/m ³	32 320	18,7 187	15 150	16,1 161
Résistance au transport de la vapeur d'eau μ (0 /50%)		18,2 +/-1	7 +/-0,7	17,3	7,9
Résistance au transport de la vapeur d'eau μ (50 /93%)		16 +/-1,6	6+/-0,5	15,4	7,9
Taux d'absorption d'eau initial, W _{0,2h}	kg/m ² h ^{0,5} kg/m ² s ^{0,5}	10,4 0,173	11,1+/-0.1 0,185	0,11 0,0018	0,14 0,0023
Taux d'absorption d'eau en 24h, W24h	kg/m ² h ^{0,5} kg/m ² s ^{0,5}		5,6 0,093		0,07
Coefficient de transport capillaire en surface, à u ₈₀	m ² /s	2,0E ⁻¹⁰	2,0E ⁻¹⁰	2,20E ⁻¹⁰	
Coefficient de transport capillaire en surface, à u ₁₀₀	m ² /s	1,3E ⁻⁶	1,3E ⁻⁶	2,2E ⁻⁶	
Coefficient de transport capillaire en surface, redistribution à u ₈₀	m ² /s	1,0E ⁻¹⁰	2,0E ⁻¹⁰	2,0E ⁻⁹	
Coefficient de transport capillaire en surface, redistribution à u ₁₀₀	m ² /s	1,0E ⁻⁷	1,0E ⁻⁷		
Coefficient de transport capillaire au centre, à u ₈₀	m ² /s		5,0E ⁻⁹		
Coefficient de transport capillaire au centre, à u ₁₀₀	m ² /s		5,0E ⁻⁷		
Coefficient de transport capillaire au centre, redistribution à u ₈₀	m ² /s		5,0E ⁻⁹		
Coefficient de transport capillaire au centre, redistribution à u ₁₀₀	m ² /s		5,0E ⁻⁷		

*Valeur fournie par le producteur ** Valeur déduite de la littérature

Tableau 1 : Propriétés du tesson, de la brique Monomur 2 et de l'enduit





- le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau, qui caractérise principalement les transferts en phase vapeur et la capacité au séchage.

Sur le tableau 2, on compare des valeurs de taux d'absorption d'eau par capillarité. On donne les valeurs des normes et la valeur mesurée de l'enduit testé. Ces données peuvent s'exprimer en différentes unités ($\text{g}/\text{dm}^2\text{min}^{0.5}$, $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0.5}$, $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$, la dernière étant la seule unité cohérente).

La norme européenne EN 998-1⁴ introduit trois qualités W0, W1, W2. L'enduit est de qualité W1 ou W2 quand son taux d'adsorption capillaire est plus faible que la limite W1 ou W2. On trouve également la qualité W0 correspondant à des enduits où la propriété n'est pas mesurée.

Selon la norme européenne, les enduits courants peuvent être de W0 à W2 alors que les enduits monocouches doivent être W1 ou W2.

Il existe aussi une ancienne certification Meruc⁵ du CSTB qui précisait les taux initiaux d'absorption. Ces classes Meruc se recoupent partiellement au sein de la classification (tableau 3).

W2 correspond à C1 et partiellement C2 et W1 à C3. La valeur la plus sévère W2 de l'EN est moins exigeante que la valeur incluse dans la norme DIN. En ce qui concerne le taux d'absorption par capillarité, l'enduit testé présente un taux d'absorption beaucoup plus faible que la limite W2. Il semble que cette faible valeur peut être obtenue communément par ajout d'hydrofuges⁶.

En ce qui concerne le coefficient de perméabilité de la vapeur μ , Meruc n'en parle pas et EN998-1 ne donne des limites maximales précises que pour deux types d'enduit :

μ doit être inférieur à 15 pour les enduits R (enduit d'assainissement) et T (enduit d'isolation thermique). Pour les autres enduits, on exige seulement une déclaration par le producteur de la valeur limite maximale.

Pour les calculs, une valeur de base de 17 a été choisie, correspondant à la mesure effectuée. Un examen de produits disponibles sur le marché a montré des variations de 12 à 40.

On notera que le marquage CE implique un niveau d'attestation 4 des enduits. Si un contrôle qualité usine est effectivement exigé par le marquage, il n'est pas contrôlé par une tierce organisation. Les deux propriétés hydriques ci-dessus doivent être mesurées dans les essais de type initiaux mais le suivi de ces propriétés en contrôle de la production en usine n'est pas exigé.

De son côté, la norme DIN 4108-3 suit les recommandations de Kunzel⁷ pour qui un enduit doit répondre aux critères suivants :

- Le coefficient d'absorption d'eau liquide A doit avoir certaine limite maximale $A < 0,5 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0.5}$ ($0,0083 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$). Cette valeur est beaucoup plus faible que W2.
- La résistance à la diffusion de la vapeur doit être inférieure à une certaine valeur

$S_d = \mu d < 2\text{m}$ avec μ résistance à la diffusion de la vapeur et d'épaisseur de l'enduit.

Si $d = 2 \text{ cm}$, alors μ doit être < 100 , ce qui n'est pas très exigeant.

- Par ailleurs le produit des deux facteurs ci-dessus est soumis à l'exigence suivante :

$$C_{\text{RP}} = A \cdot S_d < 0,2 \text{ kg}/\text{mh}^{0.5}$$

ce qui s'exprime par la figure 1 suivante :

Taux initial d'absorption max. par capillarité	EN998-1 W0	EN998-1 W1	EN998-1 W2	DIN 4108-3	Enduit testé
$\text{g}/\text{dm}^2\text{min}^{0.5}$ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$	Sans limite	< 4 $< 0,05$	< 2 $< 0,026$	$< 0,0083$	0,0018

Tableau 2 : Comparaison des taux d'absorption par capillarité (qualités des normes et enduit)

Taux d'absorption max. par capillarité	Meruc C1	Meruc C2	Meruc C3	Meruc C4	Meruc C5	Enduit testé
$\text{g}/\text{dm}^2\text{min}^{0.5}$ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$ $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0.5}$	$< 1,5$ 0,019 1,1	$1 < < 2,5$ $0,013 < < 0,032$	$2 < < 4$ $0,025 < < 0,05$	$3 < < 7$ $0,038 < < 0,09$	$5 < < 12$ $0,06 < < 0,15$	0,0018 0,108

Tableau 3 : Comparaison des taux d'absorption par capillarité (enduit et classes Meruc)

4. EN 998-1 Définition et spécifications des mortiers pour maçonnerie- Partie 1 Mortiers d'enduits minéraux extérieurs et intérieurs.

5. CSTB, Certificats CSTBat, Enduits monocouches, règlement technique (1998) et cahier de prescriptions techniques (1993) et CSTB Enduit Monocouche Document technique du référentiel de marque « Certifié CSTB Certified » relatif au mortier d'enduit monocouche-Modalités d'essais et contrôles (avril 2008).

6. Lanzon M., Garcia-Ruiz P.A., Evaluation of capillary water absorption in rendering mortars made with powdered water proofing additives, Construction and building 23 (2009) 3287-3291.

7. Kunzel M.H., Kunzel H., Holm A. Rain protection of stucco facades, Buildings IX, ASHRAE 2004 et Kunzel MA, Factors determining surface moisture on external walls, Buildings X, ASHRAE 2007.



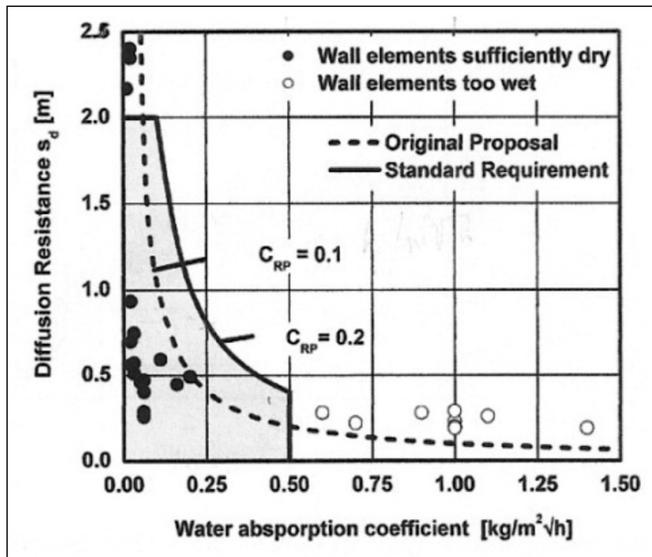


Figure 1 : Limites d'un enduit acceptable selon DIN 4108-3

3. CHOIX DES STATIONS CLIMATIQUES DE CALCUL

On a désiré effectuer des calculs dans différents climats français, variés et représentatifs concernant les conditions d'humidité. Le mouillage du mur par l'extérieur est lié de façon complexe à la distribution de la pluie battante, à la condensation puis au séchage lié à la température, à l'humidité, au vent et à l'ensoleillement. Sur la figure 2, on observe le cumul annuel des précipitations, le nombre de jours de pluie et l'ensoleillement.

Certains ont proposé de caractériser la sévérité à l'humidité d'un lieu par un indice de sévérité, par exemple le rapport hauteur de pluie annuelle / hauteur annuelle d'eau évaporée. Cependant cet indice ne tient pas compte de la distribution temporelle des pluies et des séchages et il n'a pas été prouvé que cet indice soit réellement significatif. Par ailleurs on manque de données extensives sur l'évaporation.

On a donc fait un choix plus intuitif selon des cartes météorologiques. La pluie est liée principalement à l'altitude et à la proximité de la mer, alors que l'ensoleillement est souvent lié à la latitude.

On donne ci-dessous quelques données météorologiques plus détaillées de différents sites (tableau 4) :

Sur la base des données, on a réalisé les calculs pour les sites suivants :

- Paris, à cause de son importance économique et son climat moyen,
- Brest, à cause de la forte humidité et du vent fort,
- Pontarlier (850m), ville en altitude, dans le climat de montagne humide et froid du haut Jura. Comme toutes les données climatiques ne sont pas disponibles, on a retenu en complément la ville suisse voisine de La Chaux de Fonds (1000m) mieux documentée.
- Marseille pour un climat méditerranéen.

Météo France mesure toutes les données horaires nécessaires mais les vend très cher. Faute de données climatiques, résultats de mesures réelles, on est forcé d'utiliser les données du logiciel Météonorm⁸ qui calcule, heure par heure, le climat selon des modèles et des données simplifiées.

On détaille comment les différentes valeurs horaires sont obtenues ainsi que les précisions attendues :

Températures : Les températures journalières sont fournies par la base de données. À partir de cette température et des radiations, les températures horaires sont calculées. Les différences entre les mesures réelles et calculées sont inférieures à 1.5°C.

Humidité : L'humidité journalière est fournie par la base de données. L'humidité horaire est calculée en tenant compte de la couverture nuageuse de la nuit, et de la pluie dans les trois jours précédents. On aurait une précision absolue de l'ordre de 5%.

Vent : La modélisation du vent reste assez approximative.

Précipitations : Les précipitations sont calculées à partir du nombre de jours de pluie mensuels et du niveau mensuel de précipitation. Elles sont donc assez imprécises alors que c'est important pour les transferts d'humidité dans les enduits.

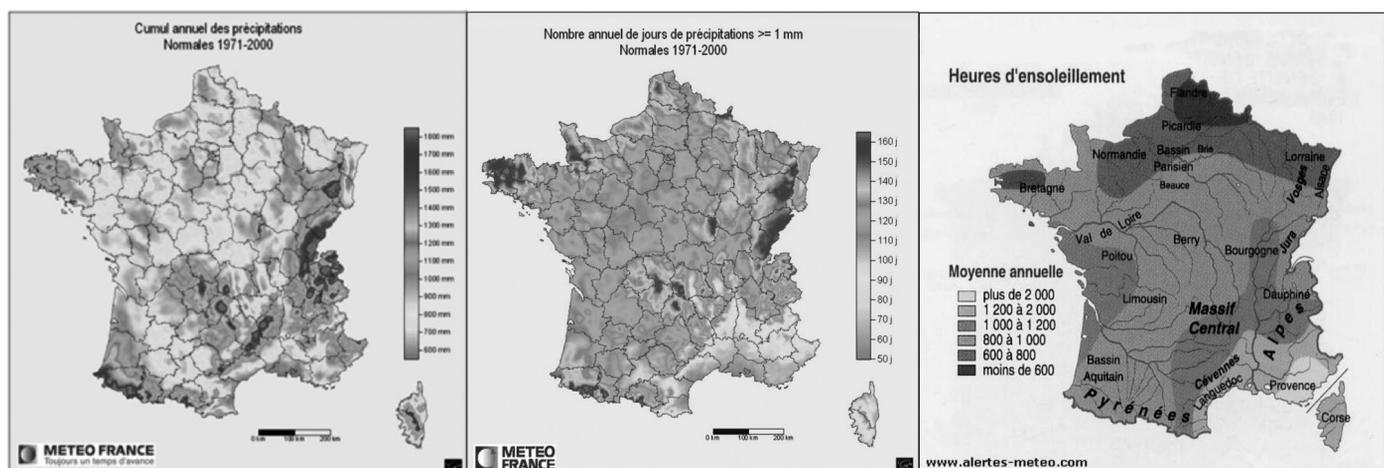


Figure 2 : Précipitations, jours de pluie, et heures d'ensoleillement en France

8. Météonorm, logiciel de www.meteotest.com Berne CH.





	Humidité	Précipitations	Température	Vitesse du vent	Évapotranspiration (juin)
	°C	mm/ an	°C	m/s	mm
Besançon	75,5	1080	10,9	2,3	105
Bordeaux	73,8	807	13,8	3,4	117
Bourg Saint Maurice	65	900	9,3	1,6	100
Brest	82,7	1113	8,4	6,1	100
Chambéry	72,4	1077	11,6	2,3	115
Clermont Ferrant	78	550	11,9		115
Dieppe	80	758	11	4,9	105
Dinard	79,3	706	12	4,7	100
Le Havre	80,3	732	11,4	6,9	110
Le Puy en Velay	74,8	627	8,6	2,9	127
Lille	78	679	11	4,2	100
Limoges	74,8	897	11,5	3,5	115
Lyon	76	826	11,4	3	135
Marseille	63	504	15,7	5	150
Mont Aigoual	76	1629	5,3	9,8	130
Nancy	78	761	9,4	2,8	113
Nice	70	769	15,3	2,9	150
Nîmes	61,7	757	14,9	3,4	171
Paris Montsouris	76	592	11,2	3,9	113
Pontarlier (La Chaux de Fonds)	76	1450	6,7	3,2	100
Toulouse Blagnac	78	656	12,9	3,4	120

Tableau 4 : Données météorologiques moyennes de sites français (source Météonorm)

Le logiciel choisit des situations moyennes et non extrêmes.

4. AUTRES CONDITIONS DE CALCUL

4.1. Conditions aux limites de calcul

On résume les conditions aux limites utilisées dans le calcul :

Début de l'exposition début : 1^{er} octobre, durée d'exposition : un an, deux ans ou quatre ans

Conditions initiales du mur : T=10°C et RH=70% uniforme en travers du mur

Orientation du mur : on a retenu l'exposition Sud-Ouest (SW). C'est l'orientation la plus exposée à la pluie battante dans deux des stations, Paris et Pontarlier. À Marseille et à Brest la pluie est un peu plus importante au Nord-Ouest

(NW). L'humidité réelle à Brest et à Marseille seront donc un peu supérieure aux résultats du calcul.

Mur vertical, hauteur inférieure à 10m ; on s'intéresse principalement à la maison particulière. Les paramètres de la pluie battante sont donc : R1=0 et R2 =0,07 s/m

Résistance thermique superficielle externe : 0,059m²K/W, diminuant avec le vent.

Résistance thermique superficielle intérieure : 0,125m²K/W constante.

Coefficient d'absorption solaire du mur : 0,6 (enduit clair) et émissivité : 0,9

Coefficient d'absorption de la pluie : 0,7. L'absorption de la pluie est très dépendante de l'écoulement du vent sur le bâtiment. Cette valeur correspond plutôt à un endroit assez exposé.

Climat interne : selon EN15026⁹ « High moisture load ». Wufi a été vérifié plusieurs fois avec ce type de conditions aux limites d'humidité intérieure élevée mais réalistes.

Calcul horaire avec diminution automatique possible des temps d'intégration pour améliorer la stabilité du calcul.

9. EN 15026 Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiment - évaluation des transferts d'humidité par simulation numérique (avril 2008).





4.2. Paramètres examinés

Différents paramètres ont été examinés par calcul :

- Influence de la localisation : Paris, Marseille, Brest, Pontarlier
- Influence de la capillarité de l'enduit : mesuré, W2, W1, C4.
- Influence de la résistance à la vapeur de l'enduit : 10 à 35. La valeur de base est la valeur mesurée 17. On trouve dans la littérature des valeurs de 12 à 40 pour les enduits en mortier de ciment et de 9 à 41 sur les enduits chaux, on a retenu des valeurs de 10 à 35 dans les conditions d'un climat particulier.

4.3. Modélisation détaillée du mur

On réalise les calculs d'un mur de maçonnerie de brique Monomur de 30 cm d'épaisseur avec un enduit plâtre intérieur (12,5 mm) et un enduit monocouche extérieur (15 mm). La brique Monomur elle-même est modélisée par trois couches superposées, deux couches extérieures de tesson (2 x 1 cm) et une couche interne de matériau moyen (28 cm). La résistance thermique du mur sec sans enduit est de $2,71\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ et le coefficient de transfert U est $0,346\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

Ce mur est sans doute un peu mince par rapport aux nouvelles réglementations thermiques ; cela péjore légèrement les conclusions par rapport aux briques plus épaisses.

Les propriétés du plâtre sont prises dans la banque de données de Wufi (Gypsum board /IBP).

À l'interface brique/ enduit, il existe une résistance hydrique qui limite partiellement la pénétration de l'eau par capillarité à l'interface. Cette résistance dépend de la nature du mortier à l'interface et en particulier de l'absorption d'eau du mortier par la brique quand on applique l'enduit¹⁰. Comme cette résistance est mal connue et comme les résultats des calculs sont comparatifs, on n'a pas inclus cette résistance dans la modélisation.

5. INFLUENCE COMPARÉE DE CLIMATS SUR DES MURS ENDUITS

5.1. Brest

On montre d'abord les résultats de calculs de transfert de chaleur et d'humidité sur un mur exposé à Brest. Sur les figures 3a et 3b, on a tracé l'ensemble des profils horaires de température et d'humidité en travers du mur pendant un an (8760 profils au total sur la figure) avec deux enduits (enduit mesuré et Meruc C4).

Sur la figure 3a, on donne les résultats obtenus avec l'enduit C4. En haut de cette figure 3a, on voit les profils de

température en travers du mur. À la surface externe du mur, extrême gauche du graphique, les températures ont variées de -3 à plus de 40°C alors que la température de la face intérieure du mur (à l'extrême droite du graphique, est restée proche de 20°C .

En bas de la figure 3a, on voit les profils d'humidité en kg/m^3 et d'humidité relative de l'air en équilibre avec cette humidité (%). On voit que l'enduit a atteint plusieurs fois la saturation ($160\text{ kg}/\text{m}^3$). La brique a été humide sur une profondeur importante. Sa partie extérieure a parfois montré une grande humidité ($200\text{ kg}/\text{m}^3$).

Sur la figure 3b, on voit les résultats du calcul obtenus avec l'enduit mesuré. Les distributions des températures sont assez similaires. Par contre les distributions d'humidité sont très différentes : l'humidité de l'enduit reste très faible et la brique est quasiment sèche pendant toute l'année.

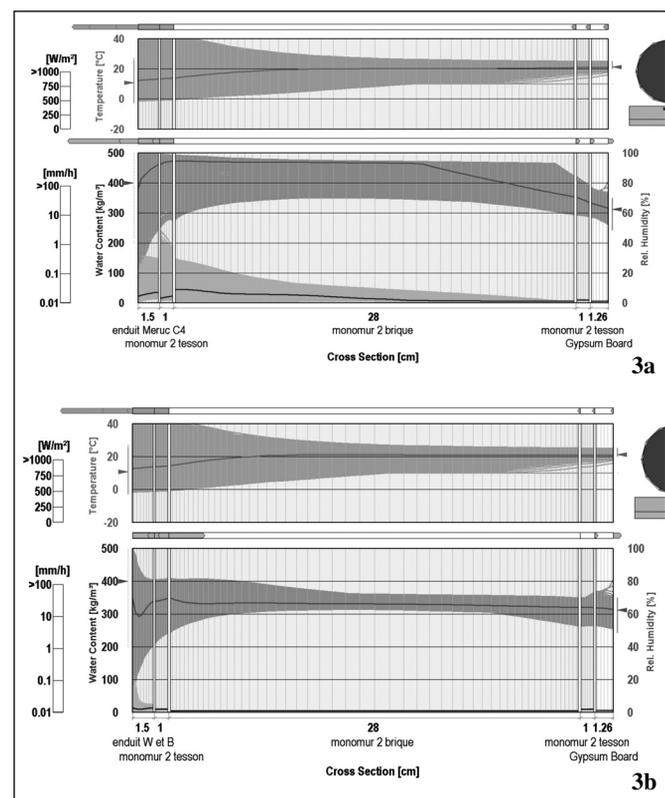


Figure 3 Ensemble des distributions horaires des températures et humidités (absolues et relatives) en travers du mur à Brest, 3a enduit C4, 3b enduit mesuré

Si maintenant, on trace la variation de l'humidité moyenne des deux murs enduits en fonction du temps, on obtient la figure 4. L'humidité moyenne du mur varie selon la qualité de l'enduit.

Avec l'enduit C4, on observe une importante prise d'humidité du mur en hiver (jusqu'à $8\text{ kg}/\text{m}^2$), avec des pics correspondant aux fortes pluies, puis un séchage l'été. On observe aussi que la concentration en humidité moyenne du mur à la fin de l'année est plus élevée qu'en début de

10. Derluyn H., Janssen H., Carmeliet J., Influence of the nature of the interfaces on the capillary transport in layered materials, Construction and building materials 25 (2011) 3685-3693.



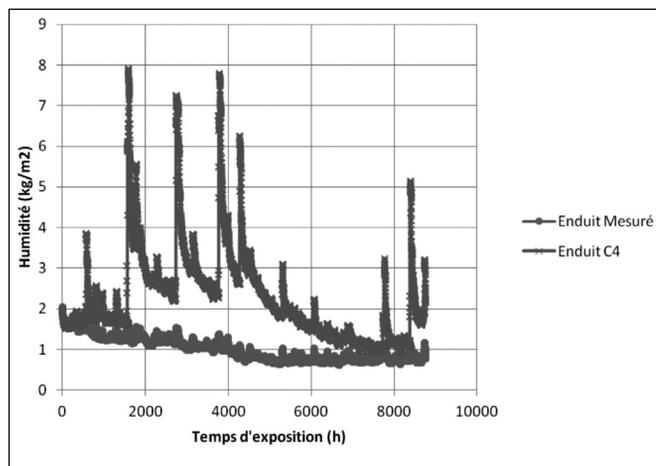


Figure 4 : Variation de l'humidité moyenne de deux murs enduits à Brest - durée une année débutant le 1^{er} octobre (2 enduits : C4 et enduit mesuré)

calcul mais l'humidité initiale avait été choisie par convention assez basse. Si on réalise le calcul sur plusieurs années, on n'observe pas d'accumulation d'humidité avec les années.

Avec l'enduit mesuré, la prise d'eau puis le séchage sont aussi détectables mais ils sont très limités.

Si on calcule maintenant l'humidité du plâtre intérieur (Figure 5), on voit que la couche de plâtre est plus sèche l'hiver que l'été et que les concentrations sont très similaires quel que soit l'enduit. Cela signifie que l'humidité de la couche de plâtre est principalement fonction de l'humidité de l'air intérieur et que l'apport de l'humidité de la pluie a une influence négligeable sur l'humidité du plâtre. Les murs enduits (enduit mesuré et C4) sont donc efficaces tous les deux sous l'aspect protection contre l'humidité extérieure et empêchent l'humidité d'apparaître sur la face intérieure. Si le mur avec l'enduit C4 est parfois humide dans sa masse, l'humidité n'en ressort pas et on ne voit pas de tache sur la surface intérieure.

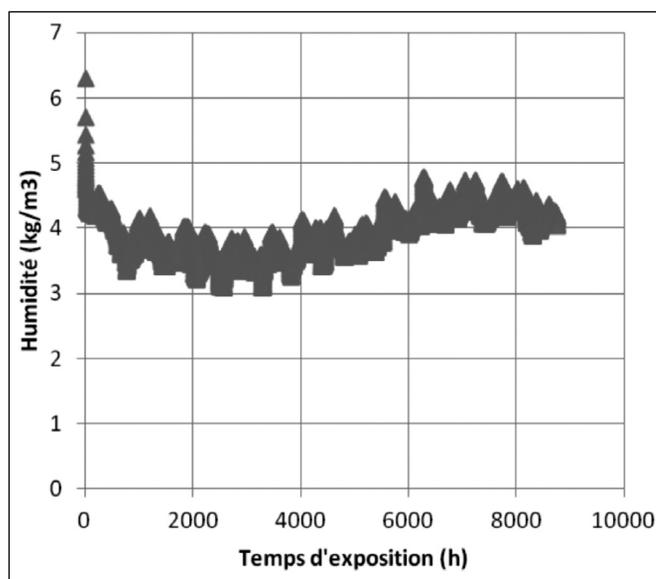


Figure 5 : Variation de l'humidité de la couche de plâtre à Brest - durée une année débutant le 1^{er} octobre (enduit C4 et enduit mesuré)

5.2. Influence des climats

On a refait ces calculs dans les différents climats. Sur le tableau 5 ci-dessous on trouve par enduit :

- la concentration moyenne maximale d'humidité du mur (kg/m^2) au cours d'un an.
- la concentration maximale d'humidité de l'enduit (kg/m^3) au cours d'un an.
- le flux d'eau annuel global qui traverse la surface extérieure (en kg/m^2) par capillarité liquide et par diffusion vapeur. Quand le signe est positif, l'eau entre dans le mur qui se mouille. Quand il est négatif, elle sort du mur qui sèche. On calcule aussi la somme des deux flux. Cette somme correspond à la prise (ou perte) d'humidité sur un an sur cette face.

Avec l'enduit mesuré, l'humidité du mur reste faible en toute situation. Elle est égale à $2,04 \text{ kg/m}^2$, qui est l'humidité initiale. À l'exception de l'enduit mesuré, la concentration d'humidité de l'enduit atteint souvent la saturation. Avec l'enduit mesuré, le risque de formation de mousse reste donc faible. Il semble plus important avec les autres. On peut comparer les concentrations maximales d'humidité. Quelle que soit la qualité de l'enduit, l'humidité du mur reste faible à Marseille ($< 2,77 \text{ kg/m}^2$ avec l'enduit C4). Ce n'est pas le cas dans les autres sites où le rôle de l'enduit devient beaucoup plus important.

On peut distinguer différentes situations :

- le total des deux flux annuels est négatif. Les pertes par diffusion sont plus élevées que l'apport de la pluie par capillarité sur la face extérieure. Cette situation est très avantageuse car le mur peut sécher uniquement par sa face extérieure. Cette situation est observée en tout lieu avec l'enduit le plus efficace (enduit mesuré). Pour les enduits W1 et W2, cette situation n'est observable qu'à Marseille.
- le total des deux flux est positif et limité. Dans ce cas, le mur mouillé ne sèche pas uniquement par l'extérieur. Il doit aussi sécher partiellement par l'intérieur de façon complémentaire. Cette situation pourrait devenir critique si on limite l'évaporation intérieure et si l'apport d'humidité interne était lui-même élevé. Le risque de corrosion ou de pourriture des matériaux à l'intérieur deviendrait plus important.
- le total des deux flux est positif et élevé. Dans ce cas, le mur n'a plus la possibilité de sécher complètement l'été et l'humidité s'accumule année après année, ce qui peut mener au désastre. Ce cas catastrophique n'a pas été mis en évidence dans les conditions environnementales étudiées.

Il faut noter par ailleurs que les résultats calculés sont un peu pessimistes par rapport à la réalité car ils ne tiennent pas compte de la résistance hydrique à l'interface enduit / brique qui n'a pas été introduite dans le modèle.

Si on compare les stations entre elles, Marseille est, bien sûr, dans les conditions les moins sévères. Sous l'aspect flux total, Paris est dans une position intermédiaire, bien que momentanément l'humidité du mur puisse être assez élevée. Sous l'aspect flux total, Brest semble un peu plus sévère que Pontarlier (sauf pour l'enduit W2). En fait on a examiné une façade SW. À Brest, la pluie est plus impor-





<i>Mur avec l'enduit mesuré</i>	Marseille	Paris	Pontarlier	Brest
Concentration max. d'humidité du mur (kg/m ²)	2,04	2,04	2,05	2,04
Concentration max. d'humidité de l'enduit (kg/m ³)	29,5	47,26	41,97	47,22
Flux annuel entrant par capillarité coté ext. (kg/m ²)	0,73	2,43	2,51	2,68
Flux annuel sortant par diffusion coté ext. (kg/m ²)	-2,19	-3,67	-4,06	-3,67
Total des deux flux	-1,47	-1,25	-1,56	-1

<i>Mur avec l'enduit W2</i>	Marseille	Paris	Pontarlier	Brest
Concentration max. d'humidité du mur (kg/m ²)	2,4	5,9	5,4	5,4
Concentration max. d'humidité de l'enduit (kg/m ³)	121	148	148	147
Flux annuel entrant par capillarité coté ext. (kg/m ²)	8,6	19,4	21,3	22,1
Flux annuel sortant par diffusion coté ext. (kg/m ²)	-10	-18,7	-19,4	-20,6
Total des deux flux	-1,14	0,43	1,85	1,5

<i>Mur avec l'enduit W1</i>	Marseille	Paris	Pontarlier	Brest
Concentration max. d'humidité du mur (kg/m ²)	2,77	7,73	6,55	7,4
Concentration max. d'humidité de l'enduit (kg/m ³)	112	152	151	151
Flux annuel entrant par capillarité coté ext. (kg/m ²)	12,1	19,8	22,31	23,84
Flux annuel sortant par diffusion coté ext. (kg/m ²)	-12,5	-19,14	-20,54	-22
Total des deux flux	-0,42	0,78	1,76	1,83

<i>Mur avec l'enduit Meruc C4</i>	Marseille	Paris	Pontarlier	Brest
Concentration max. d'humidité du mur (kg/m ²)	2,77	9,59	6,9	7,9
Concentration max. d'humidité de l'enduit (kg/m ³)	112	153	143	145
Flux annuel entrant par capillarité coté ext. (kg/m ²)	12	19,5	21,1	22,7
Flux annuel sortant par diffusion coté ext. (kg/m ²)	-12,8	-18,3	-19,5	-20,7
Total des deux flux	-0,84	1,22	1,59	1,99

Tableau 5 : Comparaison de différents sites (quatre différents capillarités, $\mu = 17$)

tante au NW et l'insolation est plus faible. La façade NW à Brest sera donc dans des conditions plus sévères.

6. INFLUENCE DE LA RÉSISTANCE À LA VAPEUR D'EAU DE L'ENDUIT

On a refait les calculs avec des résistances à la vapeur correspondant à l'étendue observée sur des enduits. Le calcul a été effectué dans les conditions les plus humides de Brest sur l'enduit mesuré et sur l'enduit W1.

La valeur de μ a varié de 10 à 35 (référence précédente 17). Les résultats sont donnés au tableau 6 ci-dessous.

Avec l'enduit W1, le flux qui sort par diffusion gazeuse baisse significativement avec l'augmentation de μ . Par contre, on voit aussi que la pénétration de l'humidité se fait partiellement par diffusion. Elle diminue quand μ augmente. Globalement, le flux total après un an n'augmente que de façon limitée (+47%) quand μ varie de 10 à 35.

On voit que la résistance à la vapeur n'a qu'un effet limité sur l'humidité du mur. Quand μ diminue, c'est à la fois la pénétration d'humidité et l'évaporation qui diminuent. Finalement les deux phénomènes se compensent partiellement et diminuent l'influence du paramètre μ .

Avec l'enduit mesuré, les quantités d'eau en jeu sont très faibles. La valeur de μ n'a presque plus d'influence sur l'humidité du mur.

7. INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ SUR LA RÉSISTANCE THERMIQUE DU MUR

L'humidité augmente la conductivité thermique du tesson. On connaît mal cette augmentation de la conductivité de la terre cuite avec l'humidité car elle a été peu mesurée. Si on suppose que la conductivité du tesson varie de 0.5W/m.K à l'état sec à 1.3W/m.K à saturation (320 kg/m³), variation





<i>Mur avec l'enduit mesuré (Brest)</i>	$\mu = 10$	$\mu = 17$	$\mu = 25$	$\mu = 35$
Concentration max. d'humidité du mur (kg/m ²)	2,04	2,04	2,04	2,04
Concentration max. d'humidité de l'enduit (kg/m ³)	47,8	47,2	47,3	47,7
Flux annuel entrant par capillarité coté ext. (kg/m ²)	2,64	2,68	2,7	2,7
Flux annuel sortant par diffusion coté ext. (kg/m ²)	-3,68	-3,67	-3,63	-3,57
Total des flux (kg/m ²)	-1,05	-1	-0,94	-0,88

<i>Mur avec l'enduit W1 (Brest)</i>	$\mu = 10$	$\mu = 17$	$\mu = 25$	$\mu = 35$
Concentration max. d'humidité du mur (kg/m ²)	7,1	7,14	7,17	7,19
Concentration max. d'humidité de l'enduit (kg/m ³)	151	151,8	151,8	151,4
Flux annuel entrant par capillarité coté ext. (kg/m ²)	27,53	23,84	20,92	18,3
Flux annuel sortant par diffusion coté ext. (kg/m ²)	-26,0	-22	-18,86	-16,07
Total des flux (kg/m ²)	1,51	1,83	2,06	2,22

Tableau 6 : Influence du facteur μ de résistance à la vapeur

donnée dans la base de données de Wufi, on peut alors calculer la valeur du coefficient de transfert thermique U du mur en conditions statiques à différents niveaux d'humidité. Dans les normes, on le calcule généralement quand le mur est sec et quand le mur a l'humidité w_{80} . Ce calcul statique est cependant peu réaliste car les concentrations d'humidité varient selon le temps et la profondeur dans le mur et peuvent être plus élevées que w_{80} .

De façon plus proche de la réalité, on peut aussi calculer la moyenne des valeurs de U en conditions dynamiques à partir des résultats de Wufi. On peut calculer $R = \Delta T/Q$ avec ΔT valeur moyenne mensuelle des différences de température entre l'intérieur et l'extérieur

Q valeur moyenne du flux thermique mensuel à travers la surface intérieure

On a donc calculé de cette façon la valeur de U dynamique avec un mur entièrement sec puis avec un mur réel protégé par les enduits précédents à Brest.

On obtient les résultats suivants :

Dans le calcul statique, la valeur de U augmente avec l'humidité d'environ 25% (équilibre avec RH=80%). Cette augmentation est importante et dépend de la variation de la conductivité thermique du tesson, de la brique et de l'enduit avec l'humidité.

En calcul dynamique, on observe que le coefficient U dynamique du mur sec est un peu plus élevé que le coefficient U statique (+4%), lié aux différents modes de calcul. On voit aussi que la valeur de U varie significativement en

fonction de l'enduit. Elle peut être plus grande (+33%), ce qui est désastreux pour les propriétés thermiques du mur. Mais elle est beaucoup plus faible avec l'enduit mesuré (+10%). Il est donc très important que le mur de brique Monomur soit protégé par un très bon enduit sous l'aspect hydrique (W2 ou mieux) à Brest.

On voit donc que l'humidité a une forte influence pratique sur l'isolation thermique du mur, et ceci bien avant qu'on observe l'apparition d'humidité à l'intérieur et a fortiori une dégradation du mur. L'enduit a donc une influence importante sur les pertes thermiques du mur.

8. CONCLUSIONS

De cette étude, on peut tirer différentes conclusions :

- Les murs enduits sont humidifiés par les pluies et sèchent à la suite. Quand la pluie est très forte, la couche d'enduit se sature et l'enduit n'est plus capable d'absorber de l'eau qui dégouline donc au pied du mur. Quand les pluies sont faibles mais fréquentes, l'eau peut être absorbée entièrement et stockée dans le mur.
- On voit donc que le climat le plus pénalisant n'est donc pas le climat où les précipitations sont les plus importantes en quantité, mais plutôt les climats humides qui ne permettent pas au mur de sécher rapidement. Un petit nombre de fortes précipitations apporte moins d'humidité qu'un grand nombre de petites pluies.

	Unité	Calcul statique		Calcul dynamique avec Wufi				
		Mur sec	Mur 80% RH	Mur sec	Mur enduit E. mesuré	Mur enduit W2	Mur enduit W1	Mur enduit C4
U	W/m ² .K	0,345	0,435	0,36	0,395	0,46	0,47	0,48
U/U _{sec}	%	100	125	100	110	127	131	133

Tableau 8 : Influence de l'enduit sur la valeur U du mur





- Parmi les climats étudiés, celui de Brest est le plus pénalisant.
- Dans les conditions les plus sévères de Brest, les murs de brique Monomur restent bien secs quand l'enduit de protection est de qualité, correspondant à la qualité W2 ou mieux à la norme DIN.
- Avec les enduits de meilleure propriété capillaire, les propriétés thermiques du mur ne sont pour ainsi dire pas affectées car il reste bien sec.
- Avec les autres enduits de plus grande capillarité, le mur devient plus humide mais l'humidité ne traverse généralement pas le mur et n'apparaît pas à l'intérieur.
- Quand l'enduit est de qualité plus médiocre en termes de capillarité, les prises d'humidité sont beaucoup plus grandes. Dans ce cas les propriétés thermiques réelles sont très affectées et la valeur du coefficient de transfert U peut augmenter de plus de 30% par rapport à la valeur sèche.
- La résistance à la diffusion de la vapeur de l'enduit a une influence limitée sur l'humidité du mur, dans les gammes examinées, et plus faible que le taux d'absorption initiale.
- Si les enduits les moins capillaires sont nécessaires à Brest, ils le sont moins dans des expositions moins humides, comme à Marseille où des enduits de qualité capillaire plus faibles sont utilisables.
- Pour les conditions climatiques humides, les briquetiers devraient recommander l'emploi d'enduits à faible capillarité pour les murs de briques Monomur de façon à toujours conserver la résistance thermique initiale. On peut imaginer des résultats similaires pour les murs en béton cellulaire.
- Météo France devrait livrer des données détaillées de climatologie à des prix acceptables pour des calculs plus réalistes des transferts dans le bâtiment.
- Les fabricants d'enduit devraient développer dans les normes des classes de qualité supérieures à W2 puisque cela est utile et qu'ils semblent capables de les produire. Ils devraient de plus fournir des données plus extensives sur les propriétés hydriques de façon à permettre des calculs plus précis.





APPLICATION DE LA POLARISATION AU DÉCOFFRAGE DES ÉLÉMENTS EN BÉTON - ÉTUDE DE FAISABILITÉ

N. GOUDJIL^{*,1}, Y. VANHOVE^{*,2}, C. DJELAL^{*,3}, H. KADA^{*,4}

¹ Docteur des Universités, goodjilnassi@yahoo.fr

² Professeur des Universités, yannick.vanhove@univ-artois.fr

³ Professeur des Universités, chafika.dantec@univ-artois.fr

⁴ Maître de conférences, hassina.benameur@univ-artois.fr

* Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), PRES, Université de Lille Nord de la France (EA 4515), IUT, 1230 rue de l'université, 62400 Béthune CEDEX

1. INTRODUCTION

Les produits de démoulage utilisés à l'heure actuelle sont peu compatibles avec l'environnement. De plus, ils provoquent des désagréments auprès des utilisateurs (irritations de la peau, pathologies respiratoires...etc). Ces pathologies sont reconnues comme maladies professionnelles (Courtois *et al.*, 2007). Cette étude propose la substitution de ces produits par un procédé de décoffrage basé sur l'électro-osmose. Le procédé mis au point utilise les propriétés de la double couche électrique formée au contact des particules fines chargées électriquement avec l'eau et permet ainsi de créer une migration de l'eau dans le béton frais. Le principe consiste à appliquer un potentiel électrique dans le béton frais qui attire les cations vers la cathode et les anions vers l'anode. Au moment où les cations migrent vers la cathode (le coffrage), ils entraînent une partie de l'eau interstitielle avec eux. Ils créent ainsi un mouvement de l'eau en direction de la cathode. Ce phénomène a été mis en évidence en 1952 par Casagrande qui a déterminé la loi du déplacement de l'eau dans un terrain argileux. Ce procédé a été également utilisé pour les sols par Mitchell (1979) et Camberfort (1961) et plus récemment par Djelal (1991) pour lubrifier une paroi au cours de

l'extrusion des pâtes d'argile. Ce nouveau procédé de décoffrage devra être en mesure d'assurer la formation d'un film d'eau à l'interface béton/coffrage, créant ainsi un écran capable de séparer le béton du coffrage et d'obtenir un bel aspect des parements (parements sans bullage ni différence de teinte). Pour parvenir à ces objectifs plusieurs étapes ont été nécessaires dont l'étude de la faisabilité de la technique. Un dispositif expérimental a permis de quantifier l'eau transportée en fonction de la tension appliquée et de sa durée d'application. Les paramètres influant la qualité des parements et le décoffrage ont été étudiés en employant des moules de 30×30×30 cm³. La technique a été ensuite transposée in-situ. L'ensemble des essais ont été réalisés à une température de 20±2°C. Le procédé a donné lieu à un brevet déposé par la société Outinord.

2. MATÉRIAUX

Couramment utilisé sur chantier, le béton étudié appartient à la classe C25/30. Ce dernier est fabriqué à base d'un ciment CEM III 42.5 N qui valorise les parements grâce à sa couleur claire. L'ajout de cendres volantes (éléments fins) permet d'en améliorer la qualité. Le tableau 1 pré-





sente la quantité des différents constituants pour 1m³ de béton :

Constituants	Quantités
Ciment CEM III A 42.5 N (Kg)	280
Cendres volantes (Kg)	45
Sable 0/4 (Kg)	863
Gravillon 4/12. (Kg)	291
Gravillon 11.2/22.4 (Kg)	641
Eau (Kg)	185
Plastifiant réducteur d'eau (%)	1.75
E/ (Ciment+Cendres)	0.57
G/S	1.08
Volume de pâte (%)	30

Tableau 1 : Formulation du béton

Un malaxeur de type DIEM DZ 120V, équipé de pales permettant d'optimiser le malaxage a été utilisé pour la fabrication des bétons. Le mode de malaxage est le suivant :



Ce mode de malaxage est conforme à la norme NF P 18-404. Afin d'éviter toute altération des caractéristiques rhéologiques du béton, après le malaxage des gravillons et du sable (secs) et l'ajout d'un quart de l'eau, un temps d'arrêt de 15 mn (pré mouillage) a été observé avant la relance du malaxage.

A la fin du malaxage, chaque béton fabriqué est soumis au test du cône d'Abrams suivant la norme NF P18-451 dans le but de vérifier son ouvrabilité. Les résultats montrent que tous les bétons fabriqués présentent un affaissement de 12±2 cm (bétons très plastiques).

3. ÉTUDE DE FAISABILITÉ DU PROCÉDÉ

Le manque d'informations sur le comportement du béton frais soumis à un champ électrique a nécessité la réalisation d'essais préliminaires en laboratoire afin d'étudier la faisabilité de ce procédé. La première partie des essais consiste à déterminer la quantité minimale d'eau qui doit être présente à l'interface pour assurer un décoffrage aisé et un parement de bonne qualité. Le transport de l'eau sous l'effet de la polarisation dans le béton frais est étudié pour différentes tensions électriques.

La seconde partie de cette étude de faisabilité consiste à déterminer le temps de début de prise du béton. Afin de perturber le moins possible les réactions d'hydratations, le courant doit être appliqué avant le début de prise. Des essais de conductivité ont été nécessaires afin de déterminer le moment de la fin de la période latente.

3.1. Détermination du début de la prise

Afin de perturber le moins possible les réactions d'hydratation du béton, il est nécessaire de débiter la polarisation de l'échantillon avant la fin de la période latente qui correspond au début de prise chimique du béton. Avant de commencer les essais de décoffrage, des essais de caractérisation de la cinétique d'hydratation ont été réalisés. Le temps de début de prise est déterminé à l'aide d'un calorimètre isotherme couplé à un conductimètre/résistimètre type CDM210 (Figure 1). Le dispositif est composé d'un porte échantillon constitué de deux échangeurs régulés qui, une fois rassemblés, permettent d'accueillir une éprouvette en carton de 11×22 cm² et d'une chaîne d'acquisition qui permet de réaliser les mesures.

Le béton est introduit en deux couches dans l'éprouvette en carton. Pour avoir une bonne compacité, chaque couche de béton est piquée 25 fois selon la norme NF P 18-451. Une sonde de conductivité est placée au milieu de l'éprouvette pour le suivi de la conductivité électrique. L'enregistrement

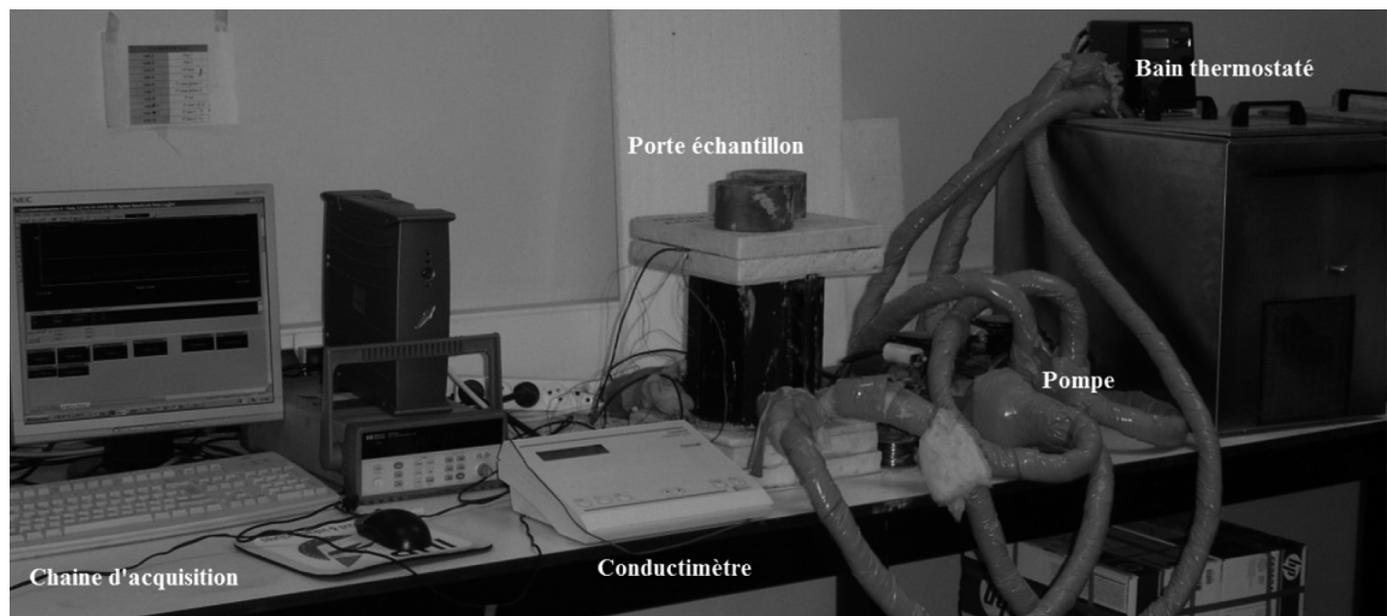


Figure 1 : Calorimètre isotherme





s'effectue toutes les 5 minutes. Les résultats obtenus sont représentés Figure 2.

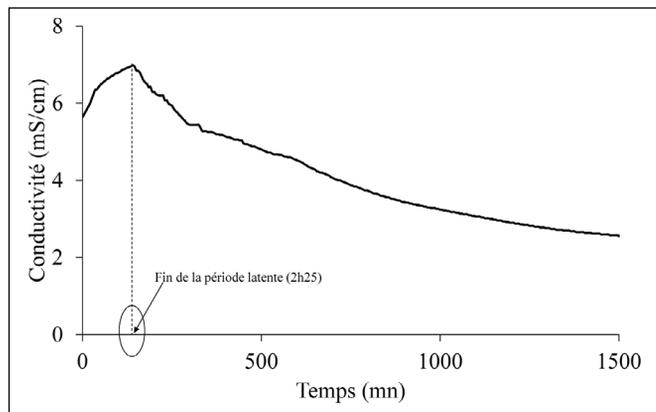


Figure 2 : Variation de la conductivité en fonction du temps

Deux périodes sont observées :
 Période 1 : période latente (de 0 à 2h25) ; augmentation de la conductivité due à la dissolution des anhydres du ciment dans la solution aqueuse interstitielle du béton.

Période 2 : Au-delà de la fin de la période latente la sursaturation en chaux entraîne la précipitation de la portlandite. S'ensuit une baisse brutale de la concentration en Ca^{2+} et OH^- et donc de la conductivité : c'est le temps de début de prise chimique. Avec la précipitation de la portlandite, les réactions du silicate tricalcique s'accélèrent. Un régime de dissolution-précipitation s'instaure, la totalité des ions dissous étant consommée, les réactions d'hydratations s'accélèrent rapidement et la conductivité baisse. Le courant est donc appliqué durant les 2h25 qui suivent le premier contact eau/ciment.

3.2. Etude du déplacement de l'eau interstitielle sous l'effet d'un champ électrique

Le dispositif mis en place pour étudier le transport de l'eau sous l'effet de la tension (Figure 3) est composé :
 - d'un moule cylindrique isolant en PVC (16x12 cm²) où le béton à tester est mis en place. Ce moule est constitué

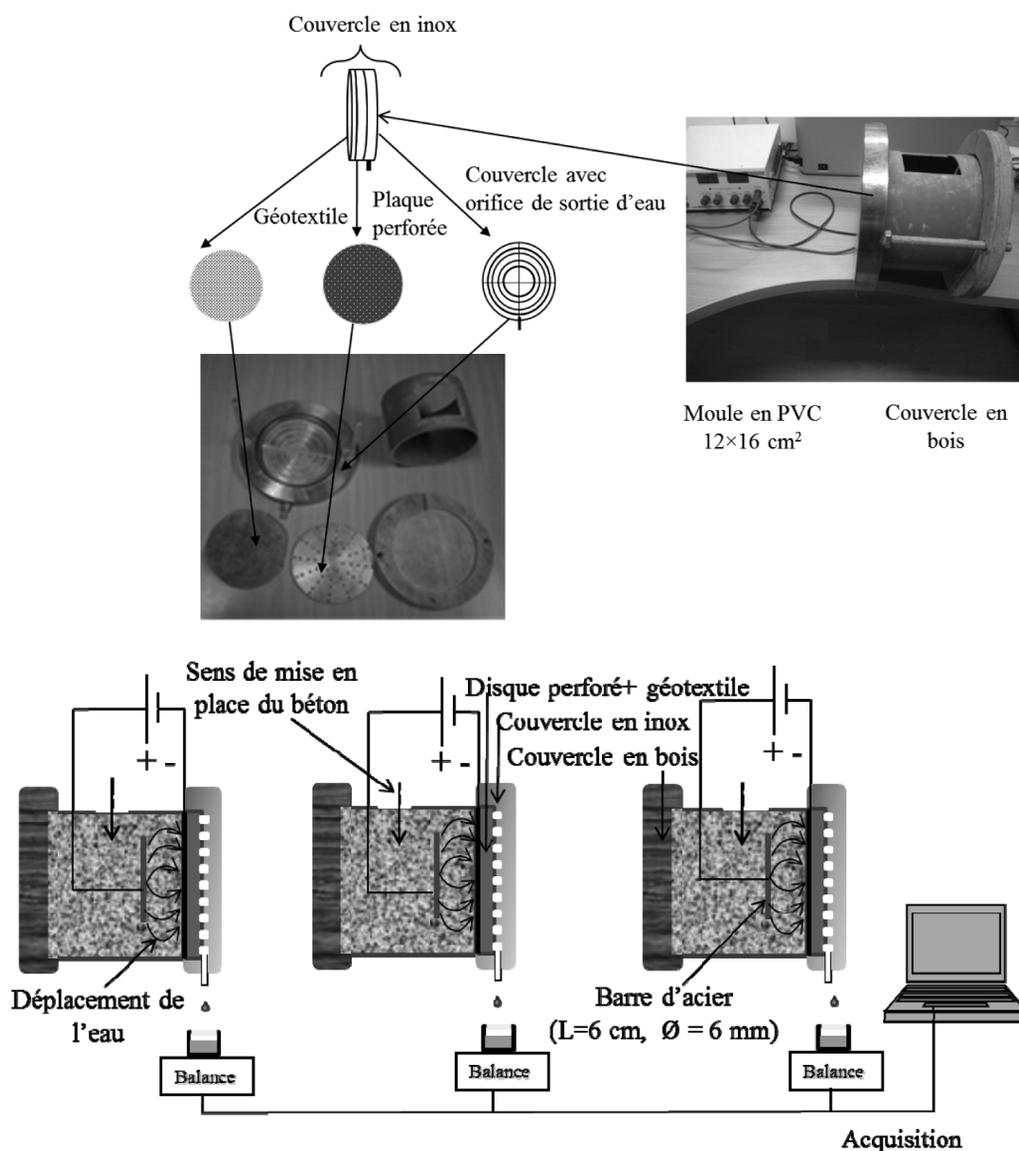


Figure 3 : Dispositif expérimental





de deux couvercles : le premier en bois et le second en inox avec un orifice de sortie d'eau. Un disque perforé muni d'une toile (maille 80 m) est placé dans le couvercle en inox afin de filtrer l'eau transportée

- d'un générateur réglé en courant continu
- d'un ordinateur pour l'acquisition des données
- d'une balance

Pour vérifier la répétabilité des résultats, trois dispositifs sont utilisés simultanément. L'ensemble des essais a été réalisé à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Le béton est introduit dans les moules en trois couches successives. Chaque couche de béton est piquée 25 fois pour obtenir un compactage optimum selon la norme NF P 18-451. Après la mise en place de la première couche, une barre d'acier d'une longueur de 6 cm et d'un diamètre de 6 mm est placée dans le béton à une distance de 5 cm du disque (enrobage maximal). Le reste du béton est ensuite introduit dans les moules en deux couches. La barre d'acier est reliée au pôle positif et le disque au pôle négatif du générateur. Les essais ont été réalisés pour sept tensions différentes (avec $V1 < V2 < V3 \dots < V7$). Pour chaque essai, la tension est appliquée au même instant à l'ensemble des moules. L'enregistrement de la masse d'eau transportée débute en même temps pour tous les moules (après la fin de la mise en place du béton dans les moules : 10 mn après le premier contact eau/ciment). Au niveau de chacun des moules, la masse d'eau cumulée (m_1) (qui est la même pour les trois moules) représente la somme de l'eau transportée sous l'effet de la gravité (m_2) et la masse d'eau transportée sous l'effet du potentiel électrique (m_3). Aucune tension n'étant appliquée, la masse d'eau transportée sous l'effet de la gravité a été préalablement quantifiée. Il en résulte : $m_3 = m_1 - m_2$. Les résultats sont donnés Figure 4.

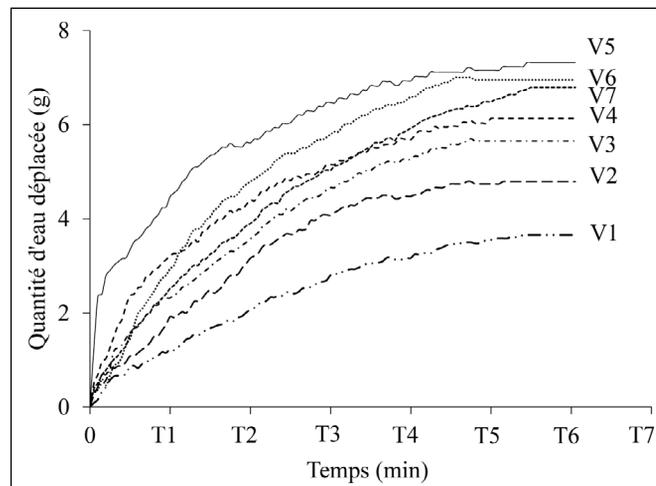


Figure 4 : Variation de la masse d'eau cumulée en fonction du temps

Les résultats montrent que toutes les courbes de la Figure 4 présentent la même allure. Dès la mise sous tension, l'eau commence à migrer vers la cathode. Le suivi de la masse d'eau transportée a été effectué jusqu'à sa stabilisation (soit au temps T6). La vitesse d'écoulement diminue en fonction du temps pour atteindre une valeur nulle. Cette diminution de l'écoulement de l'eau s'explique par la diminution progressive de la quantité d'eau libre dans le milieu.

Pour des valeurs de tensions qui varient entre V1 et V5, la quantité d'eau cumulée augmente avec la tension. Ce phénomène est lié à l'augmentation du nombre d'ions en déplacement. Par contre, pour des valeurs de tension supérieures à V5, la quantité d'eau cumulée diminue en fonction de la tension. La baisse du débit d'eau pourrait être liée à la diminution du coefficient de perméabilité électro-osmotique. Ce coefficient est une caractéristique intrinsèque du béton et a un effet sur le transport d'eau dans les milieux poreux. En effet, la diminution du coefficient de perméabilité entraîne une chute du débit provoquant ainsi une baisse de la quantité d'eau (Lesoin, 1997). Afin d'étudier l'effet de la tension sur le transport de l'eau, le coefficient de perméabilité (K_e) a été calculé à partir de la loi de Casagrande :

$$K_e = \frac{Qe}{\left(\frac{\Delta V}{\Delta L}\right) A}$$

Q_e : débit (m^3/s)

ΔV : différence de potentiel (V)

ΔL : distance parcourue par l'eau (distance entre l'anode et la cathode : 5 cm)

A : Section apparente ($A = \pi r^2$) (m^2)

Les résultats obtenus sont donnés Figure 5.

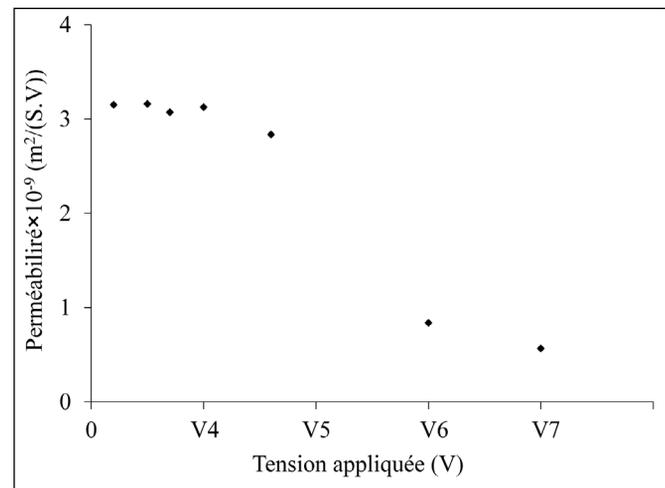


Figure 5 : Variation de la perméabilité électro-osmotique en fonction de la tension

Il apparaît que pour des valeurs de tension inférieures à V4 la valeur de la perméabilité électro-osmotique du béton est constante. Pour une tension V5, une légère diminution de la perméabilité électro-osmotique (modification de la microstructure granulaire) est observée mais elle n'a pas d'influence sur le débit d'eau. Entre V1 et V5 la quantité d'eau augmente en fonction de la tension (cf. Figure 4). La modification de la microstructure s'amplifie et devient importante pour des valeurs de tensions supérieures à V5. Le nombre d'ions en déplacement est beaucoup plus important, ce qui peut engendrer un déplacement important des éléments fins. Le coefficient de perméabilité dépendant en grande partie de la structure du matériau (microstructure, arrangement des particules individuelles et macrostructure) (Lambe *et al.*, 1969), ce transport d'éléments fins engendre donc une diminution du coefficient de per-





méabilité et par conséquent une baisse de la quantité d'eau transportée.

Ces essais ont permis de vérifier et d'étudier le déplacement de l'eau dans le béton frais sous l'effet de la polarisation. La seconde partie consiste à étudier la capacité de cette eau déplacée à assurer un décoffrage aisé et une bonne qualité des parements. Afin de ne pas perturber le béton, seules les tensions qui ont permis un transport d'eau sans aucune modification de la microstructure du béton (soit entre V1 et V4) seront étudiées.

4. ESSAIS DE DÉCOFFRAGE

Afin d'éviter la corrosion, les moules utilisés ($30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$) lors des essais de décoffrage sont en inox. Le but de ces essais est de déterminer et d'optimiser les paramètres influant la qualité des parements et du décoffrage.

Le principe consiste à appliquer un courant entre le ferrailage en forme de H ($\phi = 6 \text{ mm}$) placé à 5 cm de la paroi du moule (enrobage maximal) et une seule paroi du moule (Figure 6). Les deux autres parois ont été huilées avec une huile végétale qui ne présente aucun risque pour les utilisateurs et pour l'environnement. La quatrième paroi est utilisée en l'état (non polarisée et non huilée).

Dans un premier temps, pour assurer un décoffrage sans arrachement du béton, une quantité d'eau maximale, tout en évitant de perturber la microstructure du béton, est

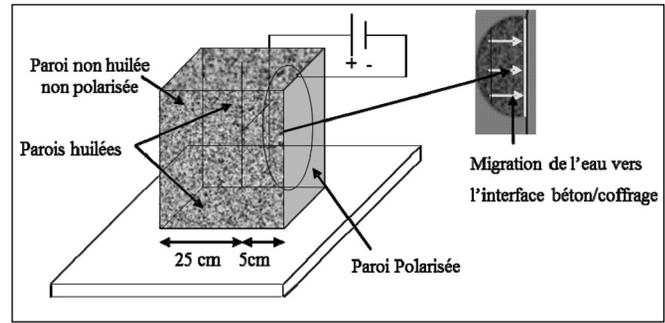


Figure 6 : Principe de polarisation sur les moules de $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$

transportée au niveau de l'interface béton/coffrage. A cet effet, une tension V4, est appliquée 1h après le premier contact eau/ciment, durant un temps T6 (Cf. Figure 4). Les résultats sont donnés Figure 7.

Les parois huilées ont été décoffrées aisément. On remarque néanmoins un poussérage sur les parois du moule et de celles des blocs en béton. La paroi non huilée et non polarisée a donné lieu à un décoffrage difficile et à un arrachement important du béton.

La paroi polarisée a quant à elle permis un décoffrage aisé mais la qualité des parements n'est pas satisfaisante. En effet, le bloc de béton revêt une couche d'éléments fins (poussérage important) et la paroi du moule présente un fort encrassement. Ces défauts auraient peut-être pour origine un surplus d'eau à l'interface béton/coffrage. Pour

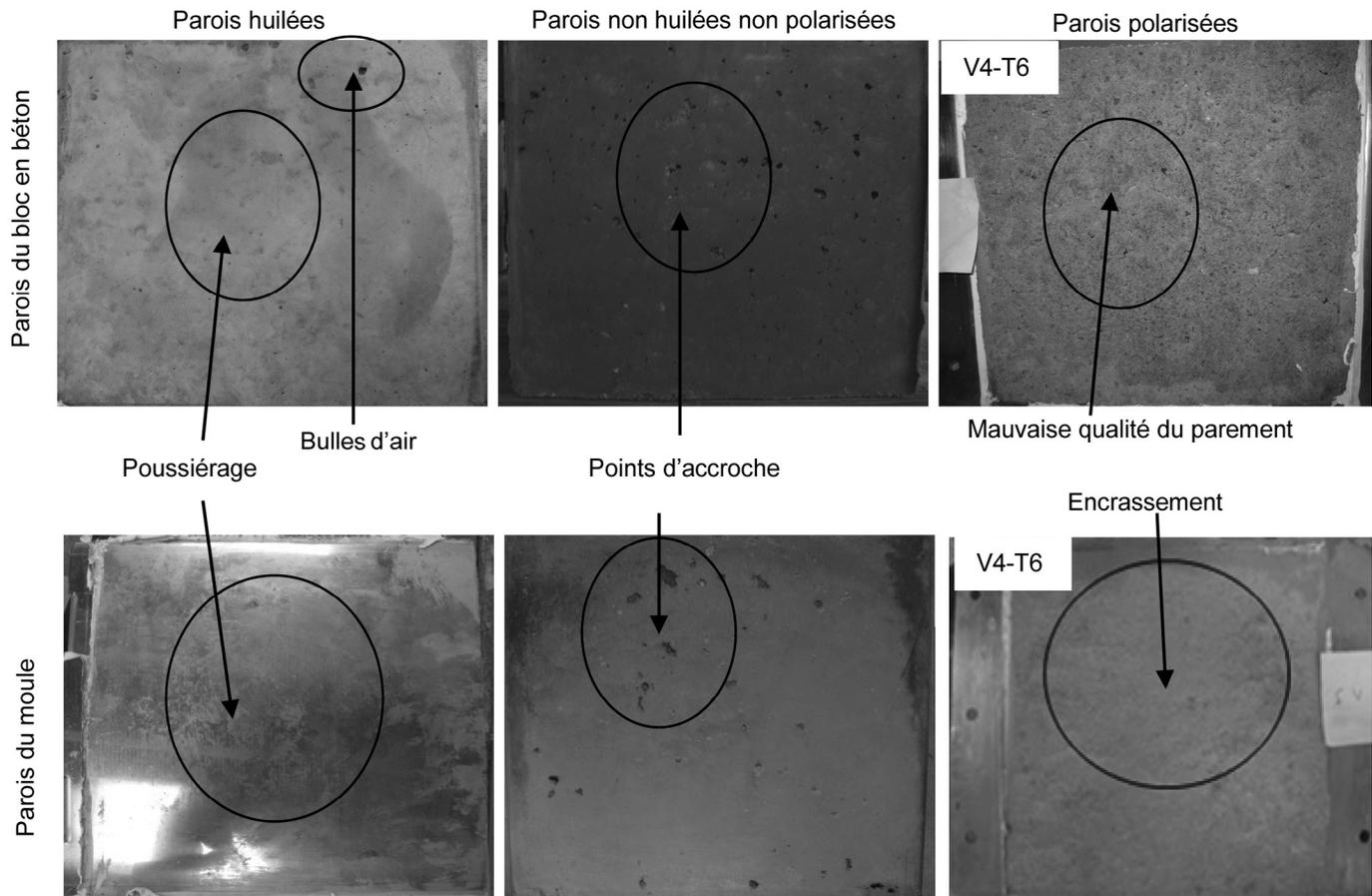


Figure 7 : Qualité des parois du moule et de celles du bloc en béton





vérifier cette hypothèse, il y a lieu de diminuer la quantité d'eau en diminuant soit la durée de polarisation soit la valeur de la tension appliquée. La deuxième solution a été choisie. Il a été décidé d'appliquer les tensions les plus petites possibles pour éviter le risque de la modification de la microstructure du béton. Dans les mêmes conditions que précédemment l'expérience a donc été refaite avec une tension V3 au lieu V4 ($V3 < V4$). Les parements obtenus sont représentés Figure 8.

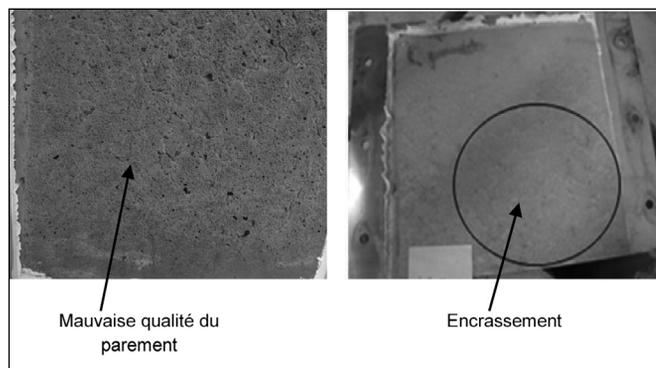


Figure 8 : Qualité de la paroi du moule et de celle du bloc en béton (V3-T6)

La couche d'éléments fins et l'encrassement sont toujours présents mais ce dernier est moins important que celui observé précédemment. Cela confirme que l'encrassement est bien dû à un surplus d'eau. Ces résultats permettent d'affirmer que les paramètres influant la qualité des parements et du décoffrage sont ceux qui déterminent le transport de l'eau à savoir la valeur de la tension appliquée et sa durée d'application.

L'optimisation de la qualité des parements a été réalisée en diminuant la quantité d'eau transportée à l'interface béton/coffrage. En effet, la diminution de la valeur de la tension et de la durée de son application ont permis progressivement d'améliorer la qualité des parements et de diminuer l'encrassement. Les résultats ont montré qu'une tension V1 appliquée durant un temps T1 permet d'obtenir, en plus d'un décoffrage aisé, une bonne qualité des parements et la disparition totale de l'encrassement. Suite à ces résultats et afin d'étudier la possibilité de la transposition de la technique sur chantier, un essai in situ a été réalisé.

5. APPLICATION DE LA TECHNIQUE À L'ÉCHELLE RÉELLE - ESSAI IN SITU

Plusieurs essais in situ ont été réalisés dans une centrale fabriquant des bétons prêts à l'emploi (CEMEX). Les dimensions des coffrages en inox sont $2.4 \times 2.8 \times 0.18 \text{ m}^3$. Les deux parois ont été polarisées. La distance d'enrobage retenue est la plus petite couramment rencontrée sur chantier soit 2.5 cm (Figure 9). Un seul essai est présenté pour cet article.

La formulation est celle du béton testé en laboratoire. Afin de pouvoir couler le mur avec la même gâchée, une quantité de béton suffisante (1500 litres) a été fabriquée. Le béton est caractérisé par rapport à sa consistance (essai d'affaissement au cône d'Abrams). Le béton est de classe de consistance très plastique (14 cm d'affaissement). Il a été mis en place en 6 couches de 50 cm de hauteur, chaque

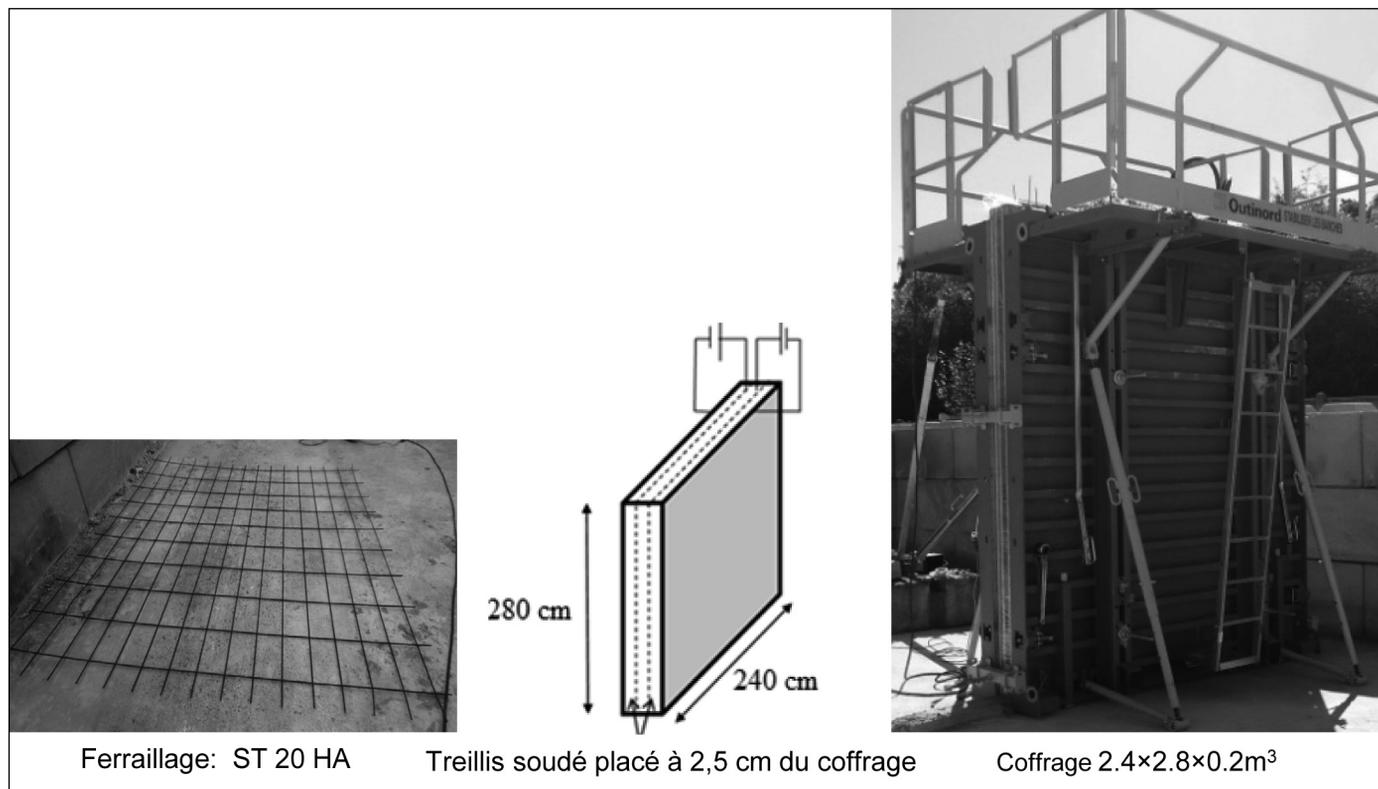


Figure 9 : Essai in-situ- coffrage et mise en place du ferrailage





couche du béton est vibrée avec une aiguille vibrante de 4 cm de diamètre.

La tension V1 est appliquée durant un temps T1 (Figure 10). Un suivi de la température a été réalisé tout au long de l'essai. La température entre le moment du coulage et la fin de la polarisation a varié entre 18 et 22°C.

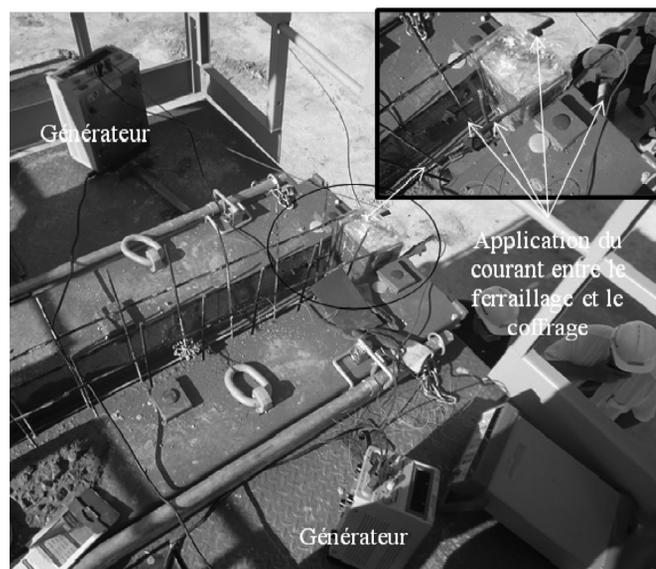


Figure 10 : Polarisation des parois du coffrage (essai in-situ)

Le décoffrage qui a eu lieu 24h après le coulage a été effectué sans problème. Les surfaces du voile sont de bonne qualité.

Pour vérifier la ségrégation du béton, quinze carottes ont été prélevées à différents points du voile. Chaque carotte a été découpée dans le sens longitudinal. La comparaison visuelle des différentes coupes a permis d'observer d'une part qu'aucune ségrégation liée à la mise en œuvre ne s'est produite et que d'autre part aucune désorganisation granulaire ou porosité liées à la polarisation ne sont à signaler.

6. CONCLUSION

Les travaux réalisés ont permis de prouver que ce procédé offre une possibilité de s'affranchir des produits de démoulage utilisés jusqu'alors et pallier ainsi leurs inconvénients. Les résultats ont montré que l'augmentation de la tension appliquée n'engendre pas nécessairement une augmentation de la quantité d'eau transportée. Au contraire, elle diminue au-delà de V5. La transposition de la technique in-situ a été réalisée avec succès. Les essais réalisés jus-

qu'alors l'ont été avec une formulation identique et pour une même température. Cela ne représente pas la réalité des chantiers. En effet, sur chantier, des bétons de différentes formulations sont coulés à différentes températures ambiantes. Les résultats obtenus ont montré que la qualité des parements dépend de la quantité d'eau présente à l'interface béton/coffrage. Cette quantité d'eau dépend de la tension appliquée mais aussi de la conductivité électrique du béton qui elle-même relève de plusieurs paramètres telles que la formulation du béton (Jolicœur *et al.*, 2000) et de la température ambiante (Saad, 1998). L'optimisation des paramètres de polarisation en fonction de la formulation du béton et de la température ambiante est donc nécessaire.

7. REMERCIEMENTS

Nous remercions le personnel de l'entreprise OUTINORD et plus particulièrement M. J-P Marin et M. N. Heloun pour les moyens mis à disposition. Nos remerciements vont aussi à l'ensemble du personnel de l'entreprise CEMEX particulièrement à M.J. Verhelst et à M.A. Bliez pour leur coopération.

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Courtois B., Serre P., produits de démoulage des bétons compositions, dangers, mesure, Aide-mémoire technique ED 6017, INRS Paris, 2007
- Cambeford H., Caron C., *Electro-osmose et consolidation électrochimique des argiles*, 1961.
- Djelal C., Analyse du phénomène de frottement des mélanges eau-argile concentrés contre des surfaces métalliques, Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 1991
- Goudjil N., « Développement d'un nouveau procédé de décoffrage basé sur la polarisation du béton – Etude de l'aspect des parements en béton », Thèse de doctorat, Université d'Artois, Janvier 2012.
- Jolicœur C., Khayat K., Pavate T., Pagé M., « Evaluation of effect of chemical admixture and supplementary cementitious materials on stability of cement-based materials using in-situ conductivity method », *The British Library*, 2000.
- Lambe T., Whitman R., *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc, 1969
- Mitchell J P., *Fundamentals of soil behavior*, John Wiley & Sons, Inc, USA, 1976
- Saad M., « Effect of temperature on electrical conductivity of blended cement pastes », *Ciment and Concrete Research*, 1998.





PÉRENNISATION DES OUVRAGES EN GÉNIE CIVIL : DIAGNOSTIC ET INSPECTION DES BÉTONS D'ÉGOUTS

Mehena OUALIT¹, Med Tahar ABADLIA¹, Raoul JAUBERTHIE²

¹Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement (URMPE), cité Frantz Fanon, 35000, Boumerdès, Algérie.
oualitmehenna@hotmail.com, abadlia_tahar@yahoo.fr

²Laboratoire de Génie Civil Génie Mécanique (Matériaux), (LGCGM) - INSA de Rennes, France.
raoul.jauberthie@insa-rennes.fr

1. INTRODUCTION

L'état des systèmes d'infrastructure urbains est devenu une préoccupation majeure dans le monde entier en raison du coût de maintenances et d'entretien. La durabilité des réseaux d'assainissement est d'une importance majeure, où la défaillance peut conduire à des problèmes de santé et peut provoquer des dommages importants.

Le béton est le matériau de construction le plus largement utilisé pour les structures d'égout. Toutefois, l'environnement dans certaines structures d'égout peut devenir très acide due à la formation de l'acide sulfurique H_2SO_4 converti à partir du sulfure d'hydrogène H_2S par l'action des bactéries. Des détériorations significatives du béton dans de pareils environnements ont été rapportées à travers le monde, à titre d'exemple, au Japon (T. Mori et al 1992), pays arabes du Golfe (H. Saricimen et M. Maslehuddin 1987), Allemagne (W. Sand et E. Bock), l'Afrique du Sud (J.L. Barnard).

Par ailleurs, La détérioration d'un système d'égout peut entraîner de graves problèmes tels que la perte de capacité de transport d'assainissement, contamination des sols et des eaux souterraines, des tassements du sol ainsi que des effondrements.

Des coûts très élevés sont impliqués dans la réparation de la détérioration des structures d'égout. Aux Etats-Unis, l'attaque à l'acide sulfurique est responsable de milliards de dollars de dommages aux conduites en béton des eaux usées et les systèmes de traitement (M.S. McGovern 1999). Dans l'état Australie du Sud à lui seul, un budget prévisionnel pour l'entretien des infrastructures des eaux usées existante est de 48 millions de dollars par an (W.F. Stewart 1999).

A l'état de Los Angeles, environ 10% des canalisations d'égouts sont soumises à une importante corrosion, et les coûts pour la réhabilitation de ces conduites sont à peu près estimé à 400 million € (Sydney et al. 1996). La restauration de l'ensemble des systèmes d'égouts endommagés en





Allemagne est estimée à environ 100 millions de dollars par an (Kaempfer et Berndt, 1998).

En collaboration avec la ville de Rennes et dans le cadre du management intégré des réseaux d'assainissement, des outils de gestion patrimoniale des réseaux, de suivi de leur fonctionnement et d'aide à la décision en matière d'entretien, de réhabilitation ou de renouvellement sont développés. Ces outils permettront à terme d'évaluer les performances des réseaux par types et, par exemple, de juger l'aptitude à l'emploi des produits en fonction des matériaux constitutifs des canalisations.

Ces outils sont basés généralement sur le recensement d'informations factuelles (caractéristiques réseaux, performances constatées, défauts identifiés, incidents...). Toutefois, le choix de certaines données dépend de la nature des produits et de leur comportement supposé (par exemple : fissuration, érosion, attaque de paroi...).

Ces outils ayant une fonction d'aide à la décision en matière de gestion patrimoniale, ils intègrent des modèles de dégradations (causes possibles pour une observation donnée, évolution possible dans le temps), qui prennent en compte, lorsque c'est pertinent, la nature des produits et notamment des tuyaux.

Cependant, l'objet de cette étude qui a été réalisée au laboratoire de génie civil, génie mécanique (LGCGM) de l'INSA de Rennes est uniquement consacré à l'échelle de matériau constitutif (béton) et nous ciblons sur des pathologies d'ordre chimique et d'abrasion dans le but d'identifier l'état et les facteurs responsables de la dégradation et de mettre en évidence les désordres du réseau d'assainissement à base cimentaire de la conduite de la rue « *BINQUENAIS* ». Cela afin de juger l'intensité de l'endommagement de la face interne et externe et formuler des recommandations vis-à-vis des futures inspections et d'analyser les modèles d'évaluation de ce tronçon et les processus identifiés de perte de performance appliqués aux tuyaux en béton.

2. ANALYSE MACROSCOPIQUE DES CONDUITES

2.1. Radier

On distingue sur la surface interne (Figure 1. a) un dépôt de matières organiques tout au long du radier avec des trous considérables due probablement à une mauvaise vibration du béton, alors que la surface externe (Figure 1. b) est plus ou moins rugueuse avec des pores visibles suite éventuellement au rapport E/C élevé. L'épaisseur de cette zone est estimée environ à 42,5mm avec des granulats de type siliceux.

2.2. Medium et le toit

Ces deux zones sont caractérisées par une grande érosion interne beaucoup plus intense en medium (Figure 1. a) avec une apparition flagrante des graviers, une pâte cimentaire complètement détériorée, emportée par le fluide. L'épaisseur est non homogène avec une épaisseur minimale au niveau de medium de 31,3mm et maximale avoisinant les 36 mm. L'épaisseur maximale du toit est de 39,8 mm.

3. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Pour cette étude, on a adopté le même Protocole expérimental que celui de (Meling et al 2009).

Le carottage des échantillons a été réalisé suivant les trois directions, longitudinale (L), transversale (T) et radiale (R), comme le montre la figure 2 et dans les trois zones : radier, medium et le toit comme s'est illustré dans la figure 3.

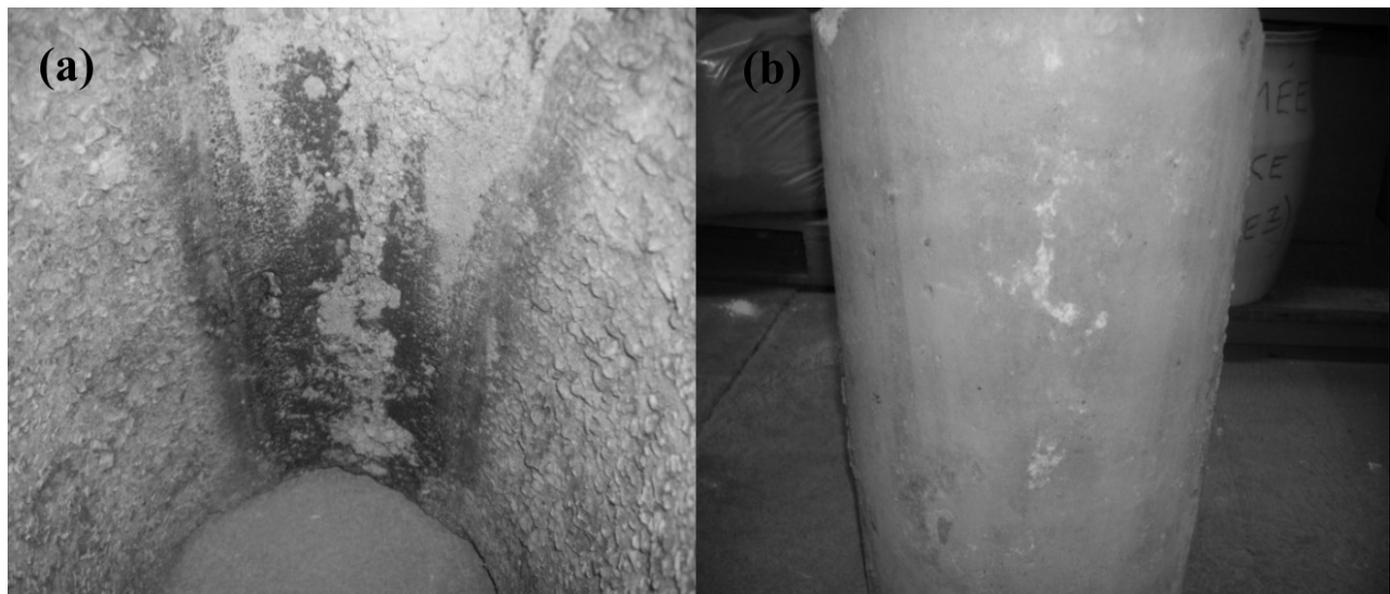


Figure 1. Vue globale des conduites avant le carottage



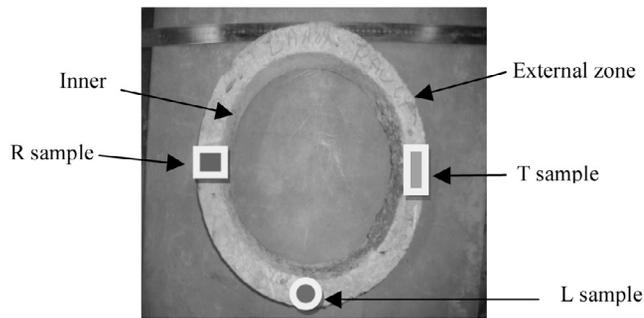


Figure 2. Les trois directions de découpage des échantillons.

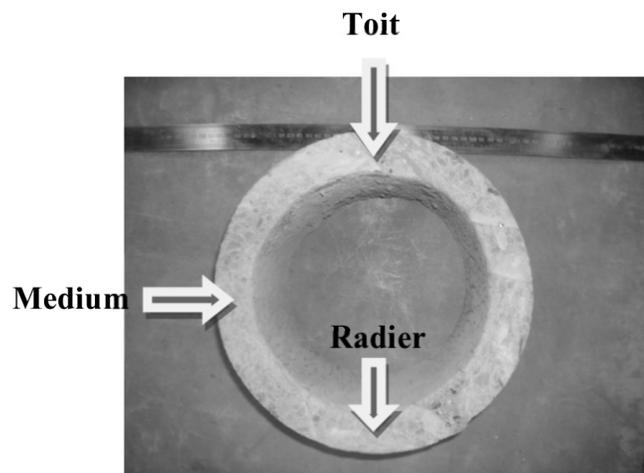


Figure 3. Les trois zones de découpage des éprouvettes (Radier, medium et le toit).

Ce choix nous permettra de mettre en évidence la dégradation causée par le milieu extérieur (sol), la dégradation due au fluide (effluents) et l'altération de la composition du béton lié aux granulats ainsi que la passivation des armatures ainsi que la profondeur des pathologies.

Les éprouvettes obtenues possèdent un diamètre $\varnothing = 28$ mm et un élancement $h = 1,5$. $\varnothing = 42$ mm, exception faite pour les éprouvettes découpées en position radiales (on est limité par l'épaisseur de la conduite). Les éprouvettes sont ensuite conservées dans une salle sèche avec une température de 25°C et 50% d'humidité jusqu'à l'obtention d'une masse constante avant d'entamer les différents essais de caractérisation.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

4.1. Caractérisation physique

4.1.1. Masse volumique apparente

Le tableau 1 présente les résultats des valeurs moyennes de la masse volumique apparentes des éprouvettes carottées

Conduite	Zone	Echantillon R	Echantillon L	Echantillon T
Rue Binquenais	Radier	2170	2185	2172
	Mi-hauteur	2095	2096	2193
	Toit	2056	2124	2186

Tableau 1. Valeurs moyennes de la masse volumique apparente en (Kg/m³).

dans les trois zones de la conduite (radier, medium et toit) et suivant la direction radiale (R), longitudinale (L) et transversale (T).

On remarque d'après ces résultats que les éprouvettes carottées dans la direction radiale de la conduites (face interne et externe incluses) notamment en medium et en toit présentent les plus faibles valeurs de masse volumique à cause de l'endommagement chimique et l'abrasion causé sur les deux faces exception faite aux échantillons du radier ce qui signifie que ce dernier n'a pas subi d'altération importante.

On note également que l'échantillon longitudinal du medium possède une valeur faible ce qui nous laisse supposer que l'altération a pris de l'ampleur en profondeur en cette zone (marnage).

D'une façon globale, ces masses volumiques sont faible par rapport même aux bétons ordinaires ce qui signifie que le béton est poreux et non compact.

4.1.2. Absorption d'eau par capillarité

Les échantillons sont pesés après séchage à 50 °C pendant deux jours, puis placés dans l'enceinte de mesure (figure 4).

Les éprouvettes sont immergées dans l'eau du récipient sur une hauteur max de 3 mm à l'aide d'un lit de sable fin et un papier filtre. A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties de récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées, puis replacées dans le récipient.

Les échéances sont les suivantes : 1 heures, 2 heures, 3 heures, 6 heures, 9 heures et 24 heures...etc. L'essai doit être terminé après stabilisation de la masse.



Figure 4. Dispositif d'essai d'absorption capillaire.

Les résultats obtenus (évolution de la masse en fonction du temps) sont présenté dans la Figure 5.

Il est utile de signaler que c'est les valeurs moyennes sur trois échantillons (R, L et T) de chaque zone (radier, medium et le toit).



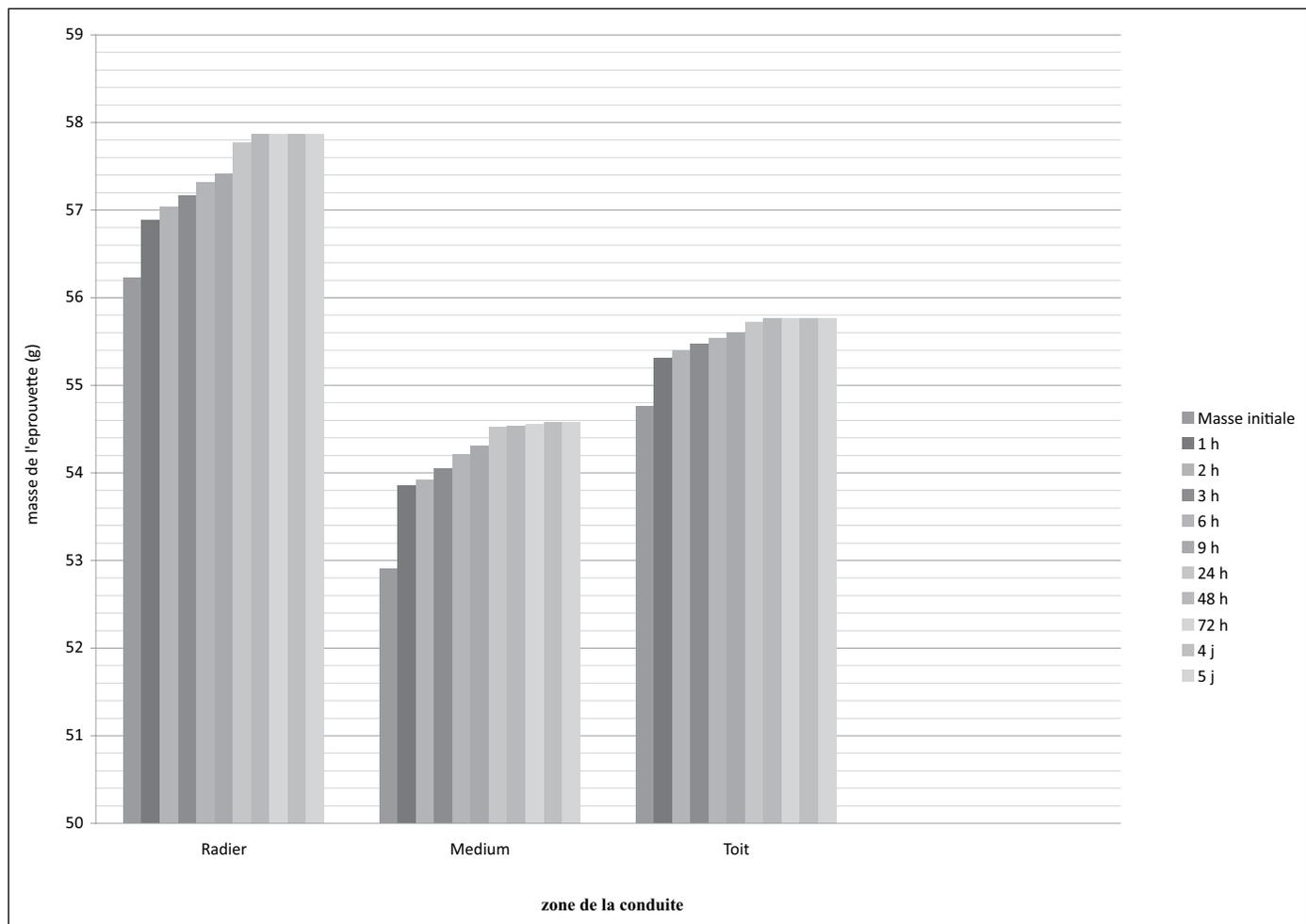


Figure 5. Évolution de l'absorption capillaire dans les différentes zones de la conduite.

Les cinétiques d'absorption sont présentées par les variations de la quantité d'eau absorbée par unité de surface. La Figure 5 montre un exemple de cinétique d'absorption d'eau. La pente décroissante indique qu'au fur et à mesure de l'essai, ce sont des capillaires de plus en plus fins qui sont concernés par le processus d'absorption d'eau. Deux paramètres peuvent être dégagés.

La première partie des courbes, curviligne, située entre 0 et 1 h, traduit le remplissage des plus gros pores. On peut caractériser ces plus gros pores à partir de l'absorption initiale, quantité d'eau absorbée entre 0 et 1 h, suivant ce qui a été avancé dans la théorie.

La deuxième partie des courbes, d'allure plus linéaire, représente le remplissage des capillaires les plus fins. Un facteur représentatif de cette deuxième partie est la pente de la droite par exemple entre 1 et 24 h. Cette pente est nommée '*absorptivité*' en référence aux travaux de (Hall, C 1989).

Pour la caractérisation de la durabilité, l'élément prédominant reste bien entendu l'absorption initiale représentative des plus gros capillaires.

D'après la figure 5, on remarque que l'absorption initiale (entre 0 et 1h) est plus importante au niveau de la zone de marnage de la conduite ce qui veut dire que cette partie est plus poreuse et plus altérée et moins compacte. Ces résultats confirment les résultats précédents de la masse volumique apparente avec une compatibilité parfaite.

4.2. Caractérisation mécanique

4.2.1. Contrainte limite en compression

Les essais de compression ont été effectués à l'aide de la machine INSTRON 4507 avec une vitesse de 0,5 mm/min. Les résultats obtenus (tableau 2) sont entachés d'une erreur relativement importante car le diamètre des éprouvettes est faible par rapport à la taille des graviers et la longueur est limitée par l'épaisseur de la conduite.

Par ailleurs, une correction de la résistance a été effectuée suivant le rapport hauteur/diamètre selon la norme ASTM C42-90.

Hauteur/diamètre = 1,5 coefficient de correction est de 0,96

D'après ces résultats, on distingue que les éprouvettes prélevées dans le sens radial (R) dans les zones medium et le toit ont subi respectivement une dégradation plus importante par rapport à leur homologue du radier, cela peut s'expliquer par l'action combinée (humidification/séchage) au niveau de la zone de marnage vu le degré de remplissage journalier variable en effluents de la conduite ce qui amplifie l'abrasion au niveau de cette zone précise.

Par ailleurs, on remarque que les échantillons longitudinaux (L) possèdent une contrainte limite à la rupture légèrement plus faible par rapport aux échantillons transversaux (T) à cause de la surface de contacts moins





Zone	Direction	Charge max (KN)	Contrainte max corrigée (MPa)	Moyenne (MPa)	Energie de rupture(J)
Radier	Echantillon R	13,91	21,68	19,14	11,231
	Echantillon L	10,29	16,04		7,640
	Echantillon T	12,65	19,72		9,684
Medium	Echantillon R	6,52	10,06	17,73	5,371
	Echantillon L	12,22	19,05		8,260
	Echantillon T	15,46	24,10		12,408
Toit	Echantillon R	7,07	10,91	19,2	8,005
	Echantillon L	9,67	15,08		8,149
	Echantillon T	20,49	31,61		14,956

Tableau 2. Valeurs moyennes des contraintes limites en compression en (MPa).

importante de ces derniers vis-à-vis de la surface interne du conduit trop endommagé.

D'une façon générale, ces résultats présentent une anisotropie remarquable de la dégradation interne (due aux effluents) suivant les différentes zones avec une intensité au niveau de la zone de marnage (D/2) de la conduite.

4.2.2. Traction indirecte (essai brésilien)

L'essai brésilien permet d'estimer la résistance à la traction directe du béton sans avoir recours au système de chargement compliqué que nécessite l'essai de traction directe.

L'essai consiste à appliquer une charge de compression centrée selon deux génératrices de l'éprouvette. Les contraintes induites provoquent la rupture suivant un plan diamétral de l'éprouvette.

Le tableau 3 donne les valeurs trouvées pour chaque zone d'échantillon ainsi que la direction correspondante dont laquelle est prélevé.

On remarque que la résistance à la traction indirecte présente des valeurs trop faible. Ici l'effet des extrémités est exclu ce qui nous laisse supposer que la contrainte limite moyenne obtenue représente juste le cœur de conduite. Ces résultats ne montrent pas une grande anisotropie par rapport à la direction ou la zone de prélèvement.

5. MISE EN ÉVIDENCE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR PHÉNOLPHTALÉINE

Après avoir subit la traction par fendage, et pour illustrer l'ampleur et l'anisotropie de l'endommagement, on a appliqué de la phénolphtaléine sur les demi-morceaux des échantillons radiaux des trois zones (radier, medium et toit). Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 6 et présentés en chiffres dans le tableau 4.

Zone	Direction	Contrainte (MPa)	Valeurs Moy (MPa)
Radier	Echantillon R	3,58	2,91
	Echantillon L	2,06	
	Echantillon T	3,10	
Medium	Echantillon R	2,68	3,12
	Echantillon L	2,25	
	Echantillon T	4,44	
Toit	Echantillon R	2,78	2,5
	Echantillon L	2,12	
	Echantillon T	2,62	

Tableau 3. Valeurs des essais en traction indirecte (essai brésilien).





	Epaisseur initiale (mm)	Epaisseur actuelle (mm)	Face interne Ep en (mm) à pH < 11	Face externe Ep en (mm) à pH < 11	Erosion (%)	Epaisseur Endommagée (%)
Radier	41	41	5	3	00	19,51
Medium	41	38,1	9	5	7,07	41,21
Toit	41	39,6	7	6,5	3,41	36,33

Tableau 4. Taux d'endommagement et valeurs des épaisseurs à pH réduit.

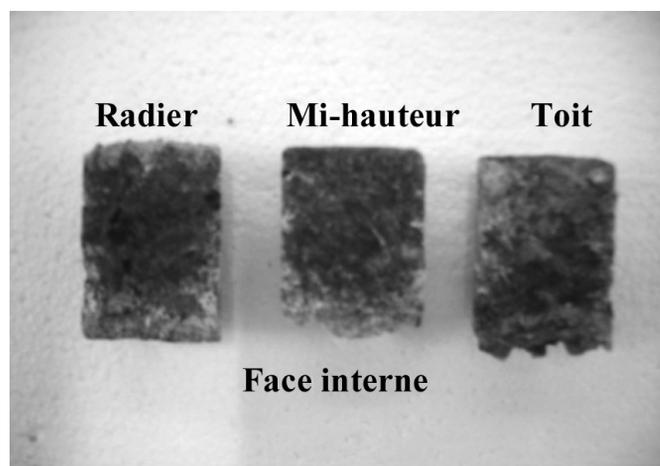


Figure 6. Evolution du pH des échantillons radiaux dans les trois zones: Radier, medium et le Toit.

D'après la photographie ainsi que le tableau 4, on remarque une différence remarquable et notable de la diminution de niveau de pH entre la partie interne et externe ainsi que depuis le radier vers le toit de la conduite.

Les résultats montrent une altération superficielle (perte de matière) et endommagement intense en face interne maximum en zone de marnage de la conduite (D/2). Ainsi, ces résultats montrent logiquement que le couplage des deux effets, chimique et érosif, s'organise différemment sur le pourtour de la conduite, la contribution de ces deux effets atteints son paroxysme en mi-hauteur à cause des cycles émergence/immersion.

La dégradation interne peut être attribuée à la production du sulfure d'hydrogène H_2S , (Parker 1945). Ce dernier se combine en présence d'humidité sur les surfaces non-immersées de la conduite, est biologiquement oxydé en acide sulfurique H_2SO_4 .

Progressivement les espèces résistantes à l'acide, des bactéries aérobies vont successivement coloniser les surfaces supplémentaires dont l'acide sulfurique est produit et le pH diminue. Par conséquent, les nouveaux bétons ont un pH de surface alcalin d'environ 6, ce qui va engendrer la corrosion (pH de 1 à 3) ce qui confirme les résultats de la phénolphthaléine (Figure 6).

Au niveau du toit, l'attaque est souvent sous forme gazeuse et le remplissage total (section pleine) de la conduite peut expliquer l'érosion de la pâte cimentaire (apparition des granulats).

En revanche, le pH réduit de coté extérieur est attribué à la carbonatation notamment dans le haut de la conduite ou bien à la présence de sulfates contenus dans le sol support. D'une façon globale, ces résultats nous montrent l'anisotropie des dégradations suivant la zone de la conduite avec une intensité en zone de marnage ce qui est compatible avec les résultats précédents.

6. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de mettre en évidence l'état de la dégradation interne et externe ainsi que l'anisotropie de la détérioration de la conduite en béton du tronçon de la rue « Binquenais » de la ville de Rennes.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure les conclusions et les recommandations suivantes :

Le béton employé dans ce tronçon a des caractéristiques physiques et mécaniques très médiocres, ce qui a facilité la pénétration des agents agressifs à l'intérieur de matériaux ce qui va compromettre la durée de vie de ce réseau, cela est due éventuellement à la mauvaise formulation du béton avec un rapport E/C élevé.

Une forte altération ainsi qu'un endommagement important sur la face interne de la conduite qui s'intensifie en zone de marnage (mi-hauteur).

Le radier et la zone la moins touchée par la dégradation sur l'ensemble de la conduite que ce soit de l'intérieur ou de l'extérieur ce qui met en évidence l'anisotropie des dégradations dans ce type d'ouvrage.

Le contact avec le milieu extérieur, s'est traduit par une carbonatation vu la faible compacité de béton. Celle-ci a pu se propager vers l'intérieur du béton ce qui explique la diminution de pH de la face externe surtout au niveau du toit.

Cette étude devrait être complétée par une étude microscopique (DRX MEB...etc) pour détecter les nouvelles formations (ettringite) ainsi qu'une analyse de sol support et d'expliquer vraisemblablement les pertes de matières constatées notamment au niveau de la face interne.

Comme recommandation, Vu l'état de la conduite et l'intensité de la détérioration ainsi que la qualité actuelle du béton, on suggère une réhabilitation ou bien un renforcement immédiat qui rentre dans un cadre préventif.

Ces outils permettront à terme d'évaluer les performances de réseaux par types et, par exemple, de juger l'aptitude à l'emploi des produits en fonction des matériaux constitutifs des canalisations.





7. RÉFÉRENCES

- Barnard JL., Corrosion of sewers, Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) Research Report 250, South Africa, 1967.
- Chaker, (Ed.), *Corrosion Forms and Control for Infrastructure, ASTM STP 1137, American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1992, pp. 273–283.
- Cochet C., Derangere D., *La dégradation du béton dans les ouvrages d'assainissement en présence d'hydrogène sulfuré*, Cahiers du CSTB, cahier 2382, 1990.
- Hall C., *Materials and Structures*, 27,291-306, 1994.
- Kaempfer W., Berndt M., 1998. *Polymer modified mortar with high resistance to acid to corrosion by biogenic sulfuric acid*. In: Proceedings of the IXth ICPIC Congress, Bologna, Italy, pp. 681–687.
- Kelly DP., Wood AP., Reclassification of some species of Thiobacillus to the newly designated genera Acidithiobacillus gen. nov., Halothiobacillus gen. nov and Thermithiobacillus gen. nov. *Int J Syst Evol Microbiol* 2000;50:511–6.
- M^c Govern MS., Can coatings protect wastewater treatment systems, *Aberdeen's Concrete Construction* 44 (4) (1999) 53– 57.
- Melinge Y., Jaubertie R., Daiguebonne C., Guillou O., Lahogue R., Gueguen B., 2009, *étude de l'altération du réseau d'assainissement de la ville de Rennes*, 27^{eme} rencontres annuelles de l'AUGC, réf. AUGC_02-53, St Malo 3-5 juin.
- Mori T, Nonaka T., Tazaki M., Koga Y., Hikosaka S., *Interactions of nutrients, moisture and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes*, *Water Research* 26 (1) (1992) 29– 37.
- Parker CD., *Species of sulphur bacteria associated with the corrosion of concrete*. *Nature* 1947;159 (4039) :439–40.
- Parker CD. The corrosion of concrete 1. *The isolation of a species of bacterium associated with the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulphides*. *Aust J Exp Biol Med Sci* 1945a;23:81–90.
- Sand W., Bock E., *Concrete corrosion in the Hamburg sewer system*, *Environmental Technology Letters* 5 (1984) 517 – 528.
- Saricimen H., Maslehuddin M., *Case study of deterioration of concrete in sewerage environment in an Arabian Gulf Country*, *Durability of Building Materials* 5 (1987) 145–154.
- Stewart WF., *Disaggregation of environmental factors affecting sewer pipe failures*, *Journal of infrastructure Systems* 5 (4) (1999) 150–158.
- Sydney R., Esfandi E., Surapaneni S., 1996, *Control concrete sewer corrosion via the crown spray process*. *Water Environ. Res.* 68 (3), 338–347.





CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Pierre MATAR*, Rouba EL DALATI**

* Maître de Conférences, Docteur
Laboratoire de Génie Civil, Faculté de Génie, Branche 2
Université Libanaise
Roumieh, Rue Principale
pmatar@ul.edu.lb

** Maître de Conférences, Docteur
Laboratoire de Génie Civil, Faculté de Génie, Branche 1
Université Libanaise
Tripoli, Rue Arz
rdalati@ul.edu.lb

CONTEXTE INDUSTRIEL

L'extraction de granulats est un secteur très important pour le BTP dont il constitue l'activité de base. Comme toute matière première naturelle, les granulats naturels sont limités en quantité et les sites exploitables risquent de ne pas suffire pour répondre à la demande. En outre, l'extraction de granulats naturels n'est pas sans impact environnemental (sur la faune et la flore).

Dans la majorité des pays, la consommation des granulats suit un accroissement constant. En conséquence, les lieux d'extraction ne cessent de s'éloigner des lieux de consommation et cette distance constitue un facteur déterminant dans le coût des granulats (coût de transport supplémentaire).

Il convient de noter aussi que la distance parcourue par les déchets de démolition lors de leur évacuation ne cesse de croître et présente un problème dont les conséquences, au niveau du bilan économique et de la pollution, sont très importantes.

L'idée de recycler les bétons est apparue dans le but principal de préserver l'environnement et de s'intégrer ainsi au

concept de développement durable. En effet, la réutilisation des bétons en tant que granulats dans des nouvelles compositions de béton permet de réduire les dépenses sur la gestion des déchets de démolition et, surtout, de protéger les gisements et les montagnes contre l'ouverture de nouvelles carrières. Les granulats provenant du recyclage de bétons peuvent remplacer une partie de granulats naturels lors de la fabrication de nouveaux mélanges de béton. Les taux de substitution des granulats naturels dans cette recherche sont 10, 20 et 30 %.

La fabrication de bétons à base d'agrégats provenant du recyclage de béton démolé comporte les étapes principales suivantes :

- la réception des bétons de démolition ;
- le découpage du béton à la cisaille ;
- la séparation des matériaux (déferrailage électromagnétique) ;
- le broyage du béton à l'aide d'une station de concassage de béton ;
- le stockage des agrégats recyclés ;
- l'utilisation des agrégats recyclés dans la fabrication de nouveaux bétons.





Des essais de laboratoire doivent être réalisés sur ces nouveaux bétons contenant d'agrégats recyclés afin de déterminer leurs caractéristiques physico-mécaniques telles que leur résistance à la compression, leur ouvrabilité, leur porosité et leur durabilité.

1. INTRODUCTION

L'augmentation inquiétante des quantités des déchets provenant de la construction et de la démolition, ainsi que l'extraction étendue des ressources naturelles nécessaires à la production des matériaux de construction sont sujettes aux critiques des écologistes. Toutefois, de grandes parties des déchets peuvent être partiellement recyclés. L'un des principaux déchets de construction susceptibles d'être recyclés est le béton démolé. L'idée de recycler les bétons est apparue dans le but principal de préserver l'environnement. En effet, la réutilisation des bétons en tant que granulats dans des nouvelles compositions de béton a permis de réduire les dépenses sur la gestion des déchets de construction et de démolition et, surtout, de protéger les gisements et les montagnes contre l'ouverture de nouvelles carrières (Rubaud *et al.*, 1998).

Le but de cette recherche est d'étudier expérimentalement l'influence des granulats recyclés sur les propriétés du béton telles que sa résistance à la compression, son ouvrabilité et sa porosité, ainsi que sa durabilité.

L'efficacité du recyclage du béton est conditionnée par la pureté du gisement source et les techniques de concassage, de broyage et de criblage du béton de démolition. Selon les études réalisées et les constatations faites sur le terrain, il semble que c'est le mortier du produit source qui joue le rôle prépondérant dans la qualité des constituants élaborés et dans le comportement des mélanges. C'est principalement par sa porosité que le mortier a une action plus ou moins importante. Sauf dans le cas d'emploi de granulats de base particulièrement poreux, toute la porosité du béton se retrouve dans le mortier. On peut considérer que ce mortier a une porosité supérieure à 10 %. Le second paramètre qui intervient est alors le dosage en ciment et le troisième est la quantité d'eau.

La porosité du béton et de la pâte de ciment hydraté gouverne de nombreuses propriétés du béton telles que : ses caractéristiques mécaniques, sa perméabilité (vis-à-vis de l'eau, des ions et des gaz) et sa durabilité. Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques s'améliorent et plus la perméabilité diminue. Les bétons faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau et des autres agents potentiellement agressifs (sulfates, CO₂, Cl⁻, etc.).

La littérature a montré que les bétons à agrégats recyclés sont poreux et présentent des valeurs de perméabilité deux fois plus élevées que celles des bétons à granulats naturels. Leurs propriétés physiques et mécaniques décroissent à mesure que le taux de substitution des granulats naturels par des granulats de recyclage augmente. La résistance à la compression diminue nettement dès que

le taux de remplacement dépasse 30 % (Gomez-Soberon, 2002).

2. NOMENCLATURE

BN	Béton ne contenant que des granulats Naturels
BRI/xGR1	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 8 et 16 mm (catégorie GR1) provenant de béton Incendié
BRI/xGR2	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 4 et 16 mm (catégorie GR2) provenant de béton Incendié
BRI/xGR2/yC	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 4 et 16 mm (catégorie GR2) provenant de béton Incendié avec ajout d'y % de ciment
BRS/xGR1	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 8 et 16 mm (catégorie GR1) provenant de béton Sain (non affecté par le feu)
BRS/xGR2	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 4 et 16 mm (catégorie GR2) provenant de béton Sain (non affecté par le feu)
BRS/xGR2/yC	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 4 et 16 mm (catégorie GR2) provenant de béton Sain (non affecté par le feu) avec ajout d'y % de Ciment

3. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Quinze mélanges de béton ont été préparés. Un de ces mélanges ne contenait que des granulats naturels (béton ordinaire), alors que les autres contenaient des granulats naturels et des granulats recyclés.

Les granulats recyclés utilisés (Figures 1 et 2) sont le résultat de la démolition d'un même bâtiment, une partie duquel ayant été soumise à l'action du feu. Ainsi, sept mélanges comprenaient des granulats provenant de béton incendié (Tableau 1) et sept autres mélanges comprenaient des granulats provenant de béton « sain » (non incendié) (Tableau 2). Différents taux de granulats recyclés ont été utilisés pour la substitution des granulats naturels : 10, 20 et 30 %. Deux catégories de granulats recyclés, du point de vue dimensions, ont été utilisées : catégorie GR1 ayant des dimensions entre 8 et 16 mm et catégorie GR2 ayant des dimensions entre 4 et 16 mm. Les dimensions des granulats naturels étaient entre 5 et 16 mm.

Les mélanges de béton ont été préparés en utilisant la méthode de formulation du béton de Dreux-Gorisse (Dreux *et al.*, 1998) en prenant un dosage en ciment constant de 350 kg pour 1 m³ de béton dans tous les mélanges à l'exception de deux mélanges où 10 % de ciment ont été ajoutés.





Composants du béton	BN	BRI/10G R1	BRI/10G R2	BRI/20G R1	BRI/20G R2	BRI/30G R1	BRI/30G R2	BRI/10G R2/10C
Granulats naturels 5/16 mm, kg	1240	1116	1116	992	992	868	868	1116
Granulats recyclés de béton incendié 8/16 mm (catégorie GR1), kg	0	124	0	248	0	372	0	0
Granulats recyclés de béton incendié 4/16 mm (catégorie GR2), kg	0	0	124	0	248	0	372	124
Sable, kg	580	580	580	580	580	580	580	580
Ciment, kg	350	350	350	350	350	350	350	385
Eau, l	200	250	262	275	275	275	270	260
E/C	0.57	0.71	0.75	0.79	0.79	0.79	0.77	0.68

Tableau 1. Composition des bétons à granulats recyclés incendiés

Composants du béton	BN	BRS/10G R1	BRS/10G R2	BRS/20G R1	BRS/20G R2	BRS/30G R1	BRS/30G R2	BRS/10G R2/10C
Granulats naturels 5/16 mm, kg	1240	1116	1116	992	992	868	868	1116
Granulats recyclés de béton incendié 8/16 mm (catégorie GR1), kg	0	124	0	248	0	372	0	0
Granulats recyclés de béton incendié 4/16 mm catégorie (GR2), kg	0	0	124	0	248	0	372	124
Sable, kg	580	580	580	580	580	580	580	580
Ciment, kg	350	350	350	350	350	350	350	385
Eau, l	200	250	262	275	275	275	270	260
E/C	0.57	0.71	0.75	0.79	0.79	0.79	0.77	0.68

Tableau 2. Composition des bétons à granulats recyclés sains



Figure 1. Granulats recyclés incendiés



Figure 2. Granulats recyclés non affectés par l'incendie (« sains »)





3.1. Essais d'affaissement

L'ouvrabilité du béton frais a été caractérisée et sa consistance a été déterminée en réalisant des essais d'affaissement au cône d'Abrams (NF P 18-451, 1981).

3.2. Essais de compression

Les essais de compression ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 15 cm de diamètre et de 30 cm de hauteur (NF P 18-400, 1981). Les éprouvettes ont été conservées dans un local maintenu à une température de 20 ± 2 °C pendant 24 heures (NF P 18-404, 1981). L'humidité de l'air ambiant était entre 60 et 75 %. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées à une température pareille dans l'eau. Les essais de compression (NF P 18-406, 1981) ont été réalisés à 28 jours après le coulage du béton en utilisant une machine semi-automatique ayant une capacité maximale de 1500 kN. L'effort de compression a été appliqué progressivement, à une vitesse de mise en charge de 8,8 kN/s. Les essais ont été considérés terminés au moment de la rupture de l'éprouvette. La rupture de toutes les éprouvettes avait la forme diablo. La résistance à la compression du béton initial dont les granulats ont été utilisés après recyclage a été déterminée en réalisant de différents essais : destructifs (essai de compression sur des carottes) (NF P 18-405, 1981) et non destructifs (essais in situ à l'aide d'un scléromètre) (NF P 18-417, 1989). La valeur moyenne de cette résistance était de 6 MPa pour le béton incendié et de 20 MPa pour le béton sain.

3.3. Essais de porosité

Des essais de porosité (NF P 18-554, 1979) ont été réalisés sur des cubes de béton à granulats recyclés de côté 5 cm. Pour chaque type de béton trois cubes ont été fabriqués. Les essais ont été effectués à un âge de douze jours (Figure 3). Les cubes ont été séchés jusqu'à masse constante dans un four à une température 60 °C. La masse à sec de chaque cube a été relevée. Puis les cubes étaient plongés dans l'eau et leur nouvelle masse a été relevée. La



Figure 3. Cubes de béton à granulats recyclés pour l'essai de porosité

différence entre les masses sèche et saturée d'eau représente la masse d'eau absorbée et, par suite, le volume des vides. Ainsi, on a pu déterminer le pourcentage de vides dans les cubes de béton à granulats recyclés.

3.4. Indice de durabilité

L'indice de durabilité des granulats provenant du recyclage de béton a été déterminé afin de pouvoir évaluer la résistance de ces granulats à l'affaiblissement et à la désintégration lors du changement de la teneur en eau. La technique utilisée est conforme aux prescriptions de la procédure d'essai suggérée par la Société internationale de mécanique des roches (Brown, 1981), ainsi que la norme de l'Association américaine pour les essais et matériaux (ASTM D4644-08, 2008). Deux séries de granulats recyclés ont été considérées : une série comportait des granulats provenant du béton incendié et l'autre série comportait des granulats provenant du béton sain. Dix échantillons de granulats pesant 40 à 60 g chacun donnant un poids total de 450 à 550 g ont été choisis pour représenter chaque série de granulats à tester.

Des essais pareils ont été également réalisés afin de déterminer l'indice de durabilité du béton à granulats recyclés. Dix échantillons de bétons à granulats recyclés pesant 40 à 60 g chacun donnant un poids total de 450 à 550 g ont été également choisis pour représenter chaque type de béton à tester.

On place les échantillons dans un tambour clos par des tamis métalliques de masse C et on place l'ensemble dans une étuve à 60 °C jusqu'à obtenir une masse constante du tambour avec ses contenus ; on note cette masse A. Puis on place le tambour dans un bocal contenant de l'eau distillée tout en respectant les instructions indiquées dans le catalogue de l'appareil. On soumet le tambour à une rotation dans l'eau durant 10 minutes. Durant la rotation les fragments du matériau utilisé se trouvent dégradés et sédimentés dans le bocal d'eau. Le tambour sera ensuite retiré du bocal et séché de nouveau jusqu'à masse constante ; la nouvelle masse sera notée B. Un simple calcul donnera ainsi l'indice de durabilité en utilisant l'équation suivante :

$$I_d = \frac{B - C}{A - C} \times 100,$$

avec :

B - C = masse sèche après l'essai,

A - C = masse sèche avant l'essai.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION DES ESSAIS

4.1. Rapport E/C et essais de compression

Les figures 4 et 5 présentent les valeurs du rapport eau/ciment pour les bétons à granulats recyclés incendiés et les bétons à granulats recyclés sains respectivement. Ces



deux figures montrent le besoin de l'ajout d'eau lors de l'augmentation du taux des granulats recyclés. Cet ajout d'eau était nécessaire afin d'obtenir des mélanges de béton à ouvrabilité pareille. La nécessité d'ajout d'eau est due à l'absorption d'eau par les granulats recyclés, caractéristique capable d'affecter le comportement rhéologique du béton frais. L'absorption d'eau par les granulats recyclés était également la conséquence de la présence d'une structure alvéolaire de l'ancien mortier collé aux granulats. Les alvéoles captent l'eau et la retiennent. Ainsi, afin de maintenir l'affaissement du béton entre 2.5 et 4.5 cm, intervalle correspondant à un béton ferme et envisagé dans nos essais, il était nécessaire d'ajouter de l'eau et, par conséquent, d'augmenter le rapport E/C avec l'augmentation du taux des granulats recyclés. Toutefois, on remarque une amélioration (diminution) de ce rapport lors de l'ajout de 10 % de ciment. Bien que la variation du rapport E/C de tous les bétons contenant des granulats recyclés par rapport au béton témoin soit semblable, une légère absorption d'eau supplémentaire pour les bétons contenant des granulats provenant de bétons incendiés est remarquée.

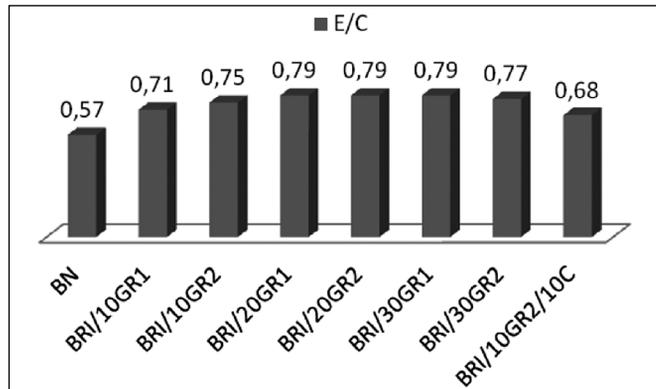


Figure 4. Rapport E/C des bétons à granulats recyclés incendiés

En considérant les valeurs du rapport E/C des bétons à granulats recyclés et du béton qui ne contient que des granulats naturels, on remarque :

Caractéristiques du béton	BN	BRI/10G R1	BRI/10G R2	BRI/20G R1	BRI/20G R2	BRI/30G R1	BRI/30G R2	BRI/10G R2/10C
Affaissement, cm	2.5	3	4.5	3.5	4	3.5	3.5	3
Résistance à la compression, MPa	23	16.3	15.7	16	15.3	13.8	14.3	20.7

Tableau 3. Affaissement et résistance à la compression des bétons à granulats recyclés incendiés

Caractéristiques du béton	BN	BRS/10G R1	BRS/10G R2	BRS/20G R1	BRS/20G R2	BRS/30G R1	BRS/30G R2	BRS/10G R2/10C
Affaissement, cm	2.5	4	3	4	4	3.5	3.5	3
Résistance à la compression, MPa	23	17	19.5	16.3	16.5	15.1	15.2	22.4

Tableau 4. Affaissement et résistance à la compression des bétons à granulats recyclés sains

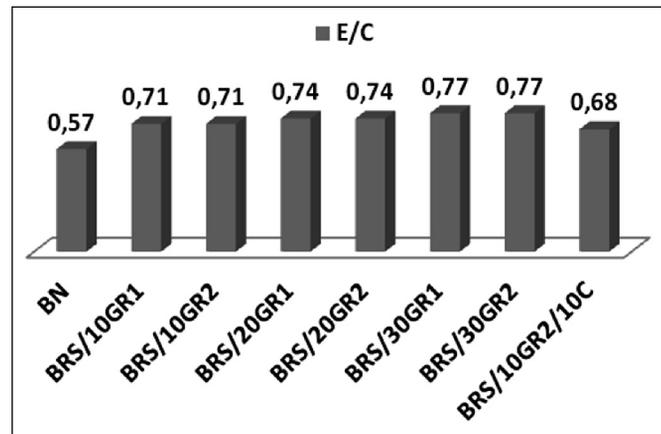


Figure 5. Rapport E/C des bétons à granulats recyclés sains

- une augmentation du rapport E/C pour les bétons à granulats recyclés incendiés constituant :
 - 24 % pour BRI/10GR1,
 - 31 % pour BRI/10GR2,
 - 36 % pour BRI/20GR1,
 - 36 % pour BRI/20GR2,
 - 36 % pour BRI/30GR1,
 - 34.5 % pour BRI/30GR2,
 - 17.2 % pour BRI/10GR2/10C ;
- une augmentation du rapport E/C pour les bétons à granulats recyclés sains constituant :
 - 24 % pour BRS/10GR1,
 - 24 % pour BRS/10GR2,
 - 29 % pour BRS/20GR1,
 - 29 % pour BRS/20GR2,
 - 34.5 % pour BRS/30GR1,
 - 34.5 % pour BRS/30GR2,
 - 17.2 % pour BRS/10GR2/10C.

Les valeurs de l'affaissement et de la résistance en compression des bétons à granulats recyclés incendiés et des bétons à granulats recyclés sains sont citées dans les tableaux 3 et 4 respectivement.



Les figures 6 et 7 présentent les valeurs de la résistance en compression des bétons à granulats recyclés incendiés et celles des bétons à granulats recyclés sains respectivement. On remarque que tous les bétons recyclés ont une résistance inférieure à celle du béton ne contenant que des granulats naturels. La diminution de la résistance des bétons à granulats recyclés devient plus remarquable avec l'augmentation du taux des granulats recyclés, ce qui est tout à fait logique. Les compositions contenant des granulats recyclés à dimensions de 4 à 16 mm fournissent une résistance légèrement meilleure que celle fournie par les compositions contenant des granulats recyclés à dimensions de 8 à 16 mm. Ceci peut être attribué à une meilleure homogénéisation de la granulométrie. Enfin, l'ajout de 10 % de ciment a bien amélioré la résistance à la compression.

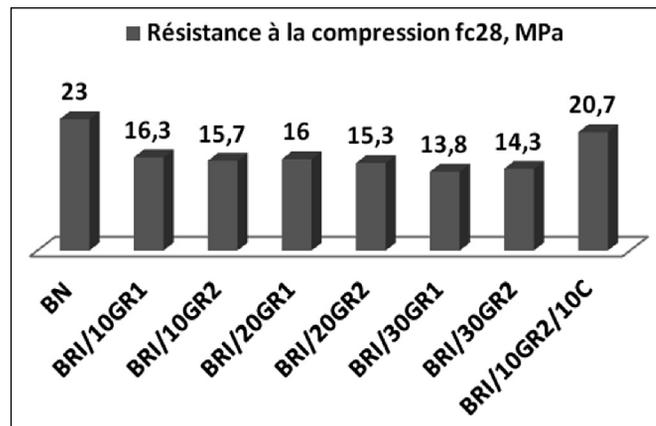


Figure 6. Résistance à la compression des bétons à granulats recyclés incendiés

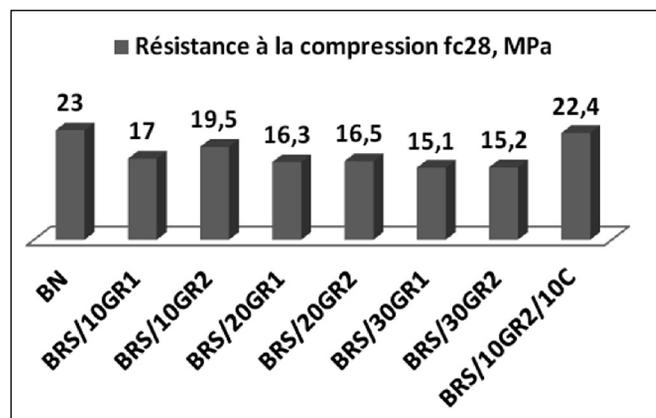


Figure 7. Résistance à la compression des bétons à granulats recyclés sains

En comparant les résultats des essais de compression des bétons à granulats recyclés et du béton qui ne contient que des granulats naturels, on remarque :

– une diminution de la résistance en compression pour les bétons à granulats recyclés incendiés constituant :

- 29 % pour BRI/10GR1,
- 32 % pour BRI/10GR2,
- 30,4 % pour BRI/20GR1,
- 33 % pour BRI/20GR2,
- 40 % pour BRI/30GR1,
- 38 % pour BRI/30GR2,
- 10 % pour BRI/10GR2/10C ;

– une diminution de la résistance en compression pour les bétons à granulats recyclés sains constituant :

- 26 % pour BRS/10GR1,
- 15 % pour BRS/10GR2,
- 29 % pour BRS/20GR1,
- 28 % pour BRS/20GR2,
- 35 % pour BRS/30GR1,
- 33,7 % pour BRS/30GR2,
- 2,5 % pour BRS/10GR2/10C.

En récapitulant les résultats des essais de compression, on peut remarquer une chute de la résistance en moyenne :

- de 30,5 % pour les bétons contenant 10 % de granulats recyclés incendiés,
- de 20,5 % pour les bétons contenant 10 % de granulats recyclés sains,
- de 31,7 % pour les bétons contenant 20 % de granulats recyclés incendiés,
- de 28,5 % pour les bétons contenant 20 % de granulats recyclés sains,
- de 39 % pour les bétons contenant 30 % de granulats recyclés incendiés,
- de 34,4 % pour les bétons contenant 30 % de granulats recyclés sains.

Ces résultats sont conformes à ceux obtenus lors des essais antérieurs réalisés par notre équipe (El Dalati *et al.*, 2008) et qui ont montré que la résistance à la compression diminue de plus de 30 % lors de l'utilisation d'un taux de 30 % de granulats recyclés non affectés par l'incendie.

4.2. Essais de porosité

Les résultats des essais de porosité réalisés sur les cubes de béton à granulats recyclés incendiés et sains sont illustrés dans les tableaux 5 et 6 respectivement. Les figures 8 et 9 illustrent également les valeurs des porosités calculées.

Désignation	BRI/10G R1	BRI/10G R2	BRI/20G R1	BRI/20G R2	BRI/30G R1	BRI/30G R2	BRI/10G R2/10C
E/C	0.71	0.75	0.79	0.79	0.79	0.77	0.68
Masse sèche, g	266	275.7	274.7	269.3	265.7	267	266.3
Masse saturée d'eau, g	291	301.7	302	297.7	294.3	296.3	291.7
Masse d'eau retenue, g (= Volume des vides, cm^3)	25	26	27.3	28.4	28.6	29.3	25.4
Porosité, %	20	20.8	21.84	22.72	22.88	23.44	20.32

Tableau 5. Porosité des bétons à granulats recyclés incendiés





Désignation	BRS/10G R1	BRS/10G R2	BRS/20G R1	BRS/20G R2	BRS/30G R1	BRS/30G R2	BRS/10G R2/10C
E/C	0.71	0.71	0.74	0.74	0.77	0.77	0.68
Masse sèche, g	275.7	281.3	273.7	274.3	270.7	269.7	269.7
Masse saturée d'eau, g	300.7	306.7	301	301.7	299	298	295
Masse d'eau retenue, g (= Volume des vides, cm ³)	25	25.4	27.3	27.4	28.3	28.3	25.3
Porosité, %	20	20.32	21.84	21.92	22.64	22.64	20.24

Tableau 6. Porosité des bétons à granulats recyclés sains

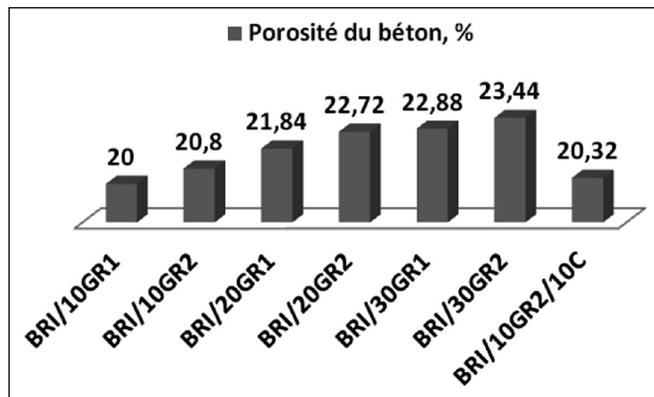


Figure 8. Porosité des bétons à granulats recyclés incendiés

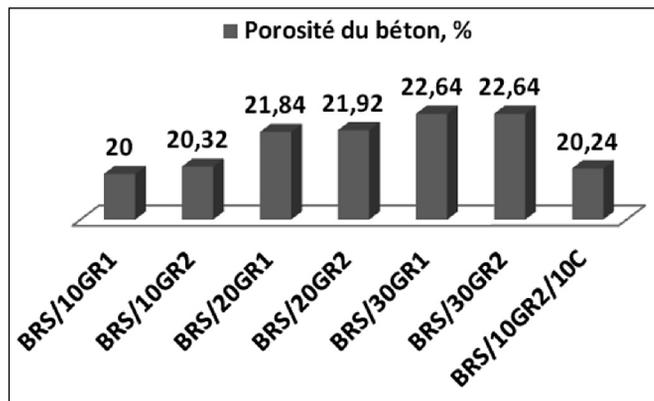


Figure 9. Porosité des bétons à granulats recyclés sains

On remarque que la porosité des bétons augmente avec l'augmentation du taux des granulats recyclés. La porosité est élevée à cause de la porosité des granulats recyclés et elle augmente avec l'augmentation du rapport E/C.

Pour les bétons BRI/10GR1, BRI/10GR2, BRI/20GR1, BRI/10GR2/10C, BRS/10GR1, BRS/10GR2, BRS/20GR1, BRS/20GR2 et BRS/10GR2/10C, la qualité du béton vis-à-vis de la porosité est médiocre. Pour les autres bétons, la qualité du béton vis-à-vis de la porosité est presque mauvaise.

4.3. Indice de durabilité des granulats recyclés

La masse totale des échantillons de granulats recyclés incendiés constituait 505.89 g, la masse de chacun de ces

échantillons étant comprise entre 40.89 et 58.90 g, alors que celle des échantillons de granulats recyclés non atteints par le feu constituait 504.63 g, la masse de chacun de ces échantillons étant comprise entre 40.80 et 56.45 g. D'après le calcul basé sur les mesures réalisées durant les essais, l'indice de durabilité des granulats recyclés incendiés est obtenu égal à 91.65 % et celui des granulats recyclés sains est égal à 98.41 %.

On remarque que l'indice de durabilité des granulats provenant du béton incendié est beaucoup plus petit que celui des granulats provenant du béton sain. Par conséquent, le béton formé par des granulats recyclés non incendiés sera sûrement plus durable que celui formé par des granulats recyclés incendiés.

4.4. Indice de durabilité des bétons contenant des granulats recyclés

L'indice de durabilité a été calculé pour deux séries de bétons à agrégats recyclés : une série contenant 10 % d'agrégats recyclés incendiés (BRI) et une série contenant 10 % d'agrégats recyclés non incendiés (BRS). Chaque série de béton comportait les deux catégories d'agrégats : agrégats de 8 à 16 mm (catégorie GR1) et agrégats de 4 à 16 mm (catégorie GR2). D'après les mesures effectuées durant les essais, l'indice de durabilité des bétons a été calculé et les valeurs obtenues sont données dans le tableau 7.

Désignation	BRI/10G R1	BRI/10G R2	BRS/10G R1	BRS/10G R2
Indice de durabilité	98.22%	96.63%	98.28%	98.49%

Tableau 7. Indice de durabilité des bétons contenant 10 % de granulats recyclés

L'examen des valeurs obtenues montre que l'indice de durabilité des bétons contenant d'agrégats recyclés incendiés est plus petit que celui des bétons contenant d'agrégats recyclés non incendiés ; cette observation n'est pas inattendue car les granulats constituant ces bétons ont montré une image pareille lors des essais décrits au paragraphe 4.3.





5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Afin d'assurer une maniabilité du béton à granulats recyclés (incendiés ou non incendiés) comparable à celle du béton ordinaire ne contenant pas de granulats recyclés, il est nécessaire d'ajouter de l'eau, ce qui peut affecter évidemment sa résistance à la compression.

Les bétons à granulats recyclés offrant de faibles résistances en compression peuvent être utilisés en tant que bétons de propreté et bétons cyclopéens, ainsi que dans les travaux routiers comme les bordures et les pavés de trottoirs, les murs poids, les canaux et dans d'autres constructions ne nécessitant pas des résistances élevées.

Le béton recyclé qui peut avoir un rapport E/C élevé ne peut pas être utilisé dans des milieux agressifs à cause de sa porosité et perméabilité élevées.

L'ajout de 10 % de ciment aux mélanges de bétons à granulats recyclés permet de compenser la perte de résistance en compression de ces bétons et de leur fournir une résistance comparable à celle des bétons ne contenant que des granulats naturels.

Les valeurs obtenues de la résistance à la compression des bétons contenant des granulats recyclés, qu'ils soient incendiés ou non, permettent leur utilisation dans les structures.

6. BIBLIOGRAPHIE

Rubaud M., Pasquet J.-F., Bourgeois F., « Recyclage des matériaux de construction : les nouvelles filières pour préserver l'environnement », *Géosciences*, n° 1, janvier 2005, Source : <http://www.brgm.fr/dcenewsFile?ID=255>.

- Gomez-Soberon J.M.V., « Porosity of recycled concrete with substitution of recycled aggregate. An experimental study », *Cement and Concrete Research*, Elsevier, vol. 32, n° 8, August 2002, p. 1301-1311.
- Dreux G., Festa J., *Nouveau guide du béton et ses constituants*, Eyrolles, Paris, 1998.
- NF P 18-451 : Bétons – Essai d'affaissement, AFNOR, Paris, décembre 1981.
- NF P 18-400 : Bétons – Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques, AFNOR, Paris, décembre 1981.
- NF P 18-404 : Bétons – Essais d'étude de convenance et de contrôle – Confection et conservation des éprouvettes, AFNOR, Paris, décembre 1981.
- NF P 18-406 : Bétons – Essai de compression, AFNOR, Paris, décembre 1981.
- NF P 18-405 : Bétons – Essai d'information – Confection et conservation des éprouvettes, AFNOR, Paris, décembre 1981.
- NF P 18-417 : Béton – Mesure de la dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre, AFNOR, Paris, décembre 1989.
- NF P 18-554 : Granulats – Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, AFNOR, Paris, 1979.
- Brown E.T. (Editor), « Suggested method for determination of the slake-durability index », *Rock Characterization Testing & Monitoring, ISRM Suggested Methods*, Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press, Oxford, New York, 1981, p. 92-94.
- ASTM D4644-08: Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks, *Annual Book of ASTM Standards 2010*, ASTM, West Conshohocken, PA, USA. Section 4, Construction, vol. 04.08, March 2010.
- El Dalati R., Youssef E., Matar P., Yotte S., Homsy F., « Effet de la nature des agrégats sur la qualité du béton recyclé », *Compte-rendu du 3^e Congrès International Francophone de Mécanique Avancée CIFMA03*, Alep, Syrie, 21-23 avril 2008.





ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES NOEUDS POTEAU-POUTRE EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉS PAR TISSU DE FIBRES DE CARBONE

L. HAKIMI* & M.IDDIR*

laabedh@yahoo.fr, mridi@yahoo.fr,

*Chargé de Recherches (CNERIB), Cité Nouvelle El Mokrani, Soudania, Alger

Email : cnerib@wissal.dz

CONTEXTE INDUSTRIEL DE LA RECHERCHE

Cette recherche s'inscrit dans un contexte à la fois industriel et réglementaire. En effet, le marché de la réparation et de renforcement des structures existantes est de plus en plus important et ce en raison de la vétusté du patrimoine bâti d'une part, et de l'endommagement de certains ouvrages dû à différents phénomènes (séisme, environnement, etc.).

La technique utilisant les matériaux composites en polymères renforcés de fibres (FRP), est devenue très compétitive, dans de nombreuses situations, par rapport aux méthodes traditionnelles. Cependant, on ne dispose pas, en Algérie, de documents réglementaires permettant la sélection, le dimensionnement et la mise en œuvre de ces produits composites. Ces produits sont mis sur le marché, le plus souvent par importation de différents pays étrangers, d'où la nécessité de connaître leurs caractéristiques et leurs qualifications aux usages auxquels ils sont destinés.

La recherche effectuée a permis de dégager quelques conclusions pratiques à l'intention des bureaux d'études qui ont la charge de vérifier par le calcul les performances d'une opération de renforcement utilisant ce type de matériaux.

INTRODUCTION

La réhabilitation et la réparation des constructions existantes sont devenues, ces dernières années, une préoccupation majeure des gestionnaires d'ouvrages, nécessitant, le plus souvent, une attention particulière. Un nombre important de situations nécessite l'augmentation de la capacité de résistance d'un bâtiment ou partie de bâtiment à cause des effets de l'environnement avoisinant, de l'action de charges supplémentaires, de l'âge, et des erreurs dans la conception et l'exécution. Par ailleurs, les coûts des opérations de réparation et de remplacement des structures sont en augmentation continue. Aussi, les délais nécessaires pour ces travaux de réparation peuvent s'avérer longs et entraînant ainsi une perturbation et arrêt de fonctionnement de ces ouvrages et ce même dans le cas de disponibilité de ressources financières.

Les méthodes traditionnelles de réparation/renforcement, telles que le chemisage, la construction mixte, la précontrainte extérieure, ont largement été utilisées avec des matériaux conventionnels. Les développements récents dans le domaine des matériaux composites en polymères renforcés de fibres ont permis une nouvelle alternative efficace dans le domaine de la réparation/renforcement. La





résistance de ces composites provient essentiellement de la résistance des fibres, notamment des fibres de carbone, de glace ou d'aramide. Ils présentent l'avantage d'être légers, non corrosifs, et de grande résistance à la traction. De plus, ces matériaux, en lamelles rigides et en tissus souples, peuvent s'adapter à des usages variés.

La présente investigation se propose d'évaluer, par une approche numérique, les performances consécutives à une adjonction d'un composite en polymère renforcé de fibres, sur la résistance et la déformabilité des nœuds poteaux poutres en béton armé, souvent considérés comme zones critiques dans les systèmes de contreventement en portiques.

Les simulations numériques effectuées sont basées sur la méthode des éléments finis dans l'environnement du code industriel de calcul ANSYS, en prenant en considération le comportement non linéaire des matériaux. L'évolution de la propagation de la fissuration, des déformations, de l'épuisement de résistance des matériaux et de la variation de la capacité d'absorption d'énergie sont les paramètres mesurés.

MÉTHODOLOGIE

Pour la création du modèle étudié, le logiciel général de calcul aux éléments finis ANSYS a été utilisé.

Compte tenu de la symétrie du chargement et des conditions d'appuis, et pour optimiser le temps de calcul (calcul non linéaire), seule la moitié de la structure est considérée. L'analyse effectuée est de type statique non linéaire dont le chargement est appliqué en plusieurs paliers afin de garantir la convergence de la solution. Chaque palier est exécuté à la fin du palier précédent en utilisant la commande *restart*.

Les valeurs de contrôle utilisées pour la convergence de la solution sont celles fixées par défaut dans ANSYS à l'exception des tolérances pour la force et déplacement respectivement prises égales à 0.005 et 0.05

L'application du chargement sous forme de loadstep est effectuée de manière incrémentale selon la procédure de Newton Raphson.

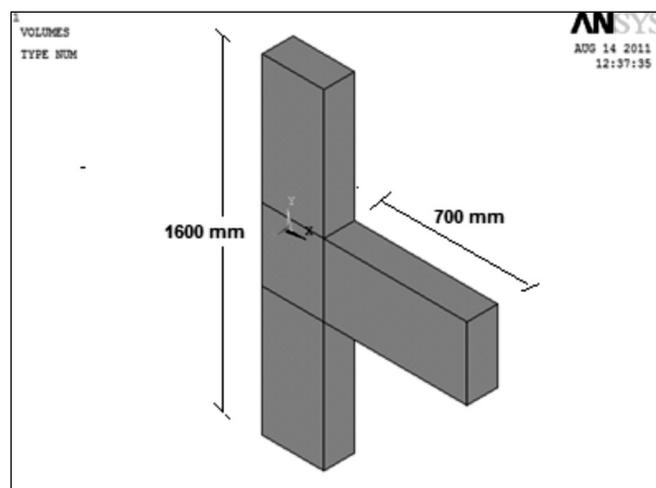


Figure 1 : Géométrie de la zone nodale

DESCRIPTION DU MODÈLE

Le nœud poteau poutre considéré dans la présente analyse est constitué d'une portion de poutre en porte à faux, et une portion de poteau comme il est montré par la figure 1. Le poteau a une section rectangulaire de 300 mm x 300 mm et une longueur totale de 1600 mm tandis que la poutre a une section rectangulaire de 300 mm x 350 mm et une longueur totale du porte à faux de 700 mm

Le ferrailage longitudinal du poteau et de la poutre est constitué de 8T12, supposé, concentré dans les 04 angles de la section ce qui revient à considérer une section de 226 mm² par angle. Le ferrailage transversal est, quant à lui, constitué de cadres dont la section est de 100.48 mm² espacés de 100mm. (Figure 2)

Les deux extrémités de la portion du poteau sont supposées articulées alors que la portion de la poutre est en porte à faux (libre).

Différentes formes de renforcement de nœuds poteaux poutres sont possibles [7] :

- Forme en L appliquée sur la partie supérieure du nœud ; (Figure 3a)
- Forme en U appliquée sur les faces latérales et la sous face des extrémités de la poutre (Figure 3b) ;
- Enveloppe en fibre appliquée sur les faces latérales des extrémités de la poutre (Figure 3c) ;
- Enveloppe appliquée sur le poteau (Figure 3d).
- Dans le cas présent un renforcement, par un tissu de fibre de carbone de toutes les faces de la zone nodale, a été appliqué. Ce renforcement couvre la partie délimitée par la figure 4.

Modèle Numérique

Les éléments finis utilisés dans la modélisation sont l'élément Solid65 pour le béton non armé et l'élément Link8 pour les armatures longitudinales et transversales, tandis que le tissu de fibre de carbone a été modélisé par l'élément Shell181. Une description sommaire de ces éléments est donnée dans ce qui suit.

L'élément Solid65 [2] est un élément à 08 nœuds, et 3ddl de translation dans les directions x, y, et z à chaque nœud.

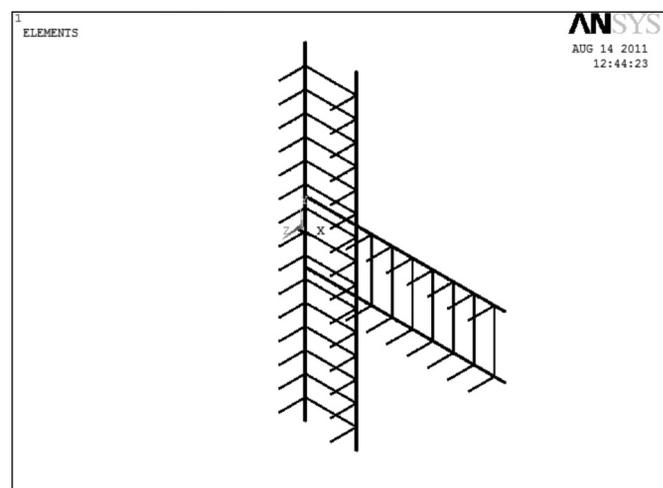


Figure 2 : Ferrailage de la zone nodale



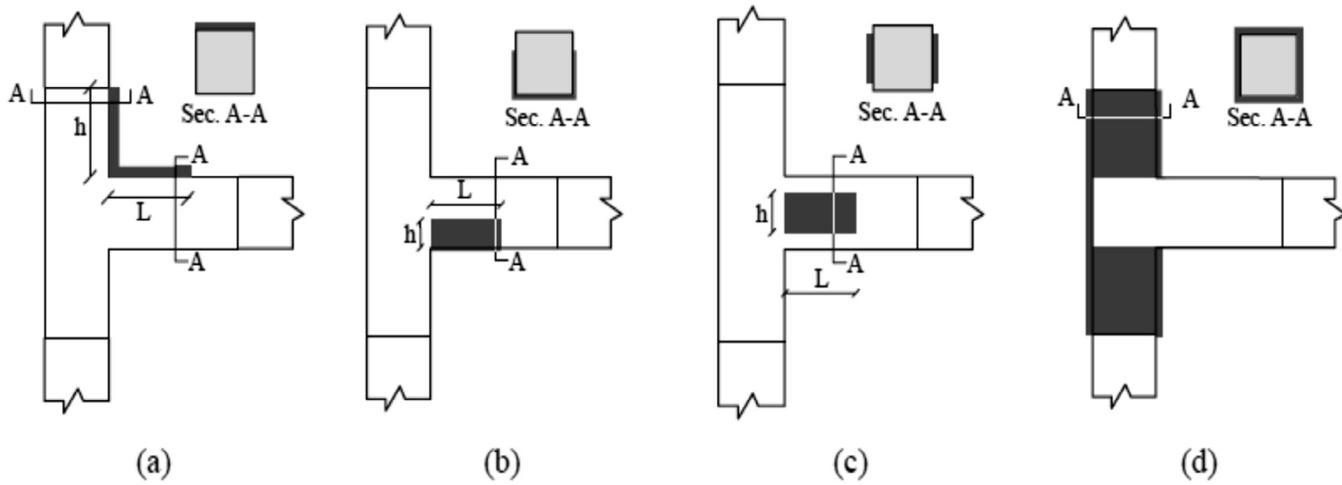


Figure 3 : Formes de renforcement des nœuds poteaux poutres

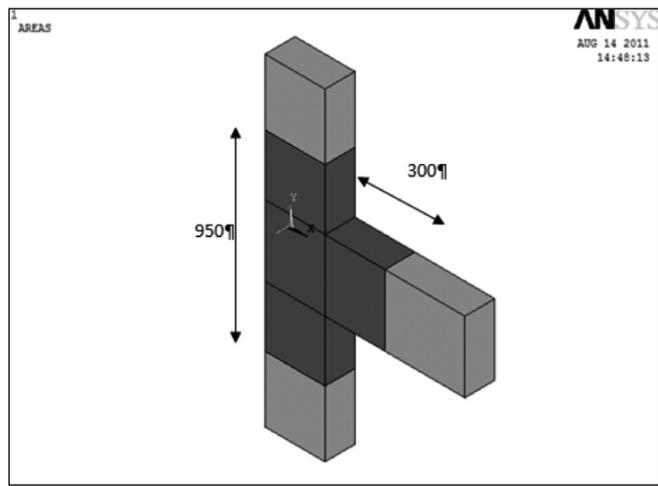


Figure 4 : Zones de renforcement de la zone nodale

Cet élément est capable de se déformer plastiquement, et peut reproduire la fissuration et l'écrasement dans les 03 directions orthogonales. Une représentation schématique de l'élément est donnée par la figure 5.

Les armatures de la poutre en B.A sont modélisées par des éléments linéaires ; même si l'élément solid65 peut accepter la simulation d'une section d'armature sous une autre méthode dite méthode de l'élément reparti en béton.

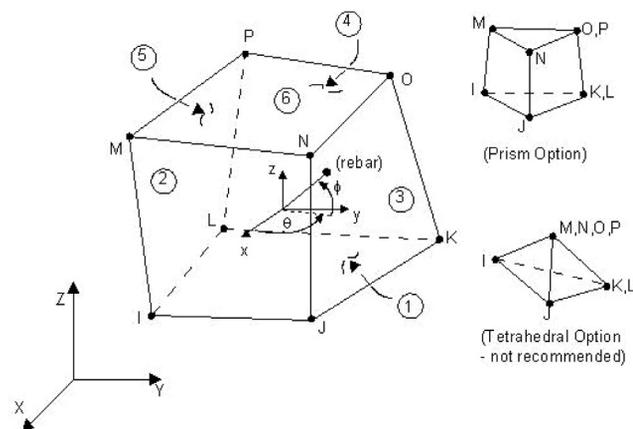


Figure 5 : Élément Solid65 (Ansys)

L'élément Link8 [2] est un élément 3D ayant 02 nœuds à 03 d.d.l de translation dans les trois directions modales x, y, z. Cet élément est aussi capable de reproduire des déformations plastiques. La figure 6 illustre cet élément.

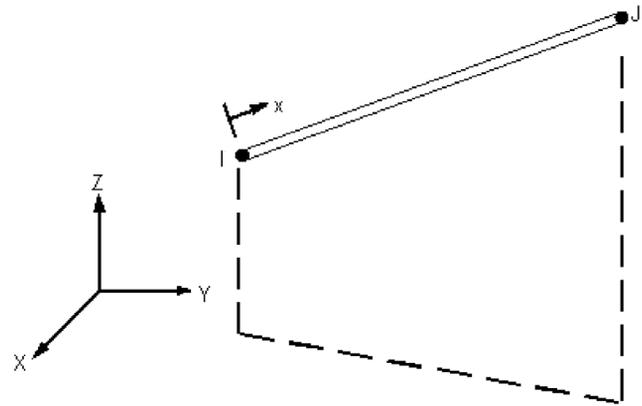


Figure 6 : Élément Link8 (Ansys)

Définition des "real constants"

Pour chaque "element type" le logiciel ANSYS définit différentes constantes.

Les "real constants" pour l'élément « solid65 » sont tous considérés nuls pour la raison que les armatures sont représentées par des éléments Link8 et par conséquent l'élément solid65 représente un élément en béton non armé.

Deux « real constants » sont définis pour l'élément Link8. Ces «real constants» définissent l'aire de la section droite de la barre, et la déformation initiale.

Les "real constants» définis pour l'élément Link8 et l'élément shell181 sont donnés par le tableau 1.

Le type d'élément fini utilisé pour la modélisation des tissus de fibre de carbone est l'élément shell181, lequel est un élément approprié pour la modélisation des éléments minces. C'est un élément à 4 nœuds avec 4 d.d.l dans chaque nœud. La géométrie et la position des nœuds de cet élément sont illustrées par la figure 7.





Real constants	Type d'élément	Constantes	
2	Link8	Cross sectional area (mm ²)	226
		Initial Strain	0
3	Link8	Cross sectional area (mm ²)	100,48
		Initial Strain	0
4	Shell181	Epaisseur (mm)	0.13
		Initial Strain	0

Tableau 1 : Résistance des matériaux acier et béton

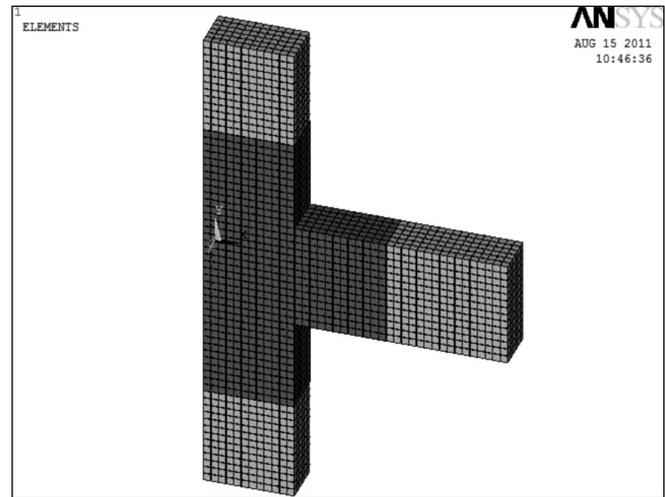
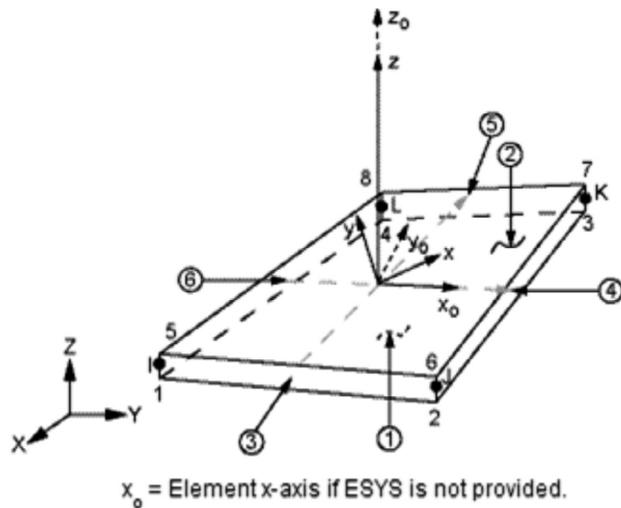


Figure 8 : Maillage de la zone nodale



x_0 = Element x-axis if ESYS is not provided.
 x = Element x-axis if ESYS is provided.

Figure 7 : Élément Shell181 (Ansys) [2]

Afin de tenir compte d'un collage parfait entre les tissus de fibre de carbone et la face de la poutre en BA les éléments finis des tissus sont créés dans le modèle de telle sorte que les nœuds coïncident avec les nœuds de la poutre.[1,3,4].

Maillage

Le maillage est réalisé de tel sorte que tous les nœuds des matériaux de renforcement (acier et composite) sont connectés (à l'aide de la commande Merge) aux nœuds de l'assemblage poteau poutre et ce afin de réaliser l'hypothèse de l'adhérence parfaite entre ces composants. Une vue d'ensemble de l'assemblage étudié est donnée par la figure 8.

PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

- Trois types de modèles de matériaux sont définis :
- Modèle de matériaux numéro 1 qui se réfère à l'élément solid65,
 - Modèle de matériaux numéro 2 qui se réfère à l'élément Link8,
 - Modèle de matériaux numéro 3 qui se réfère à l'élément Shell 181.

L'élément Solid65 est constitué d'un matériau ayant des propriétés linéaires isotropiques utilisant le critère de rupture de Von Mises et le modèle de Willam Warnke pour la définition de la rupture dans le béton.

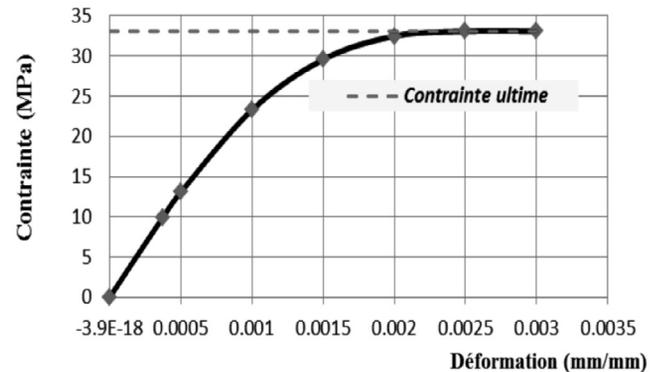


Figure 9 : Relation contrainte déformation du matériau béton

La figure 9.montre la relation, $\sigma - \epsilon$ définie par l'équation : [1,3].

$$\sigma = \frac{E_c \cdot \epsilon}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2} \text{ Avec } \epsilon_0 = \frac{2 f_{c28}}{E_c} \text{ et}$$

$$E_c = \sigma/\epsilon \text{ Où}$$

- σ : est la contrainte correspondant à une déformation ;
- E_c : Module de Young du béton ;
- ϵ_0 : est la déformation correspondant à la contrainte de rupture f_{c28}

Pour définir le premier point de la courbe multilinéaire il est nécessaire d'utiliser la loi de HOOKE : $E = \sigma/\epsilon$ avec $\sigma = 0,3f_{c28}$

L'élément Link8 est constitué d'un matériau ayant une loi de comportement bilinéaire isotropique basée sur un critère de rupture de VON MISES.

Pour l'élément Shell181 utilisé pour le renforcement, le modèle utilisé est un modèle linéaire isotrope défini par son module de Young, son coefficient de Poisson et sa contrainte limite de calcul ainsi que sa déformation limite. Les valeurs de l'ensemble des paramètres et contraintes nécessaires pour la définition des caractéristiques des matériaux sont consignées dans le tableau 2.





N° du matériau	Type d'élément	Propriétés des matériaux	
1	Solid65	Ex (MPa)	27228
		ν (PRXY)	0.3
		Paramètres du modèle	
		ShrCf-Op	0.3
		ShrCf-Cl	1
		UnTenSt	3.52
		UnComprSt	0
		HydroPrs	0
		BiCompSt	0
		UnTebSt	0
		TenCrFac	0
2	Link 8	Ex (MPa)	200000
		ν (PRXY)	0.3
		Limite d'écoulement (MPa)	400
		Module tangent (MPa)	0
3	Shell181	Ex (MPa)	230000
		ν (PRXY)	0.22
		Déformation admissible	0.012
		Contrainte de calcul (MPa)	3500

Tableau 2 : Paramètres de définition des matériaux

Chargement appliqué

Le chargement est appliqué par paliers successifs jusqu'à épuisement total de la résistance. Dans chaque palier les critères de convergence doivent être satisfaits. Pour éliminer les problèmes de décohésion du tissu de fibres de carbone dans l'analyse par éléments finis, c'est-à-dire l'effet de la rupture locale due à une concentration de contraintes normale ou de cisaillement, la déformation dans le tissu de fibres est vérifiée en s'assurant qu'elle reste toujours inférieure à une valeur limite fixée au préalable ($\epsilon_{fd} < 0.012$) [6, 7, 8].

La charge est supposée agir uniformément sur la largeur de la partie supérieure de la poutre à une distance de 25mm du bord libre.

RÉSULTATS

Relation force déplacement avant renforcement du nœud

La relation force déplacement obtenue jusqu'à la charge ultime est illustrée par la figure 10.

La charge de première fissuration est de 17356 N. La première fissuration est localisée approximativement au voisinage de la liaison poteau – poutre de la face tendue

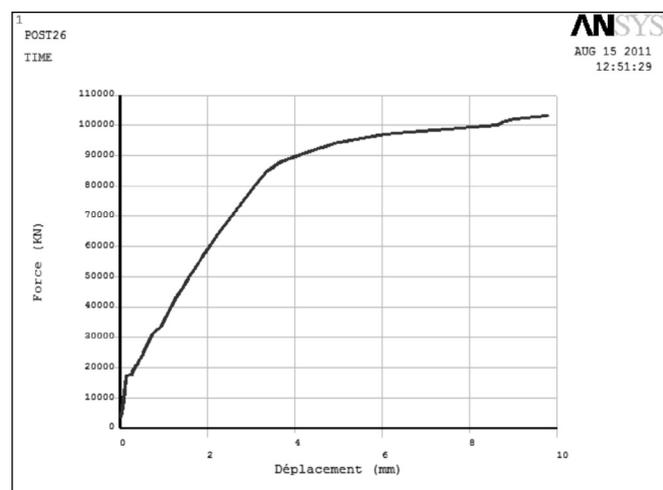


Figure 10 : Relation force déplacement avant renforcement

(figures 11 et 12). Au fur et à mesure que la charge augmente d'autres fissures font leurs apparitions.

La charge d'écoulement de l'acier est de 88000 N pour une flèche de 3.719mm et la charge de rupture est de 103000 N

Relation force déplacement après renforcement du nœud

La relation force déplacement, obtenue après renforcement est illustrée par la figure 13.



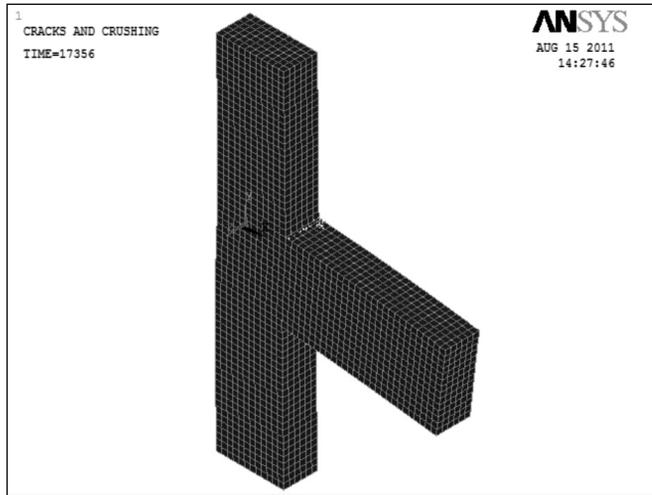


Figure 11 : Localisation de la première fissuration

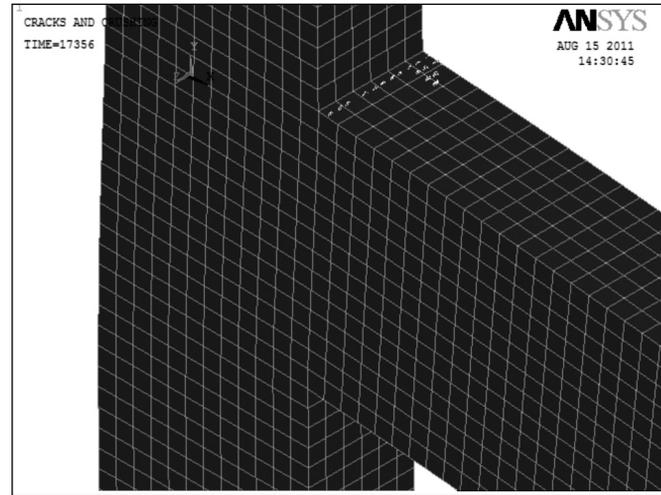


Figure 12 : Zoom Localisation de la première fissuration

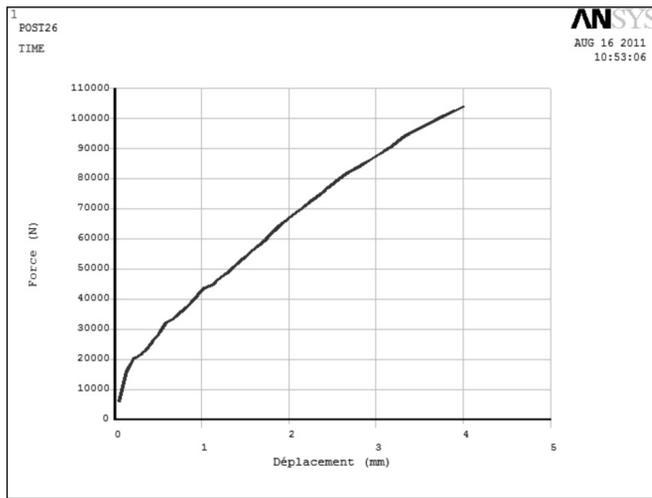


Figure 13 : Relation force déplacement après renforcement

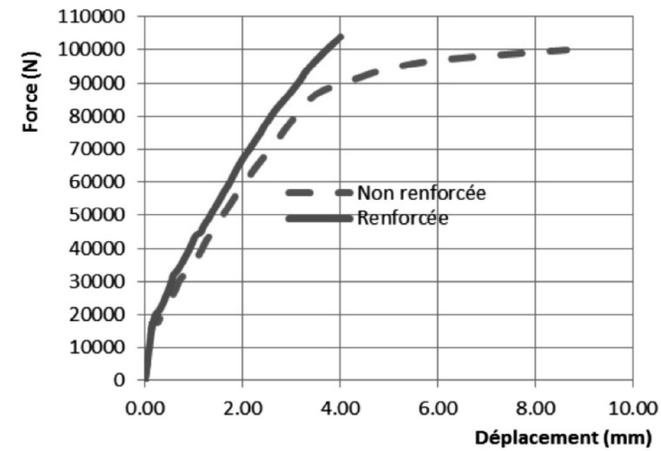


Figure 14 : Relation force déplacement avant et après renforcement

La superposition des courbes des figures 10 et 13 est donnée par la figure 14.

Le tableau 3 donne les valeurs de la flèche et la capacité d'absorption de l'énergie (C.A.E) dans les deux cas.

Spécimen	Flèche (mm) sous charge de 103000 N	% de réduction	C.A.E jusqu'à 4mm	% d'augmentation de la C.A.E
Non renforcé	9.7654		255865	-
Renforcé	3.934	59.71	225760	13.34

Tableau 3 : Flèche et capacité d'énergie avant et après renforcement

Amélioration de la rigidité flexionnelle du nœud

Les relations moment – rotation du nœud avant et après renforcement ont été évaluées et comparées. Une augmentation de la rigidité flexionnelle du nœud a été observée et représentée (figure15). Dans cette figure, la rotation θ est

calculée comme étant le rapport de la différence entre les déplacements verticaux, des points A et B, à la distance horizontale entre ces deux points. Il est important de mentionner que la distance, entre les points A et B, doit être suffisamment longue pour inclure la zone de formation de la rotule plastique [8].

DISCUSSION ET CONCLUSION

Il ressort des résultats obtenus que le renforcement de la zone nodale par le tissu de la fibre de carbone permet à la fois une réduction de la flèche de la poutre et une amélioration de la résistance du nœud aux efforts de cisaillement. Ainsi, en raison du module de Young élevé du matériau composite utilisé, une augmentation de la rigidité globale est obtenue.

La détermination de la rigidité additionnelle est très utile dans le cas des études de renforcement des nœuds de portiques. En effet, le tissu de fibre de carbone peut être représenté dans un logiciel de calcul sous forme d'un élément dont la loi de comportement non linéaire sera donnée par la relation moment rotation telle qu'évaluée précédemment.



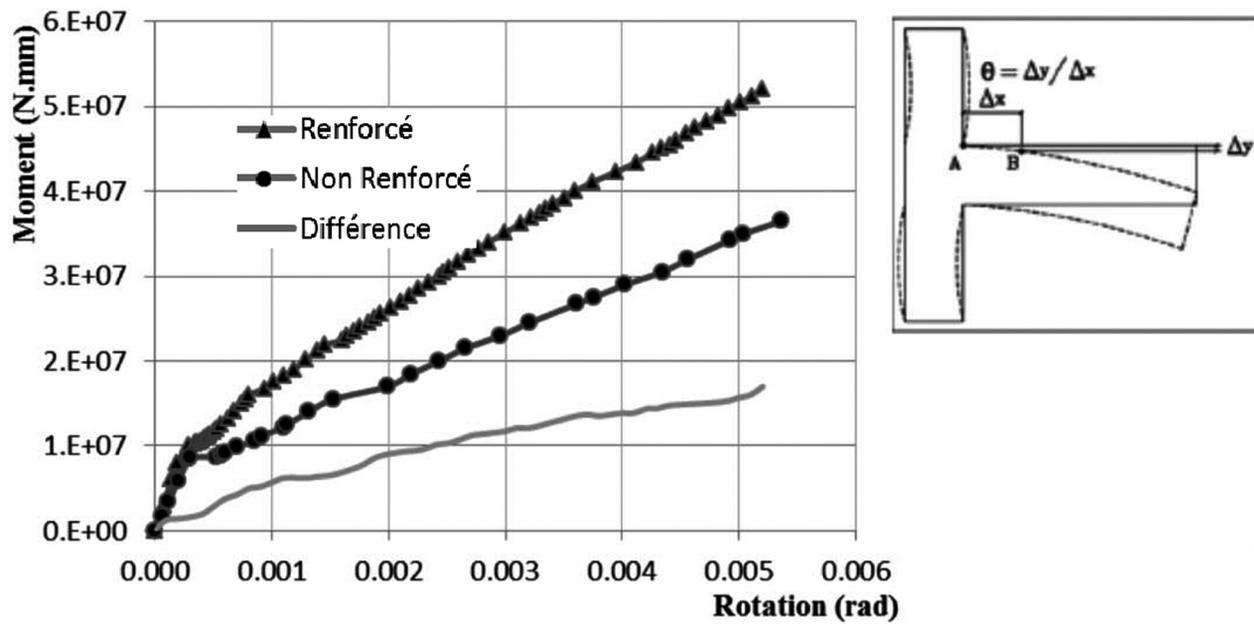


Figure 15 : Amélioration de rigidité flexionnelle du nœud renforcé

Le travail effectué a permis de mettre en évidence la puissance des outils numériques dans l'étude du comportement des structures en béton armé dans le domaine non linéaire. Aussi, l'étude a montré l'efficacité du renforcement des nœuds de portiques par des matériaux composites en résine renforcées de fibres de carbone. Les performances mesurées peuvent être utilisées à des fins pratiques d'évaluation de structures dans différentes situations (défection des matériaux, erreurs de conception, réhabilitation parasismique etc.)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anthony J. Wolanski, B.S. "Flexural Behavior of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Finite Element Analysis"; A Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School, Marquette University, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, Mai 2004.
 "ANSYS User's Manual; Revision 5.5", Swanson Analysis System, Inc., Houston, PA, 1998.

- I. Saifullah, et al. "Experimental and Analytical Investigation of flexural behavior of reinforced Concrete Beam", International journal of Engendering and technology IJET – IJENS Vol. 11, N° 11 February 2011.
- Abolghasem Nezamian & Sujeeva Sentenge: "Case Study of Application of FRP Composites in Strengthening the Reinforce Concrete Headstock of Bridge Structure", journal of composites for construction ASCE September /October 2007.
- R. Balamuralikrishnan & C. Anatomy Jeyasehar: "Retrofitting of RC Beams with Externally Bonded Simcon Laminates" The open Civil Engineering Journal, 2009, 3, 34-40.
- ACI Committee 440 "Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" American Concrete Institute, 2002;
- Robert Ravi.S 1 , Prince Arulraj.G "Finite Element Modeling on behavior of Reinforced Concrete Beam- Column Joints Retrofitted with Carbon Fiber Reinforced Polymer", International Journal Of Civil And Structural Engineering, Volume 1, No 3, 2010;
- A. Niroomandi, A .Maheri & al, "Seismic Performance of ordinary RC frames Retrofitted at Joints by FRP Sheets", Engineering Structures 32 (2010) 2326- 2336, Elsevier Ltd.





CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES BARRES D'ACIER POUR BÉTON ARMÉ PAR DES MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Moncef MAKNI^{1,2}, Atef DAOUD^{2,3} (membre UISF)

¹Département de Génie Civil, Institut Supérieur des Etudes Technologiques Sfax, Tunisie ;

²Laboratoire de Génie Civil, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie ;

³Département de Génie Civil, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, Tunisie

INTRODUCTION

L'aptitude d'une armature à rester solidaire au béton qui l'enrobe, sous l'effet des forces qui tendent à la faire glisser, est caractérisée par deux coefficients l'un, utilisé dans les calculs relatifs à la fissuration et par suite dans les sollicitations d'entraînement et l'autre, qui intervient dans les calculs relatifs aux scellements et par suite aux ancrages. L'adhérence entre l'acier et le béton n'est possible que grâce à l'existence d'un phénomène de liaison qui permet la transmission d'efforts entre l'armature et le béton qui l'enrobe. Ce phénomène complexe est la résultante de la combinaison des effets d'adhésion (fig.1-a), d'interaction mécanique (fig.1-b) et de frottement (fig.1-c).

L'adhésion est liée à la résistance au cisaillement de l'interface acier-béton, et elle est le résultat principal de la liaison chimique. L'interaction mécanique représentée par des forces perpendiculaires à la face de verrous surgit pendant que la barre est chargée et essaye de glisser. Ces forces, à leur tour, provoquent le frottement le long de l'interface acier-béton. Ces dernières forces sont de grande importance quand le mode de rupture est gouverné par fendage.

La butée mécanique, constituant la part importante de l'adhérence entre l'acier à haute adhérence et le béton, dépend des formes géométriques et des conditions de fabrication des armatures. Les normes actuelles relatives aux aciers définissent, pour les barres à haute adhérence, certains pro-

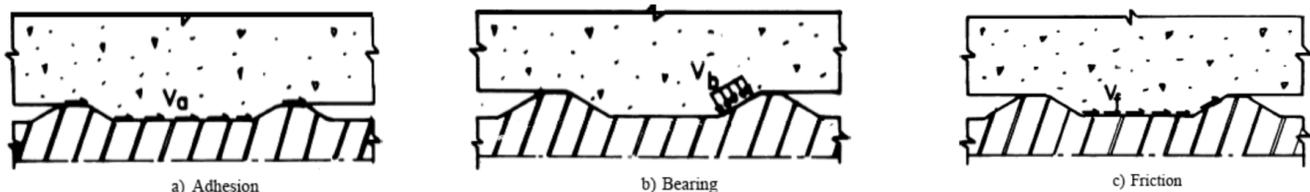


Fig.1 : Mécanismes de transfert d'efforts (ACI 408.2R-92) [1]





filts types avec fixation de valeurs numériques minimales et/ou maximales des paramètres géométriques de forme ; si ces valeurs sont respectées, les coefficients de fissuration et de scellement sont réputés satisfaisants. Sinon, ces coefficients doivent être déterminés expérimentalement.

Les caractéristiques géométriques des armatures à savoir forme, hauteur et inclinaison et espacement des verrous, sont représentées par un coefficient noté (fR) appelé l'aire relative des verrous [2].

Certains chercheurs soulignent l'importance de ce paramètre ; selon Leonhardt et Mommig (1977)[3], la valeur de (fR) peut fournir le meilleur moyen de comparaison entre les barres de profils différents. Ce coefficient est défini comme le rapport entre la surface offerte des verrous projetée sur un plan perpendiculaire à l'axe longitudinal, et la surface cisailée (voir Fig. 2.).

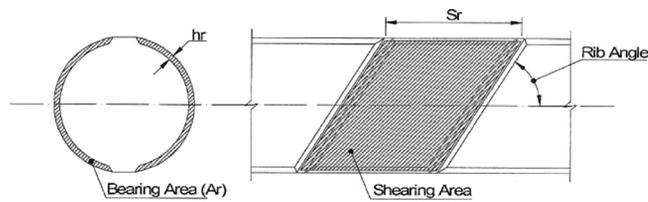


Fig. 2 : Paramètres de l'aire relative des verrous

D'après ACI 408.3-01[4], l'aire relative des verrous peut être exprimée comme suit :

Aire relative = $\frac{\text{surface du verrou projetée sur l'axe normal de la barre}}{\text{diamètre} \times \text{espacement des verrous}}$

L'expression de (fR) est donnée par la formule suivante :

$$fR = \sum_i \frac{A_{ri} \sin(\beta_i)}{\pi \phi S_{ri}} \quad [1]$$

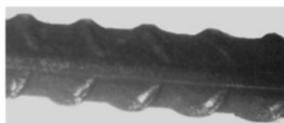
Avec :

- A_{ri} : surface des verrous i ;
- β_i : inclinaison des verrous i par rapport à l'axe de la barre ;
- ϕ : diamètre extérieur de la barre (fig.3.);
- S_{ri} : espacement entre axe des verrous i ;

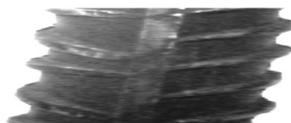


Fig.3 : Diamètre à prendre en compte dans la relation [4]

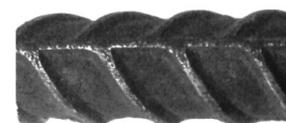
Clark [5][6], a analysé 17 configurations de barres et a suggéré que l'espacement moyen entre les côtes est égale à 70% du diamètre et la hauteur est égale à 4% du diamètre, pour les barres de diamètre inférieur ou égal à 13 mm. Pour



a) Barre tunisienne



b) Barre française



c) Barre brésilienne

Fig.4 : Photos des barres analysées

les barres de 16 mm de hauteur les valeurs doivent être comprises entre 4,5% et 5% du diamètre.

Dans une étude plus récente, conduite par Hamad [7] ont été analysées de différentes configurations géométriques des nervures. L'étude visant à varier l'écartement entre les nervures, les mêmes se situant entre 35 et 60% du diamètre, la hauteur du nervure, qui varie dans un intervalle de 5 à 12,5% du diamètre et la pente de la face de nervure a une valeur variable de l'ordre de 30° à 90°. Analysant les résultats de cette étude, il apparaît que la configuration qui a abouti à la meilleure performance a été : l'angle de vue de la côte à 60°, espacement de 50% et la hauteur de la nervure 10% du diamètre de la barre.

Ø (mm)	5-6	6,5-8,5	9-10,5	11-40
f_R	0,039	0,045	0,052	0,056

Tableau 1 : Valeurs minimales de (fR) (CEB-1999)

En ce qui concerne l'influence de l'angle des côtes, Lutz et Gergeley [8] n'ont observé que les angles entre 40° et 105° est suffisant pour qu'il n'y ait pas de mouvement sur l'interface entre la barre d'acier et de béton.

Selon CEB [9][10], les valeurs minimales requises pour l'aire relative de la nervure sont récapitulées dans le tableau 1.

Ces valeurs ont été retenues par l'Eurocode 2 [11] ; l'ACI 408.2R-92 [1] met également l'accent sur l'importance de la détermination de la surface relative des nervures, cependant, les valeurs recommandées se trouvant entre 0,05 et 0,08.

Le calcul de (fR) passe par l'évaluation rigoureuse des paramètres A_{ri} (fonction de la hauteur des verrous i), β_i , ϕ et S_{ri} .

Dans ce contexte, avec la variété des produits sidérurgiques utilisés pour constituer les armatures des constructions en béton armé. Nous présentons une méthode de caractérisation de la géométrie d'une barre d'acier pour béton armé, basée sur deux techniques complémentaires. La première consiste à exploiter et traiter l'empreinte bidimensionnelle d'une barre d'acier tandis que la seconde consiste à utiliser la photoprojection.

1. INVESTIGATION EXPÉRIMENTALE

Trois types de barres, de trois continents différents, ont été analysés dans cette étude : une barre tunisienne de diamètre nominal 12mm (fig. 4-a), une barre française de diamètre nominal 12mm (fig. 4-b) et une barre brésilienne de diamètre nominal 12,5mm (fig. 4-c). Les différentes barres sont illustrées dans les images suivantes :





La barre tunisienne se présente sous la forme d'un rond portant deux nervures longitudinales continues qui séparent deux séries de verrous obliques hélicoïdaux et ne touchant pas les nervures longitudinales. La barre française a la forme d'un rond munie de deux nervures longitudinales opposées, d'une série de verrous obliques et hélicoïdaux dont la hauteur devient nulle au raccordement avec les nervures longitudinales et de deux rangs de verrous obliques dont l'inclinaison et l'espacement sont différents. La barre brésilienne se présente comme la barre tunisienne mais les deux séries de verrous touchent les nervures longitudinales.

1.1. Technique de l'empreinte bidimensionnelle

Cette technique est utilisée par les mécaniciens pour déterminer le nombre de filets et leur pas pour les vis sans fin en particulier et les axes filetés en générale. Le principe de cette technique est basé sur le traçage de l'empreinte des parties saillantes d'une pièce de révolution. Elle permet la mesure des inclinaisons et des espacements des verrous d'une barre. Pour y parvenir, des tronçons de barres ont été prélevés au hasard. Leurs verrous ont été soigneusement marqués par une encre noire puis roulés sur un papier blanc permettant de tracer le développement du cylindre à génératrice verticale (figure 5).

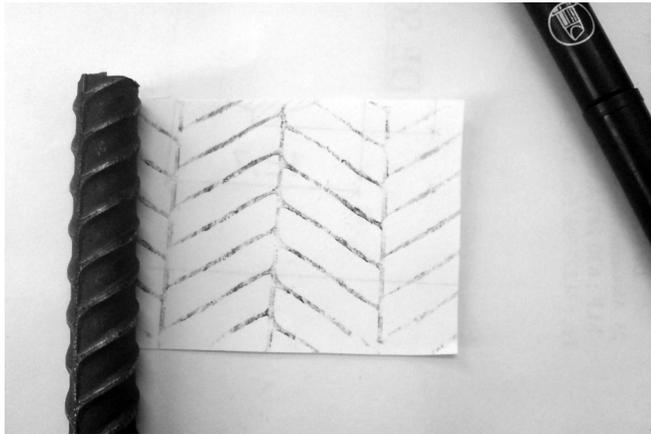


Fig.5 : Empreinte de la barre

Après avoir numérisé les images des empreintes obtenues à l'aide d'un scanner (figure 6), les fichiers ont été enregistrés dans le logiciel « Autocad 2009 » qui permet, après remise à l'échelle, de déterminer les inclinaisons et les espacements des verrous de chaque tronçon.

1.2. Technique de la photo-projection

L'appareil qui a été utilisé pour la photo-projection « Mitutoyo Corporation » est illustré dans la figure 7. Cet appareil permet de donner des mesures au dixième près grâce aux verniers manœuvrés par des vis micrométriques. Cette technique permet de mesurer la hauteur et la largeur des verrous ainsi que leur espacement ; les inclinaisons des faces de verrous peuvent être également mesurées (figure 8).

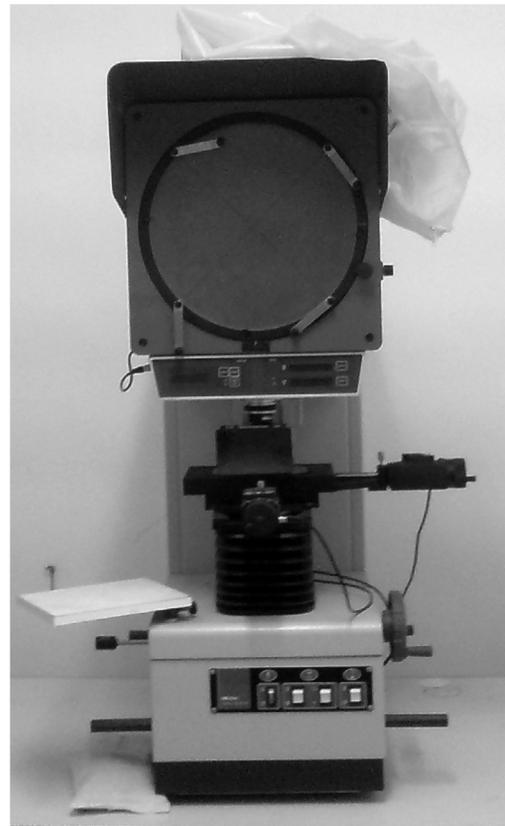


Fig.7 : Appareil photo-projecteur « Mitutoyo Corporation ».

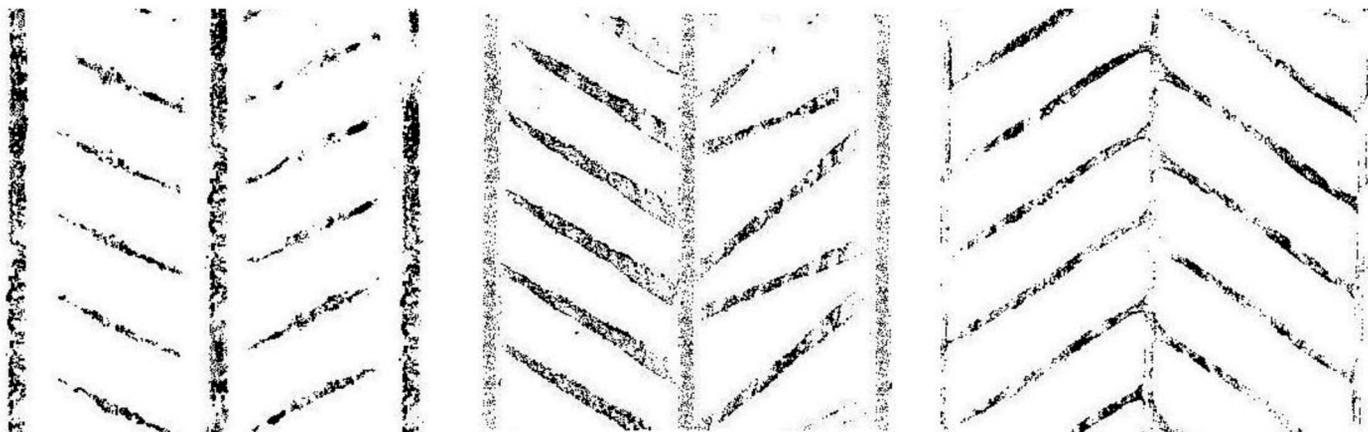


Fig.6 : Empreintes après scannage



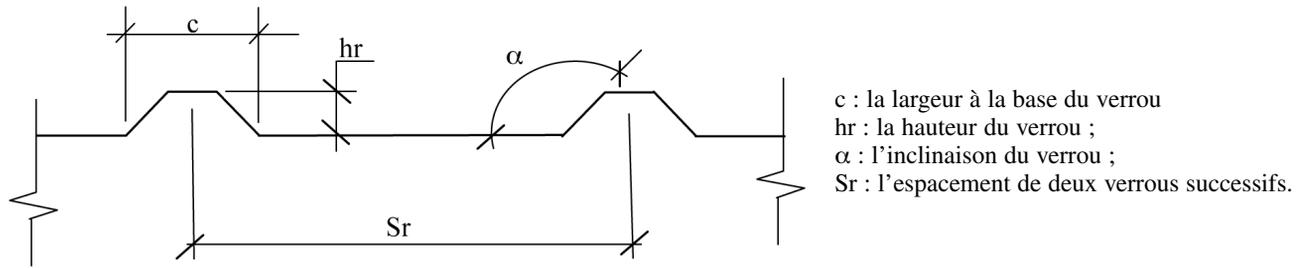


Fig.8 : Désignation des paramètres.



Fig.9 : Prise des mesures à l'aide du photoprojecteur

Des tronçons de barres ont été fraisés longitudinalement et fixés successivement sur le chariot de l'appareil qui peut être manœuvré suivant deux directions perpendiculaires. La surface est projetée sur l'écran avec un agrandissement de 10 fois. Les mesures peuvent être faites directement à l'aide des verniers électroniques.

Les mesures déterminées à partir de la photoprojection permettront de reproduire la géométrie des barres avec le logiciel « Autocad 2009 ».

2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les fichiers issus des deux techniques utilisées ont été traités pour reproduire la forme des barres suivant les plans (xy), (xz) et (yz). En exploitant les commandes disponibles dans la version 2009 du logiciel « Autocad », le mode 3D permet de monter les différentes vues et de produire la barre en solide 3D comme indiqué sur les figures 10, 11 et 12.

L'exploitation des résultats sur « Autocad » permet de relever les valeurs de tous les paramètres nécessaires au calcul du coefficient (fR), d'après l'équation [1]. Les résultats ainsi obtenus sont représentés dans le tableau 2.

3. COMPARAISON DES RÉSULTATS

Vale Silva B. et al. [12], ont utilisé une technique très populaire dans le domaine du design, mais peu connu

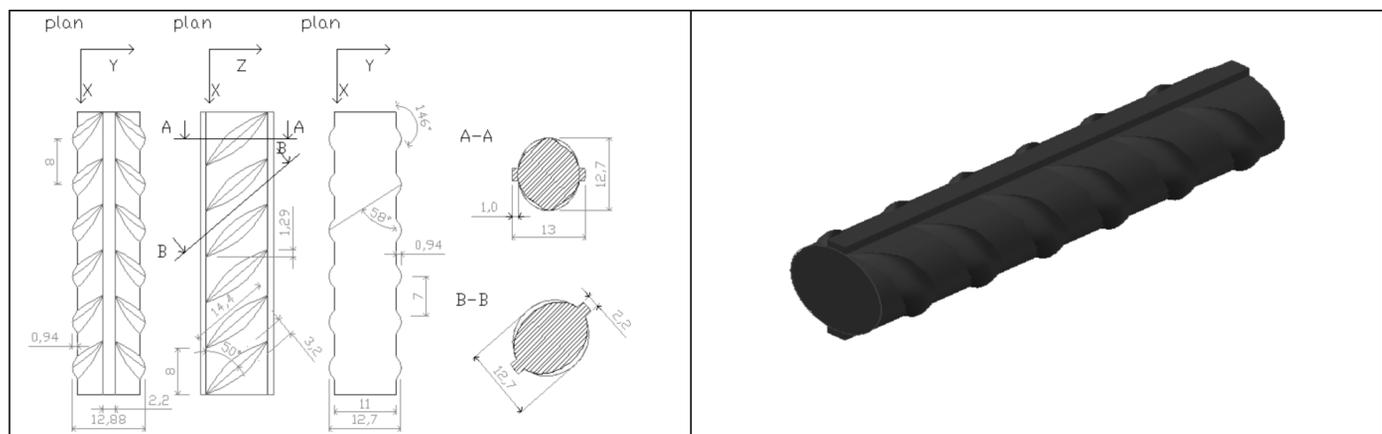


Fig.10 : Barre tunisienne



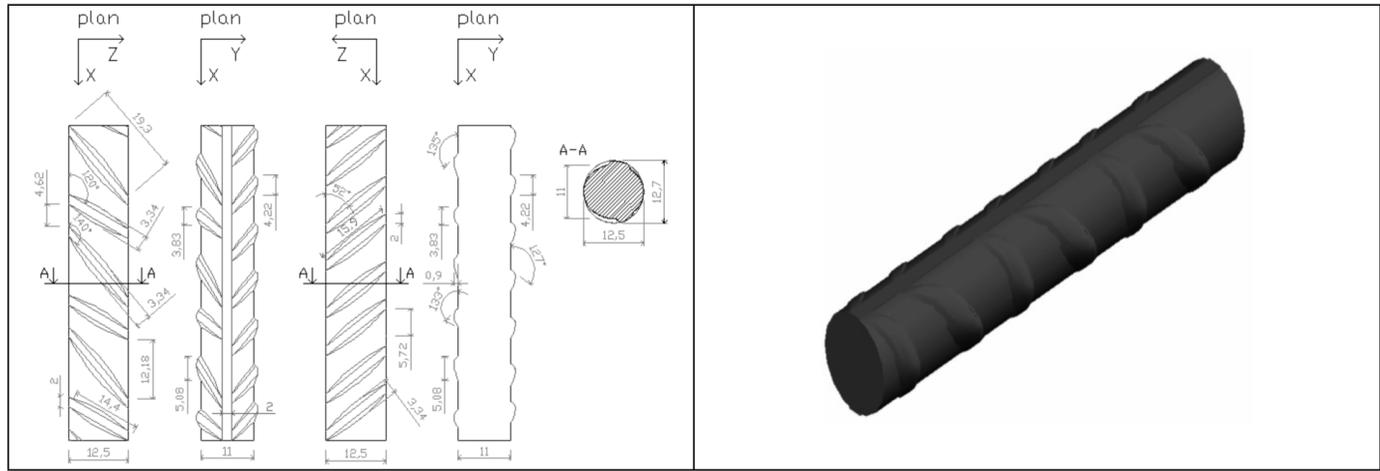


Fig.11 : Barre française

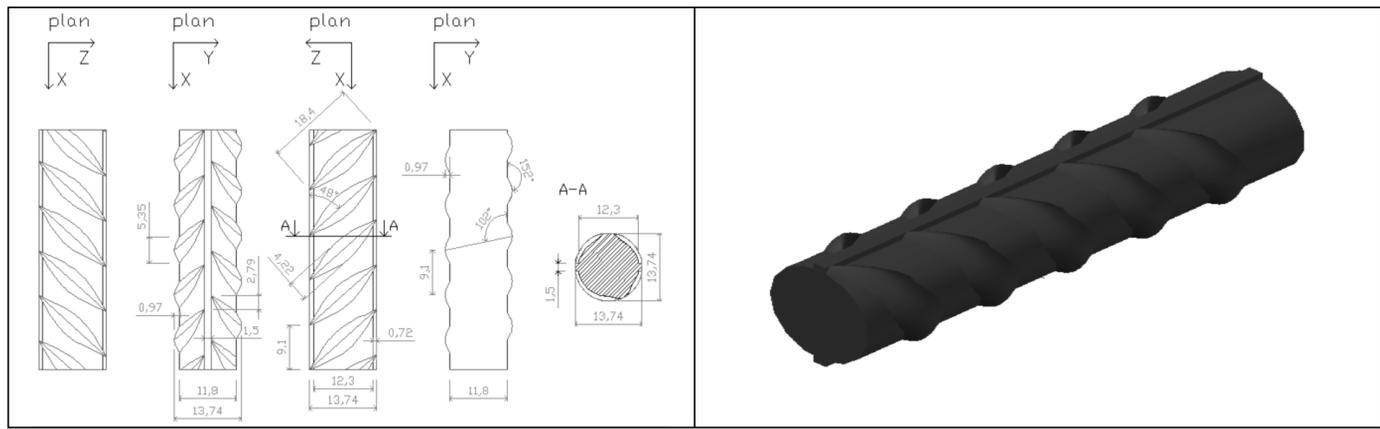


Fig.12 : Barre brésilienne

Barre	Diamètre nominal (mm)	ϕ (mm)	β (°)	S_r (mm)	A_r (mm ²)	(fR)
Tunisienne	12	11	58	8	33,64	0,088
Française	12	11	52	7	27,68	0,065
			60	21		
			40	21		
Brésilienne	12,5	11,8	48	9,1	35,90	0,068

Tableau 2 : Détermination des coefficients (fR)

en ingénierie, la technique de « scanner » laser tridimensionnel, qui permet de scanner plusieurs nuages de points. Le logiciel « Geomagic Studio 10 » permet de fusionner les nuages de points différents et enfin monter la pièce. Les auteurs ont calculé les coefficients f_R (tableau 3).

Barre	Diamètre nominal (mm)	(fR) (technique Scanner Laser)[12]	(fR) (méthode proposée)
Tunisienne	12	0,084	0,088
Française	12	0,070	0,065
Brésilienne	12,5	0,063	0,065

Tableau 3 : Résultats des coefficients f_R issus de la technique du Scanner Laser

D'après les résultats du tableau 3, les coefficients (fR) évalués à partir de la méthode proposée sont comparables avec ceux trouvés par Vale Silva B. et al. [12] utilisant la technique du Scanner Laser.

4. CONCLUSIONS

Les caractéristiques géométriques des barres d'acier utilisées comme armature pour les ouvrages en béton armé, sont couramment représentées par un coefficient (fR) appelé aire relative des verrous. Les codes de calcul, notamment l'Eurocode2 [11], soulignent l'importance de ce coefficient en recommandant des valeurs limites mini-





males à savoir 0,056 pour les barres de diamètre supérieur à 11mm.

Contrairement à la caractérisation mécanique des barres, la caractérisation géométrique n'est prise à sa juste valeur. Cette caractérisation est surtout nécessaire dans les usines de fabrication des armatures pour béton armé, pour des armatures provenant des marchés internationaux ou celles ayant subi des dégradations suite à une exposition à un environnement agressif.

Dans ce contexte, nous avons présenté une méthode de caractérisation simple d'application basée sur deux techniques à savoir la technique de l'empreinte bidimensionnelle et la technique de la photo-projection.

Ces deux techniques ont été appliquées sur trois types de barre ayant des géométries différentes (barre française, barre tunisienne et barre brésilienne).

Les résultats obtenus sont acceptables et comparables à ceux obtenus avec des techniques plus sophistiquées à savoir celles du scanner laser tridimensionnel.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ACI 408.2R-92 « State-of-the-art Report on Bond under Cyclic loads », Detroit, Mich. American Concrete Institute, 1992.
- [2] Rehm, G. (1961) "The fundamentals of bond between steel reinforcement and concrete", Deutsche association for steel reinforcement-concrete, N°=138, p.59, 1961
- [3] Leonhart, F; Mommig, E Construções de Concreto: Principos basicos do dimensionamento de estrutura de concreto armado. 1a Ed. Rio de Janeiro: interciência, vol. 1 e 3, 1977.
- [4] ACI 408.3-01/408.3R-01 « Splice and Development Length of High Relative Rib Area Reinforcing Bars in Tension (408.3-01) and Commentary (408.3R-01) », Detroit, Mich. American Concrete Institute, 2001.

- [5] Clark, A.P. "Comparative Bond Efficiency of Deformed Concrete Reinforcing Bars," ACI Journal, Proceedings Vol. 43, No. 41, Dec., pp. 381-400, 1946
- [6] Clark, A.P. "Bond of Concrete Reinforcing Bars," ACI Journal, Proceedings Vol. 46, No. 3, Nov., pp. 161-184, 1949
- [7] Hamad, B.S. Bond strength improvement of reinforcing bars with specially designed rib geometries. ACI Structural Journal, Vol. 92, no. 1, p 3-13, jan. 1995.
- [8] Lutz, L.A. ; "GERGLY, P. Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete." ACI journal proceedings, v.64, n.11, p.711-721, Nov. 1967.
- [9] Comité Euro-International du Béton, Paris, Bulletin n.1, Juil 1999.
- [10] Comité Euro-International du Béton, Paris, Bulletin n.2, Juil 1999.
- [11] Eurocode 2, EN 1992-1-1, Calcul des structures en béton, Partie 1-1.
- [12] Vale Silva, B., Caetano, L. F., Barbosa, M. P., Silva Jr, L.C.P., Lorrain, M. S., Gomes, L. E. S., Kindlein Jr., W. « Aderencia aco-concreto : analise geometrica experimental de armaduras de aco para construcao civil com o auxilio do scanner tridimensional a laser », Anais do 51° Congresso Brasileiro do concreto CBC2009, outubro 2009.





annonces de colloques

Appel à communications



COLLOQUE

MARDI 23 OCTOBRE 2012

PERFORMANCES DU BÉTON SOU MIS À HAUTE TEMPÉRATURE : DU MATÉRIAU À LA STRUCTURE

Langue de la conférence :
français (anglais accepté)

Université de Cergy-Pontoise, France

THÈMES

I. Influence de la formulation

sur le comportement au feu du béton

- Béton autoplaçant, Béton à hautes performances, Béton renforcé de fibres...
- Influence de la nature du granulat, (siliceux/calcaire, léger, recyclé...)
- Méthodes de mesure des propriétés du béton à haute température,
- Évolution de la microstructure de la pâte cimentaire (Portland, laitier...)

II. Structure en béton

- Évaluation de l'endommagement de structure après incendie
- Réparation de structure soumise à l'incendie
- Influence du chargement mécanique
- Résistance au feu de poteaux renforcés de composites
- Résistance au feu d'éléments préfabriqués

III. Modélisation numérique

- Modélisation de phénomènes couplés
- Prédiction du risque d'éclatement
- Modélisation et dimensionnement de structures

IV. Études de cas

- Protection des biens et coût économique
- Investigation *in situ*
- Retour d'expériences

CALENDRIER

- Avant le 30 mai 2012 :
Soumission des résumés (100 mots environ)
sur le site internet : www.betonfeu2012.com
- Le 30 juin 2012
Réponse aux auteurs
- Le 30 août 2012
Soumission de l'article (12 pages maxi)
sur le site internet : www.betonfeu2012.com
- Le 30 septembre 2012
Acceptation finale de l'article
- **Délai d'inscription : le 9 octobre 2012**

CONTACT

Serge Horvath : Président du comité d'organisation
Tél : 01 55 23 01 00
Courriel : s.horvath@cimbeton.net

CONTACT SCIENTIFIQUE

Albert Noumowé, L2MGC, Tél.: 01 34 25 69 16
Courriel : Albert.Noumowe@u-cergy.fr

SECRÉTARIAT DU COLLOQUE

Isabelle Collet, L2MGC, Tél.: 01 34 25 69 42
Courriel : Isabelle.Collet@u-cergy.fr

CONTEXTE ET ENJEUX

La sécurité incendie et les textes réglementaires sont en constante évolution grâce à la recherche et à l'analyse des catastrophes. La recherche sur le comportement des bétons à haute température nécessite d'être approfondie afin d'aboutir à des formulations de bétons plus performants et de renforcer les ouvrages. L'objectif de ce colloque est de réunir des experts nationaux et internationaux travaillant sur ce thème, de confronter les idées, de rassembler les connaissances et d'apporter des comptes rendus d'expériences sur les performances du béton soumis à une température élevée. Les idées retenues alimenteront un projet de recherche ambitieux pour une plus grande efficacité et une maîtrise du risque dans les ouvrages en béton.

COMITÉ D'ORGANISATION

Président : S. Horvath,
Membres : A-L. Beaucour, E. Bourdais-Massenet,
A. Cousture, G. Debicki, F. Delhomme, A. Noumowé.

COMITÉ DE LECTURE

Président : L. Izoret
Membres : A-L. Beaucour, M. Behloul, G. Debicki, C. Lanos,
S. Horvath, F. Meftah, A. Noumowé, P. Pimienta, F. Robert.

GRUPE TECHNIQUE D'EXPERTISE

E. Annerel, F. Benboudjema, J-A. Calgaro, H. Carré,
H. Colina, D. Cree, S. Dal Pont, F. Delhomme, E. Guillaume,
Y. Jaradeh, C. Laborderie, Y. Malecot, Y. Melinge,
B. Moreau, E. Ouedraogo, P. Pliya, P. Rivière, A. Sainrat,
G. de Schutter, A. Simon, M. Tancogne-Dejean,
H. Thonier, J-M. Torrenti, F. Skoczylas.

FRAIS D'INSCRIPTION

Les frais d'inscription couvrent : les actes du colloque,
la pause-café et le déjeuner.
Professionnels et universitaires : 100 € HT (119,60 € TTC)
Étudiants : gratuit

LIEU DU COLLOQUE

Université de Cergy-Pontoise,
Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil,
L2MGC, 5, Mail Gay Lussac,
Neuville sur Oise, Cergy-Pontoise.

Accès

- Transports en commun :
RER A (en direction de Cergy-Pontoise)
arrêt Neuville-Université (à 30 mn de La-Défense)
- En voiture : rue d'Eragny à Neuville sur Oise (95031).

Toutes les informations du colloque sont
sur le site internet : www.betonfeu2012.com





Casbah d'Alger



Port d'Alger



Makam Echahid

Alger

DATES IMPORTANTES

- Réception des résumés : **07 mars 2012**
- Notification d'acceptation des résumés : **21 mars 2012**
- Réception des articles : **15 Mai 2012**
- Notification d'acceptation des articles : **31 juillet 2012**



L'Université des Sciences et Technologies
Houari Boumediène, Alger
 Faculté de Génie Civil
Laboratoire LEEGO



En collaboration avec le Réseau

FRAIS DE PARTICIPATION

	Nationaux	Etrangers
Etudiants	1500 DA	50 €
Enseignants	3000 DA	80 €
Autre qualité	6000 DA	100 €

UNSAT-DZ

Organisent

Le 2^{ème} Colloque International

**Sols Non Saturés et
 Environnement**

UNSAT Alger 2012

Alger, 05 et 06 novembre 2012

CONTACT

Secrétariat de UNSAT Alger 2012
 Faculté de Génie Civil
 USTHB, Alger
 B.P. 32, El Alia 16111 Bab Ezzouar
 Tél (+213) (0) 21 24 72 24
 Fax (+213) (0) 21 24 79 14
 E-mail unsatalger@unsat-dz.org
unsatalger@gmail.com
 Site web <http://unsat-dz.org>

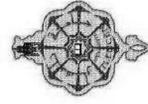
En partenariat avec

L'Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen
 Faculté de Technologie
Laboratoire EOLE



&

L'Université du Havre
 Laboratoire LOMC, CNRS UMR 6294



PRESENTATION ET OBJECTIFS

De part sa situation géographique et son climat, l'Algérie est un pays où l'ingénieur géotechnicien est confronté, au quotidien, aux effets de la non saturation du sol, qu'il soit utilisé comme matériau de construction (remblai routier, barrage, Centre de Stockage de Déchets, etc.), ou comme support de fondations (retrait gonflement du sol et son incidence sur les constructions). La recherche dans le domaine des sols non saturés a connu un développement considérable lors des trois dernières décennies. En Algérie, Le premier colloque international sur la thématique des sols non saturés a été organisé à Tlemcen en Octobre 2009 (UNSATlemcen'09). Il avait permis notamment de réunir les compétences au sein de la communauté scientifique algérienne dans ce domaine et de créer un cadre qui les rassemble et leur permet de collaborer dans un esprit de complémentarité : c'est le réseau unsat-dz (www.unsat-dz.org).

Le deuxième colloque international UNSAT-DZ se veut dans la continuité de celui de Tlemcen, il a pour objectif de renforcer le dialogue au sein de ce réseau et définir des projets scientifiques collaboratifs permettant de prendre en charge les problèmes endogènes liés à la problématique des sols non saturés et son impact environnemental.

THEMES

THEME 01

Comportement mécanique des sols non saturés
Aspects expérimentaux et modélisation du comportement des sols non saturés soumis à des sollicitations hydriques et mécaniques.

THEME 02

Transferts dans les sols non saturés

Transferts, écoulements et transport dans les sols non saturés. Mesure expérimentale et modélisation numérique.

THEME 03

Couplages dans les sols non saturés

Aspects expérimentaux et modélisation des sols non saturés introduisant les effets des couplages hydromécanique, thermomécanique, chemo-hydro-mécanique, etc.

THEME 04

Etude de cas in situ

Expérimentation in situ impliquant les effets de la non saturation. Validation de modèles de comportement, de codes de calcul et retour d'expérience.

COMITE SCIENTIFIQUE

ABOU-BEKR Nabil U. Tlemcen
ALALAL M. Amine U. Tlemcen
ARAB Ahmed U. Chlef
ARAB Rabah Huesker, France
BAHAR Ramdane USTHB, Alger
BERGA Abdelmadjid U. Béchar
BOUAFIA Ali U. Blida
DERRICHE Zohra ENTP, Alger
DJAMEI Mehrez ENTunis
FLEUREAU Jean-Marie EC Paris
FRY Jean-Jacques EDF-CIH
GUENFOUD Mohamed U. Guelma
HACHICHI Abdelkader UST Oran
HAMMOUD Farid U. Batna
HOXHA Dashnor U. Orléans
MEGHACHOU Mourad U. SBA
MEKERTA Belkacem ENSET Oran
MISSOUM Hanafi U. Mostaganem
MODARESSI Arézou EC Paris
NECHNECH Ammar USTHB, Alger
PANTET Anne U. Havre
SCHANZ Tom U. Bochum
TAIBI Saïd U. Havre
WANG Huaqing U. Havre
ZERHOUNI M. Idriss Fondasol, France

COMITE D'ORGANISATION

PRÉSIDENT: NECHNECH Ammar
ABOU-BEKR N. ABDELLI K.
AHMED CHAOUCH A. AISSIOU F.Z.
AIT MOKHTAR K. AKCHICHE M.
ALOUACHE F. AOUDJANE K.
BENELDJOUZI M. BENCHABA Z.
BENDAHGANE M. BOUGUEROUA A.
BOUHEDJA S. BOURABAH M.A.
CHALAH F. CHALAH L.
CHERFA H. CHIKHAOUI M.
DALI BRAHAM M. DJOUADI K.
HADDADI S. KAOUA F.
KENDEL A. MISSAOUI M.
SAOULA S. TAIBI S.



Organisé par



Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions – LMDC

INSA-UPS Génie Civil
135 Avenue de Rangueil
31077 Toulouse Cedex 4 France
<http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/>

Avec le soutien de l'AUGC

Toulouse

Entre Océan Atlantique et Mer Méditerranée, Toulouse, capitale de Midi Pyrénées, compétitive sur le plan économique et dynamique sur le plan culturel, séduit chaque année 15000 nouveaux arrivants. L'Université de Toulouse, qui réunit l'ensemble des Universités et des Ecoles d'ingénieurs de Midi-Pyrénées, y occupe une place de choix : plus de 90 000 étudiants inscrits dans plus de 500 offres de diplômes (Licences, Masters, Doctorats), dont 15% d'étudiants qui viennent de l'étranger, plus de 5000 doctorants regroupés dans les 15 Ecoles Doctorales du site...

A noter que Midi-Pyrénées occupe le 1er rang des régions françaises pour son soutien à la recherche avec 4,1% de son PIB consacré à la Recherche, au Développement et à la Valorisation (près du double de la moyenne européenne !).

Sponsors

A venir...

Inscriptions

- L'inscription comprend les actes de la conférence (clé USB), les pauses café, les lunchs et le repas de gala du 19 au soir.
- Les auteurs doivent soumettre un **résumé** d'une page pour le **30 Avril 2012** et l'**article définitif** pour le **29 juin 2012**. Les articles pourront être présentés en séance (supports powerpoint) ou sous forme de poster. Toutes les soumissions doivent être envoyées par courrier électronique à : NoMaD@insa-toulouse.fr.

- Plus de détails sur le site web :

<http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/NoMaD/inscription.htm>

Tarifs

19 – 20 Novembre	2012	€/pers.
Conférence	Membre AUGC	250
	Autres	300
	Doctorants	290
Accompagnants		340
Diner de Gala		150
		40

- Les paiements peuvent être réalisés par transfert ou par VISA/EuroCard/MasterCard.
- Une liste d'hôtels est disponible sur le site de la conférence :

<http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/NoMaD/accueil.htm>



CONFERENCE INTERNATIONALE FRANCOPHONE

Nouveaux Matériaux et Durabilité

19-20 Novembre 2012, Toulouse, France



Bienvenue

L'Association Universitaire de Génie Civil (**AUGC**), fondée en 1981, a pour mission de développer et de promouvoir l'enseignement et la recherche dans le domaine du Génie Civil. Elle établit des liaisons avec les autres groupements ou associations qui participent au développement du Génie Civil et de ses spécialités, facilite la coopération internationale, identifie les débouchés professionnels des diplômés et stimule les contacts entre ses membres.

Si l'AUGC est connue pour organiser chaque année les Rencontres Universitaires du Génie Civil, elle soutient aussi des manifestations scientifiques en collaboration avec d'autres associations, groupements, ou laboratoires. Ces manifestations concernent des domaines plus ciblés que ceux couverts lors des Rencontres. C'est le cas de ce colloque « **NoMaEd** » organisé par le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de Toulouse.

Le LMDC est un laboratoire universitaire de recherche dans le domaine de la science des matériaux du génie civil créé il y a 25 ans à Toulouse. A partir d'une recherche pluridisciplinaire, et en conduisant des travaux tant sur le plan expérimental que numérique, il propose des solutions scientifiques permettant un développement durable et une gestion éco-responsable du patrimoine immobilier : infrastructures de génie civil et habitat.

Dans ce but, il développe des matériaux innovants pour le Génie Civil, il améliore la compréhension et la modélisation des phénomènes physico-chimiques pouvant nuire à la durabilité des matériaux de construction, il met au point des méthodologies et des techniques pour la requalification, le diagnostic, et la maintenance des ouvrages existants.

Ces objectifs définissent ses trois pôles de recherche :

- Pôle 1 : Matériaux innovants pour le Génie Civil
- Pôle 2 : Durabilité des matériaux et des ouvrages
- Pôle 3 : Requalification, diagnostic et maintenance

Conférence

La conférence abordera 4 thèmes :

Eco-matériaux

La prise en compte du développement durable dans la construction, en accord avec le Grenelle Environnement requiert la création de nouveaux matériaux ou d'optimiser des matériaux existants. Ce thème traite du développement et de l'utilisation de matériaux, d'origine minérale ou organique, permettant de diminuer l'impact environnemental des matériaux de construction

Sous-produits

Plusieurs sous-produits sont actuellement valorisés et normalisés dans les matériaux (granulats recyclés, laitiers de hauts-fourneaux, cendres volantes, fumées de silice). Certains permettent d'améliorer et d'optimiser les performances des ciments et des bétons, d'autres sont potentiellement valorisables : fines de bétons recyclés, sédiments, cendres d'incinération, etc. Ce thème inclut la caractérisation et l'utilisation de sous-produits dans les matériaux de construction, y compris les applications routières.

Indicateurs de durabilité

Les indicateurs de durabilité et les essais de témoins de durée de vie sont devenus des outils au dimensionnement des structures en béton. Outre les dernières avancées en terme de développement d'essais, ce thème s'intéresse aux démarches performantielles qui se mettent en place en accord avec la norme NF EN 206-1 ainsi qu'aux approches probabilistes, permettant de prendre en compte en particulier la variabilité du béton.

Confort et santé

Confort et santé des occupants sont des paramètres indispensables à considérer lors de la formulation ou du choix des matériaux de construction. Ce thème traite de leur impact sanitaire (évaluation de la qualité de l'air, présence de flore microbienne ou d'agents potentiellement toxiques) et de leur impact sur le confort (mesure, compréhension et modélisation des propriétés hygrothermiques).

Comité d'organisation

- Prof. Gilles Escadellias, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Prof. Ginette Arliguie, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Prof. Martin Cyr, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Prof. Anaclet Turatsinze, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Dr. Alexandra Bertron, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Dr. Laurie Buffo-Lacarrière, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Dr. Marie Coutand, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Dr. Stéphane Multon, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Dr. Jérôme Verdier, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Dr. Thierry Vidal, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Dr. Céraldine Cazaux-Ginestet, LMDC INSA, Toulouse
- Dr. Thomas de Larrard, LMDC, INSA-UPS, Toulouse
- Marie Ange Albouy, Cellule congrès DSL UPS, Toulouse

Comité scientifique

A venir...



PROJET

Appel à communications

ASSISES DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

Comment influencer sur son avenir ?

20 et 21 mars 2013 à l'ENS de Cachan*

C'est la deuxième fois en France que sont organisées les Assises de la Construction Métallique.

Comme pour la première édition qui s'était tenue en mars 2009, elles ont pour objectif de mettre en synergie les professionnels des entreprises de construction métallique, des bureaux d'ingénierie, des bureaux de contrôle, les prescripteurs, les créateurs et distributeurs d'outils de conception et les entreprises sidérurgiques avec tous les enseignants de formation initiale ou continue. Elles visent aussi à faciliter les échanges entre ces deux mondes complémentaires que sont l'enseignement et la profession.

Ces assises sont destinées à rassembler **tous les acteurs** de ce secteur industriel et tous les formateurs du domaine, pour partager des expériences, faire le point de l'utilisation des Eurocodes en entreprise mais aussi de leur enseignement dans les écoles, quel que soit le niveau, en analyser les conséquences et les besoins créés au plan pédagogique comme au plan professionnel.

Elles concernent aussi bien les lycées, les CFA, les universités et écoles d'ingénieurs, que les entreprises qui recrutent les diplômés. Elles visent aussi bien la formation initiale que la formation continue.

Les conférences auront une durée de quinze à vingt minutes. Nous vous remercions de nous transmettre vos propositions de communications s'inscrivant dans l'un des thèmes indiqués ci-après, **avant le 1^{er} décembre 2012**. Les sujets auront tous une relation avec l'enseignement de la Construction Métallique ; les conférenciers seront des constructeurs, des ingénieurs, des architectes, des fabricants de produits en acier, des enseignants... Toutes propositions, questions ou suggestions doivent être adressées directement à Marie-Christine Ritter (mcritter@construiracier.fr).

Nous vous remercions par avance pour votre participation, vos contributions et apports, qui nous aideront à faire des Assises de l'Enseignement de la Construction métallique un moment fort qui marquera nos professions.

Jean-Pierre MUZEAU
Président

*61, avenue du Président Wilson – 94230 CACHAN (France)





PROJET

ASSISES DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

THÈMES PROPOSÉS

Formation et entreprises

- Analyse des besoins des entreprises
- Relations écoles/entreprises pour les enseignants, les élèves et pour les professionnels
- Place, nature et durée des stages dans les formations
- Comment transmettre le bon sens, les ordres de grandeurs, les bases d'esprit critique ?
- Bilan de l'application des Eurocodes en entreprise

État des lieux de la formation en Construction Métallique en France et dans les autres pays européens

- Formation initiale, formation continue et formation en alternance
- Enseignement de projets, de fabrication et/ou de laboratoire
- Besoins en matière de formation des enseignants
- Formations professionnelles de niveau V (CAP et BEP) et IV (Bac Professionnel)
- Formations des techniciens supérieurs STS et IUT
- Formations LMD et évolution des contenus
- Plateformes Internet de partage d'informations
- Développement durable et soutenabilité

Réglementation

- L'enseignement des Eurocodes : évolutions nécessaires des programmes
- Influence des Règles RT 2012, 2015 et 2020 ?
- Résistance aux séismes, à l'incendie, aux vibrations
- Conséquences au niveau des pré-requis et de l'adaptation des programmes pédagogiques

Outils pédagogiques

- Retour d'expérience dans la création et l'utilisation de dispositifs expérimentaux utiles à l'enseignement des nouveaux concepts
- Outils pédagogiques disponibles et identification des besoins
- Comment utiliser l'informatique dans l'enseignement ?
- Actualisation des connaissances
- e-learning
- Apports de l'APK





ASSISES DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

APPEL A COMMUNICATIONS

- Date limite pour l'envoi des résumés : **1^{er} décembre 2012**
- Acceptation des résumés par le comité scientifique : **2 janvier 2013**
- Les résumés des communications ne devront pas dépasser 300 mots et être rédigés en français.

COMITÉ DE DIRECTION

- Patrick Aveline (en remplacement de Patrick Bet)
- Alain Cointe
- Jean Coudroy
- Patrick Girot
- Jean-Pierre Muzeau

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Le comité scientifique est composé des membres du conseil d'administration de l'APK :

- Patrick Aveline, IEN, pour le ministère de l'éducation nationale
- Pierre Bourrier, ArcelorMittal, pour les sidérurgistes
- Alain Cointe, IUT de Bordeaux, pour les IUT
- Jean Coudroy, ENS Cachan, pour les établissements de formation des enseignants
- Laurence Davaine, Ingérop, pour les bureaux d'études
- Dominique Dhier, SMB CM pour les entreprises de construction métallique
- Patrick Girot, Lycée Claveille de Périgueux pour les sections BTS
- Christelle Gress, INSA Strasbourg, pour les écoles d'architecture
- Thierry Kesseinheimer, pour le ministère de l'éducation nationale
- Patrick Le Chaffotec, pour le CTICM
- Jean-Pierre Muzeau, pour les écoles d'ingénieurs
- Federico Mazzolani pour les membres internationaux
- Christophe Ménage, ConstruirAcier
- Joëlle Pontet, ConstruirAcier
- Jean-Pierre Tahay, Viry SA, pour les entreprises de construction métallique
- Bathylle Verley, Terrell, pour les bureaux d'études

COMITÉ D'ORGANISATION

- Jean Coudroy (ENS Cachan)
- Christophe Ménage (ConstruirAcier)
- Marie-Christine Ritter (ConstruirAcier)

CONTACT

- Marie-Christine RITTER
- Coordonnées : Tél. : 33 (0) 1 55 23 02 30 - Fax : 33 (0) 1 46 92 05 28
Email : mcritter@construiracier.fr