

ANNALES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

VOL. 71 – N° 5-6

ISSN : 1270-9840
CPPAP : 0721T77866

PRIX : 27,44 €

L'EFFET DE LA CORROSION SOUS CHARGEMENT SUR LE COMPORTEMENT DES POUTRES À L'ÉTAT LIMITÉ DE SERVICE



ANALYSE DU RETRAIT TOTAL À LONG TERME DU BÉTON À HAUTE RÉSISTANCE CONTENANT DES FIBRES SOUS DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES DE CURE



PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES BÉTONS INCORPORANT DE GRANULATS PLASTIQUES DE TYPE PEHD OU PET ISSUS DE BOUTEILLES RECYCLÉES



RÉPONSE DU BÉTON MOUSSE SOUS L'EFFET D'UNE SOLICITATION DYNAMIQUE : ONDE DE CHOC ET IMPACT BALISTIQUE



Effets de l'incorporation des granulats de caoutchouc sur le comportement des bétons autoplaçants vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe

Effet de hautes températures sur l'évolution de la microstructure d'une pâte de ciment âgée de 2 ans à travers des essais thermogravimétriques

Influence de la porosité sur les caractéristiques mécaniques du béton incorporant des déchets de briques concassés

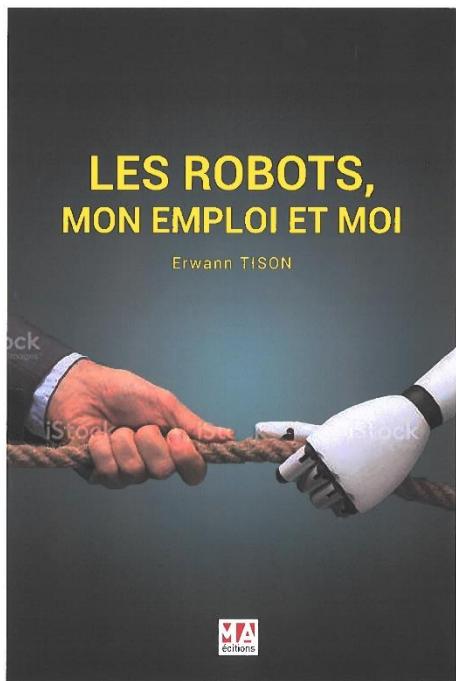
Caractéristiques mécaniques d'un béton classique allégé par l'ajout de pailles traitées



Editions
ESKA

LES ROBOTS, MON EMPLOI ET MOI

Erwann TISON



En librairie

« *Les robots vont-ils me piquer mon job ?* ». De plus en plus de salariés s'inquiètent des effets du numérique sur leur emploi. Intelligence artificielle, robotique, blockchain : la 4^{ème} révolution industrielle est une révolution protéiforme, puissante, multi sectorielle dont les effets sont aujourd'hui encore assez flous. Une chose est néanmoins certaine, de nombreux emplois vont disparaître, et contrairement aux autres révolutions industrielles, les personnes touchées ne seront pas uniquement les moins qualifiées : en plus des manutentionnaires, des hôtes de caisse et des secrétaires, le numérique pourrait bien faire disparaître les médecins, les avocats, et les banquiers.

Loin des discours anxiogènes, cet ouvrage s'intéresse concrètement aux métiers qui vont disparaître en estimant le nombre d'actifs pouvant perdre leur emploi. Mais il ne s'arrête pas aux constats, il propose aussi trois pistes de réformes concrètes, à court, moyen et long terme, afin de faciliter l'émergence de nouveaux emplois n'existant pas encore. Les transformations technologiques en cours vont entraîner des bouleversements inédits pour notre société. Les anticiper au mieux, sera la meilleure façon de s'y préparer.

BON DE COMMANDE

Je désire recevoir exemplaire(s) de l'ouvrage : « **LES ROBOTS, MON EMPLOI ET MOI** » - 170 pages -
Code ISBN 978-2-8224-0584-3 - Référence 2223391

Prix : 19,90 € + 1,00 € de frais de port, soit € x exemplaire (s) = €

Je joins mon règlement à l'ordre des Editions ESKA : chèque bancaire

Carte Bleue Visa n° Date d'expiration :
 Signature obligatoire :

par Virement bancaire au compte des Editions ESKA
Etablissement BNP PARIBAS – n° de compte : 30004 00804 00010139858 36
IBAN : FR76 3000 4008 0400 0101 3985 836 BIC BNPAFRPPPCE

Je souhaite recevoir une Convention de formation

Société / Nom, prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays :

Tél. : Fax : E-mail :

Veuillez retourner votre bon de commande accompagné de votre règlement à l'adresse suivante :

MA Editions - ESKA – Contact : adv@eska.fr

12, rue du Quatre Septembre – 75002 Paris - France - Tél. : 01 42 86 55 75 - Fax : 01 42 60 45 35

ISSN : 1270-9840

SÉRIE BIMESTRIELLE n° 5-6/2019

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

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Serge KEBABTCHIEFF

Rédaction

Rédacteur en chef
François Buyle-Bodin,
université de Lille

Représentant l'Ifsttar

Jean-Luc Clément, direction scientifique

Représentant l'Union des Ingénieurs et Scientifiques Francophones UISF

Elie Absi, président

Relations internationales

Zoubeir Lafhaj, École Centrale de Lille

ABONNEMENT :

<http://www.eska.fr>

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@eska.fr

PUBLICITÉ - à la rédaction

IMPRESSION : Imprimé en France

SOMMAIRE

JNB'19

éditorial

Prof. François BUYLE-BODIN

* * * *

Introduction - Programme	8
Session 1 : Comportement du béton frais & Bétons autoplaçants	
Effets de l'incorporation des granulats de caoutchouc sur le comportement des bétons autoplaçants vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe	10
<i>Behavior of self-compacting rubberized concrete exposed to external sulfate attack</i>	
MALLEK JIHEN, DAOUD ATEF, OMIRINE METALSSI OTHMAN, LOULIZI AMARA	
Session 2 : Durabilité des structures en béton	
L'effet de la corrosion sous chargement sur le comportement des poutres à l'état limite de service	15
<i>The effect of corrosion under load on the serviceability behavior of reinforced concrete beams</i>	
HARICHE LAZHAR, KENAI SAID, BOUHICHA MOHAMED, BALLIM YUNUS	
Effet de hautes températures sur l'évolution de la microstructure d'une pâte de ciment âgée de 2 ans à travers des essais thermo-gravimétriques	20
<i>Effect of high temperatures on the evolution of the 2-year-old cement paste microstructure through thermo-gravimetric tests</i>	
SABEUR HASSÈNE	
Analyse du retrait total à long terme du béton à haute résistance contenant des fibres sous différentes températures de cure	25
<i>Analysis of the long-term total shrinkage of high-strength concrete containing fibers under different curing temperatures</i>	
BOUZIADI FARID, BOULEKBACHE BENSAID, HADDI ABDELKADER, HAMRAT MOSTEFA, DJELAL CHAFIKA, LAHMAR NASSIRA	
Session 3 : Bétons à base de déchets ou de granulats recyclés	
Propriétés physiques et mécaniques des bétons incorporant de granulats plastiques de type PEHD ou PET issus de bouteilles recyclées	30
<i>Physical and mechanical properties of concrete containing HDPE or PET plastic aggregates issued from recycled bottles</i>	
SAIDANI KHALED, AJAM LASSAD, MILED KARIM	
Influence de la porosité sur les caractéristiques mécaniques du béton incorporant des déchets de briques concassées	36
<i>Influence of porosity on the mechanical characteristics of concrete incorporating crushed brick waste</i>	
BEN ACHOUR WAFIA, EL EUCH KHAY SALOUA, MILED KARIM, NEJI JAMEL	
Session 5 : Bétons légers et Bétons fibrés	
Réponse du béton mousse sous l'effet d'une sollicitation dynamique : onde de choc et impact balistique	42
<i>Blast and ballistic loading on foam concrete: Experimental approach</i>	
BEN YOUSSEF MARWA, SIALA AHMED, OUSJI HAMZA, MILED KARIM, NEJI JAMEL	
Caractéristiques mécaniques d'un béton classique allégé par l'ajout de pailles traitées	47
<i>Mechanical characteristics of a classic concrete lightened by straws</i>	
TRABELSI ABDERRAOUF, KAMMOUN ZIED	
bulletin d'abonnement	2
abstracts — résumés.....	4
communiqués et colloques.....	52
recommandations aux auteurs.....	C3

Responsables des rubriques

Marwan AL HEIB

INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des Risques) et Ecole des Mines de Nancy

Spécialité : Risques Naturels, Ouvrages et Stockages

Gabriel J. ASSAF

Département de génie de la construction, École de technologie supérieure Québec, Canada

Spécialité : Transports terrestres, infrastructures et milieux bâties

Mongi BEN OUEZDOU

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, (ENIT) Université de Tunis El Manar (UTM), Tunisie

Spécialité : Pathologie des constructions, nouveaux matériaux, restauration des monuments historiques

Lamine DIENG

IFSSTAR, laboratoire des structures métalliques et à câble, département Matériaux & Structures, Nantes, France

Spécialité : Structures métalliques et à câbles

Chafika DJELAL DANTEC

Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement LGCgE, Université d'Artois, Béthune, France

Spécialité : Rhéologie des bétons, matériaux composites

Raoul FRANCOIS

INSA de Toulouse, département Génie Civil, Toulouse, France

Spécialité : Corrosion et maintenance des structures en béton armé

Hocine HAMMOUM

Département de Génie Civil, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Algérie

Spécialité : Comportement et dimensionnement des structures soumises à des séismes

Said KENAI

Laboratoire Matériaux et Génie Civil, département Génie Civil, université de Blida, Algérie

Spécialité : Mortiers et bétons, liants alternatifs

Pierre-Yves OLLIVIER

Ingénieur expert Structures, Nantes, France

Spécialité : Structures

Isabelle OUSSET

IRSTEA Unité de Recherche ETNA, Grenoble, France

Spécialité : Structures de protection contre les aléas naturels

Bachir REDJEL

Laboratoire de Génie Civil, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie

Spécialité : Matériaux composites et alternatifs

Hassène SABEUR

Ecole Polytechnique de Tunisie (EPT) - Université de Carthage.

La Marsa, Tunisie

Spécialité : Mécanique du béton

Mohsen TENNICH

Institut supérieur des études technologiques de Radès, Tunisie

Spécialité : Matériaux alternatifs du béton



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 2020** (6 numéros/an) à la revue « *Annales du BTP* » :

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE individuel (TTC) : 274 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER individuel (HT) : 333 € |
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE institution (TTC) : 344 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER institution (HT) : 396 € |

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

N° 5-6 / 2019

LISTE DES ANNONCEURS

Annonces de colloques : IABSE, Belgium, 13-14 March 2020, p. 52

XVI^e Forum Biodéterioration des Matériaux, IUT Cherbourg-Manche, 18-19 juin 2020, p. 57

74th RILEM Annual Week, incorporating the 40th Cement and Concrete Science Conference, The Diamond, University of Sheffield, 31 August – 4 September 2020, p. 59

éditorial

Le présent numéro reprend des présentations des 4^{es} journées nationales du béton JNB'19 qui se sont tenues à Hammamet en Tunisie fin avril 2019. La sélection a été faite conjointement par les organisateurs et le comité éditorial des Annales du BTP.

Comme il y a deux ans pour les JNB'17, les présentations étaient proposées par des collègues tunisiens, algériens et français. Cinq sessions regroupaient chacune de 3 à 5 articles :

- Comportement du béton frais & Bétons autoplaçants ;
- Durabilité des structures en béton ;
- Bétons à base de déchets ou de granulats recyclés ;
- Caractérisation et modélisation du comportement du béton durci ;
- Bétons légers et Bétons fibrés.

Ces journées sont un révélateur de la qualité des recherches sur le béton mené en Afrique du Nord.

Je vous souhaite une bonne lecture.

**Le rédacteur en chef.
Prof. François BUYLE-BODIN**

résumés – abstracts

EFFETS DE L'INCORPORATION DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC SUR LE COMPORTEMENT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS VIS-À-VIS DE L'ATTAQUE SULFATIQUE EXTERNE

MALLEK JIHEN, DAOUD ATEF, OMIKRINE
METALSSI OTHMAN, LOULIZI AMARA

La valorisation des pneus usagés dans un béton auto-plaçant (BAP) peut préserver d'une part l'environnement en limitant la mise en décharge de ses déchets dangereux et d'autre part en gardant les ressources naturelles en granulats. Cependant, peu de recherches ont été réalisées sur le comportement de ces types de béton vis-à-vis de leurs expositions à des environnements agressifs tels que les milieux riches en sulfates. Pour étudier le comportement de ces bétons vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe (ASE), quatre formulations de BAP, dans lesquels les granulats naturels ont été substitués par des particules de caoutchouc (GC) à des teneurs volumiques de 5, 10 et 15%, ont été analysées et discutées.

Les résultats trouvés montrent que les masses des différents bétons augmentent d'une façon identique. Par ailleurs, l'expansion des bétons à base de 15% de GC, après 160 jours d'essai, est plus rapide et importante que celle des autres formulations (5% et 10% de GC) et du béton de référence (0% de GC). A ce stade d'essai, on est toujours dans la période de latence où l'expansion est relativement faible. Dans le cas où la teneur des GC est de 15%, l'examen visuel indique que la dégradation autour des GC est plus prononcée.

BEHAVIOR OF SELF-COMPACTING RUBBERIZED CONCRETE EXPOSED TO EXTERNAL SULFATE ATTACK

MALLEK JIHEN, DAOUD ATEF, OMIKRINE
METALSSI OTHMAN, LOULIZI AMARA

Over the past decades, rapid growth in automobile industry has resulted in a major environmental and health problems related to accumulated waste tires. For that reason, several civil engineering researchers studied the feasibility of using waste tires in different construction applications. One of those applications is to incorporate waste tires' particles in replacement of natural aggregates in the production of ordinary concrete and self-compacting concrete (SCC). A lot of studies were devoted to investigate the mechanical properties of SCC incorporating waste rubber, but there is still a lack in the existing literature on the durability of SCC against sulphate attack. This paper compares the behaviors of different SCRC mixes containing different rubber contents were exposed to external sulfate attack to those of a reference SCC. The testing program included tests in the fresh state specific to SCC, compressive strength tests, and several tests to determine the performance of the studied mixes before and after exposure to external sulfate attack. These tests included the evolution of mass and an expansion test. It

is observed that increase in rubber content leads to decrease in fresh and hardened properties of SCC such as the flowing ability, the passing capacity, the density and compressive strength. Results of the different performed tests showed that the mix incorporating 15% waste rubber performed similar to the control mix (0% rubber) in terms of the gain in weights. At this stage (after 160 days), it could be concluded that the expansion of concrete samples is relatively low. Moreover, the mix incorporating 15% waste rubber visually shows a more pronounced degradation around the rubber particles.

L'EFFET DE LA CORROSION SOUS CHARGEMENT SUR LE COMPORTEMENT DES POUTRES À L'ÉTAT LIMITÉ DE SERVICE

HARICHE LAZHAR, KENAI SAID, BOUHICHA
MOHAMED, BALLIM YUNUS

La corrosion des armatures dans le béton est l'une des causes principales de la détérioration et de la réduction de la durée de vie des structures en béton armé. Ce travail présente une investigation expérimentale de l'effet de la corrosion des armatures sur le comportement en service des poutres en béton armé sous chargement. Les principaux paramètres étudiés sont le choix et la disposition de ferraillage longitudinal inférieur et le niveau de chargement à l'état limite de service. Quatre séries de poutres sont testées (six poutres pour chaque série, trois poutres soumises à la corrosion accélérée et les trois autres ne sont pas soumises à la corrosion). Toutes les poutres sont soumises à l'essai de flexion quatre-points durant le processus de corrosion des armatures. Le choix et la disposition de ferraillage longitudinal inférieur de la quatrième série est identique à la première série, mais une charge de service plus importante est appliquée pour les autres séries. La corrosion des barres tendues des poutres est accélérée par l'application d'un courant électrique continu et les poutres sont immergées dans une solution de chlorure de sodium de 3% de concentration massique. Les résultats montrent l'évolution de la corrosion des armatures et la flèche des poutres sous chargement mécanique et corrosion simultanés. Les déformations des poutres augmentent avec l'accroissement du taux de corrosion principalement durant les étapes initiales de corrosion, qui engendre la propagation des fissures longitudinales dues aux contraintes du gonflement des produits de corrosion. Enfin, l'effet de la disposition des armatures dans les sections de béton est discuté.

THE EFFECT OF CORROSION UNDER LOAD ON THE SERVICEABILITY BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

HARICHE LAZHAR, KENAI SAID, BOUHICHA
MOHAMED, BALLIM YUNUS

The main cause of deterioration and reduction of the service life of reinforced concrete structures is the corrosion of reinforcement

in concrete. This paper presents an experimental investigation of the effect of reinforcement corrosion on the serviceability behavior of reinforced concrete beams under load. The main parameters investigated are the effects of reinforcement arrangement and the magnitude of the sustained load. Four series of scaled beams were tested, each series containing six beams, three of which were subjected to reinforcement corrosion while the other three were used as un-corroded control beams. All these beams carried the same sustained load during the process of reinforcement corrosion. The reinforcement arrangement for the fourth test series was identical to the first series but these beams carried a higher sustained test load. All the beams were subjected to a four-point bending load arrangement. Corrosion of the tension reinforcement was accelerated using an impressed current while the soffits of the beams were immersed in a 3% sodium chloride solution. The evolution of reinforcement corrosion and central deflection under simultaneous load and corrosion is given. The deflections of the beams increase with progressive corrosion of the reinforcement especially during the early stages of corrosion as a result of propagation of transverse cracks and the expansive stresses induced by the corrosion products. The importance of the arrangement of the steel in the section of concrete on the performance in terms of deflection was also clarified.

EFFET DE HAUTES TEMPÉRATURES SUR L'ÉVOLUTION DE LA MICROSTRUCTURE D'UNE PÂTE DE CIMENT ÂGÉE DE 2 ANS À TRAVERS DES ESSAIS THERMO- GRAVIMÉTRIQUES

SABEUR HASSÈNE

Cet article étudie les modifications microstructurales d'une pâte de ciment âgée de deux ans chauffée à des températures allant jusqu'à 1000°C par paliers de 100°C maintenus 6 heures et refroidie à l'air libre par des essais TGA / DTG. L'impact du vieillissement sur la microstructure des échantillons chauffés à de hautes températures est analysé par comparaison avec une pâte de ciment durcie dans des conditions normales et âgée de 28 jours. Les résultats montrent des quantités plus élevées de portlandite et de carbonate de calcium pour la pâte de ciment vieillie. La nouvelle portlandite formée pendant le refroidissement continue d'exister jusqu'au plateau de température de 1000°C. Cette portlandite peut être considérée comme l'indicateur le plus important pour déterminer l'histoire de température d'un béton après exposition à un incendie.

EFFECT OF HIGH TEMPERATURES ON THE EVOLUTION OF THE 2-YEAR-OLD CEMENT PASTE MICROSTRUCTURE THROUGH THERMO- GRAVIMETRIC TESTS

SABEUR HASSÈNE

This article investigates the microstructural changes of a two-year old cement paste heated up to various temperature regimes up to 1000°C in 100°C increments held for 6 hours and cooled in the open air, using thermal analysis technique. The impact of aging on the microstructure of heated samples

at high temperatures is analyzed by comparison with a fresh cement paste. The results show higher amounts of portlandite and calcium carbonate for the aged cement paste. The new portlandite formed during cooling continues to exist up to the temperature plateau of 1000 °C. This portlandite may be considered the most important indicator for determining the temperature history of a concrete after exposure to a fire.

ANALYSE DU RETRAIT TOTAL À LONG TERME DU BÉTON À HAUTE RÉSISTANCE CONTENANT DES FIBRES SOUS DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES DE CURE

BOUZIADI FARID, BOULEKBACHE BENSAID,
HADDI ABDELKADER, HAMRAT MOSTEFA,
DJELAL CHAFIKA, LAHMAR NASSIRA

L'étude présente un travail expérimental sur le retrait total des bétons à hautes résistances (BHR) contenant des fibres métalliques (FM) ayant deux élancements (55 et 80), des fibres polypropylènes (FP) et des fibres hybrides (FH), et exposés à des températures de cure isothermes de 20 °C, 35 °C et 50 °C. Deux dosages massiques en fibres ont été utilisés, à savoir 0.5% et 1% pour les fibres métalliques (FM), 0.1% et 0.2% pour les fibres en polypropylène (FP) et une hybridation de 0.5% de FM et 0.1% de FP. L'objectif du travail est d'évaluer l'influence de la température de cure, des différents types de fibres, leur dosage et leur élancement sur le retrait total du béton. Les résultats obtenus montrent que l'addition des fibres améliore la stabilité dimensionnelle de manière significative. En outre, l'hybridation des fibres diminue la déformation du retrait total par rapport aux fibres métalliques ou en polypropylène seules. Enfin, cette étude a montré que la réduction du retrait total est proportionnelle à la température de cure.

ANALYSIS OF THE LONG-TERM TOTAL SHRINKAGE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE CONTAINING FIBERS UNDER DIFFERENT CURING TEMPERATURES

BOUZIADI FARID, BOULEKBACHE BENSAID,
HADDI ABDELKADER, HAMRAT MOSTEFA,
DJELAL CHAFIKA, LAHMAR NASSIRA

The present experimental work is carried out to study the evolution of the total shrinkage of high strength concrete (HSC) containing steel fibers (SF) with aspect ratios (55 and 80), polypropylene fibers (PF) and hybrid fibers (HF), exposed to isothermal cure temperatures of 20 °C, 35 °C and 50 °C. Two fiber dosages are used, 0.5% and 1% for the steel fibers, 0.1% and 0.2% for the polypropylene fibers and hybridization of 0.5% for SF and 0.1% for PF. The objective of this work is to evaluate the influence of the curing temperature, the different types of fibers, their dosages and their aspect ratios on the total shrinkage of concretes by using a new approach of discussion. The obtained results show that the addition of the fibers improves the volume stability. Also, the hybridization of the fibers decreases the total shrinkage deformation compared to mono-fibers. The reduction in total shrinkage is proportional to the curing temperature.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES BÉTONS INCORPORANT DE GRANULATS PLASTIQUES DE TYPE PEHD OU PET ISSUS DE BOUTEILLES RECYCLÉES

SAIDANI KHALED, AJAM LASSAD, MILED KARIM

Dans la présente étude, on s'intéresse à la caractérisation mécanique des bétons incorporant de granulats en plastique en substitution aux granulats naturels. En effet, nous avons utilisé deux types de granulats plastiques : le premier étant des granulés sphériques de polyéthylène à haute densité « PEHD » et le deuxième est obtenu à partir de déchiquetés de bouteilles usagées en poly téraphthalate d'éthylène « PET » ayant une forme aplatie et irrégulière. A partir d'une formulation de béton hydraulique ordinaire de référence, nous avons substitué les granulats naturels, sable et gravier par différents taux volumiques de granulats plastiques. Les résultats expérimentaux ont montré que l'incorporation de granulats de plastique dans le béton affecte négativement ses propriétés mécaniques, en particulier son module d'Young et sa résistance à la compression. En outre, cette étude a montré que le comportement mécanique des bétons incorporant des granulats en PET est différent de celui des bétons à base de granulats en PEHD, notamment en raison de la forme aplatie et irrégulière des déchiquetés PET. Enfin, nous avons montré que les propriétés physiques et mécaniques étudiées dans la présente investigation (densité, module d'Young et résistance à la compression) des bétons incorporant des granulats en plastique peuvent être bien prédictes par des lois de mélange généralisées en fonction de la fraction volumique des granulats en plastique et du volume d'air entraîné dans le béton durci.

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING HDPE OR PET PLASTIC AGGREGATES ISSUED FROM RECYCLED BOTTLES

SAIDANI KHALED, AJAM LASSAD, MILED KARIM

In this paper, we focus on the mechanical characterization of plastic aggregates-based concretes. We used two types of plastic aggregates. The first one is high density polyethylene spherical granules "HDPE" and the second one is obtained from used polyethylene terephthalate (PET) shredded bottles with a flattened shape. To design mixtures, natural aggregates of an ordinary reference concrete were replaced at different volumes ratio by plastic aggregates. The experimental results showed that the mechanical behavior of concretes based on PET aggregates is different from that of concretes based on HDPE aggregates, in particular because of the flattened and irregular shape of PET shreds. We have shown that the general properties studied in the present investigation (density, Young's modulus, compressive strength) of concretes based on plastic aggregates can be well predicted by laws of generalized mixtures according to the volume fraction of plastic and the volume of air entrained in the hardened concrete.

INFLUENCE DE LA POROSITÉ SUR LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU BÉTON INCORPORANT DES DÉCHETS DE BRIQUES CONCASSÉS

BEN ACHOUR WAFA, EL EUCH KHAY SALOUA, MILED KARIM, NEJI JAMEL

Ce travail porte sur la caractérisation du béton hydraulique routier contenant des déchets de briques. Ces déchets sont libérés par les briqueteries et leur utilisation actuelle est souvent limitée au remblaiement et à la consolidation des voies de circulation empruntées par les engins de ces usines. Le présent travail s'intéresse d'abord à une étude expérimentale de formulation où différents mélanges de béton incorporant des déchets de briques en substitution aux granulats naturels ont été mis au point. Ensuite, les performances mécaniques de ces bétons ont été déterminées à travers plusieurs essais standards de laboratoire. La porosité ouverte des différents mélanges a été également mesurée. Les résultats de ces essais ont montré une baisse des caractéristiques mécaniques, à savoir le module d'élasticité et les résistances à la compression et à la traction par fendage du béton, avec l'augmentation du pourcentage de substitution en déchets de briques. Cette baisse peut être expliquée par l'augmentation de la porosité ouverte du béton avec l'augmentation du pourcentage de substitution en déchets de briques. Néanmoins, la baisse des caractéristiques mécaniques du béton étudié reste modérée jusqu'à un pourcentage de substitution en déchets de brique de 30%. Enfin, des lois empiriques de type puissance reliant les caractéristiques mécaniques du béton incorporant les déchets de brique à sa porosité ont été proposées.

INFLUENCE OF POROSITY ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CONCRETE INCORPORATING CRUSHED BRICK WASTE

BEN ACHOUR WAFA, EL EUCH KHAY SALOUA, MILED KARIM, NEJI JAMEL

This work concerns the characterization of road Portland cement concrete formulated with brick waste provided by brick wards. First, six Portland cement concrete mixes containing brick waste aggregates were designed using recent LCPC method and made by varying the substitution ratio by volume of natural aggregates by crushed brick aggregates between 0 and 100%. Then, the mechanical properties of these mixes were measured based on standard laboratory tests. Porosity of the different mixtures was also measured. The results of the tests show a decrease in mechanical characteristics, namely the elastic modulus, the compressive and the splitting tensile strengths with the increase of the brick waste percentage. This decrease can be explained by the increase in the concrete porosity with the increase of the percentage of brick waste substitution. However, this decrease remains moderate (less than 9%) up to a ratio of 30%.

RÉPONSE DU BÉTON MOUSSE SOUS L'EFFET D'UNE SOLICITATION DYNAMIQUE : ONDE DE CHOC ET IMPACT BALISTIQUE

BEN YOUSSEF MARWA, SIALA AHMED, OUSJI HAMZA, MILED KARIM, NEJI JAMEL

Le béton mousse est un matériau poreux dont les propriétés physiques et mécaniques incitent à étudier son comportement dynamique sous l'effet d'une onde de choc générée par une charge explosive ou par un impact balistique. Pour ce faire, plusieurs formulations de béton mousse ont été étudiées pour couvrir une large gamme de densités variant entre 0,5 et 2,1. La présente étude a permis dans un premier temps d'étudier le comportement de cette gamme du béton mousse sous l'effet d'une onde de choc générée par une détonation d'une charge explosive. Les résultats qualitatifs de cette étude expérimentale ont permis de constater que les densités faibles du béton mousse favorisent le mécanisme de pulvérisation qui permet de réduire la pression maximale et l'impulsion de l'onde de choc. La deuxième partie de l'étude a permis d'analyser le comportement du béton mousse sous un impact balistique, en choisissant deux densités élevées de la gamme de densités étudiée. L'étude expérimentale de l'effet de l'impact balistique a permis de conclure que le béton mousse peut constituer un excellent piège à balles.

BLAST AND BALLISTIC LOADING ON FOAM CONCRETE: EXPERIMENTAL APPROACH

BEN YOUSSEF MARWA, SIALA AHMED, OUSJI HAMZA, MILED KARIM, NEJI JAMEL

The goal of the present work is to study the dynamic behavior of foam concrete under blast and ballistic load. Foam concrete is a non-autoclaved aerated concrete consisting of cement, water, sand and foam. Densities ranging between 500 and 1400 kg/m³ are examined to understand the dynamic material response as well as the loading absorption capability. Material density is defined by setting the volume fraction of a preformed organic foam within the same mortar matrix. An experimental set-up is provided to generate a planar blast load using an explosive-driven shock tube (EDST). The blast load is applied on a steel front plate, which is accelerated to compress the foam concrete. The compression mechanism may absorb the given blast energy. Note that the rear face of the foam concrete is fixed to a rigid structure. Qualitative experimental results show that the use of foam concrete with low densities may reduce the maximum

pressure and the impulse, generated by the EDST. During the compression process, a spraying mechanism is observed leading to transform the concrete to a concrete dust. Concerning the ballistic impact, the experimental study leads to conclude that the use of foam concrete with high densities may be considered as an excellent bullet trap. Note that in the present work, a qualitative approach is presented, hence, additional tests and measurements are required to allow a deep understanding of the absorption mechanisms.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES D'UN BÉTON CLASSIQUE ALLÉGÉ PAR L'AJOUT DE PAILLES TRAITÉES

TRABELSI ABDERRAOUF, KAMMOUN ZIED

Ce travail expérimental consiste à développer et à étudier un béton allégé par la substitution d'une partie des granulats par de la pailles traitées. La formulation utilisée est basée sur celle d'un béton ordinaire qui se compose de sable et de gravier comme principaux agrégats. Les propriétés des pailles sont améliorées en utilisant l'un des deux traitements avant leur utilisation : l'eau chaude et le bitume. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les caractéristiques mécaniques de différentes formulations avec différentes compositions et traitements de pailles. Les résultats obtenus ont montré que l'ajout de pailles améliore sa légèreté. Cependant, il diminue les résistances à la compression et à la flexion. Il diminue également le module d'élasticité et augmente les variations dimensionnelles. Comparé au béton avec des pailles non traitées, le traitement de pailles par l'eau chaude ou par le bitume améliore la plupart des caractéristiques.

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A CLASSIC CONCRETE LIGHTENED BY STRAWS

TRABELSI ABDERRAOUF, KAMMOUN ZIED

In this experimental work, a concrete lightened by treated straws is developed and studied. The formulation is based on that of ordinary concrete with sand and gravel as main aggregates. The straws are treated with hot water or bitumen. The mechanical characteristics have been evaluated and the obtained results show that the addition of straws improves the lightness of the concrete, but reduces the compression and flexural strengths and the modulus of elasticity.

introduction - programme



Le Laboratoire de Génie Civil de l'ENIT

&

L'Association Tunisienne du Béton

LES JOURNEES NATIONALES DU BETON

4^e Edition JNB'19

Hôtel Le Sultan, Hammamet-Nord, du 26 au 28 avril 2019

1^{re} journée du séminaire

08h 00	Inscription	
08h 30	Ouverture officielle des JNB'19 par les organisateurs et par le Pr. Hatem Zenzri - Directeur de l'ENIT	
SESSION 1 : Comportement du béton frais & Bétons autoplaçants Présidée par le Pr. Atef Daoud (Tunisie)		
09h 00	<u>Chafika Djelal</u> (Université Artois, Lille-France), Y. Vanhove, L. Libessart	CONFERENCE PLENIERE Tribologie et phénoménologie des interfaces béton/coffrage
09h 45	<u>Elhem Ghorbel</u> (L2MGC, Université de Cergy Pontoise, France), Atef Daoud	Sur l'adhérence BAP/armatures en PRFV
10h 15	<u>Jihen Mallek</u> (LGC-ENIT, Tunisie), Atef Daoud, Othman Omikrine Metalssi, Amara Loulizi.	Effets de l'incorporation des granulats de caoutchouc sur le comportement des bétons autoplaçants vis-à-vis l'attaque sulfatique externe
10h 35	<u>Yannick Vanhove</u> (LGCgE-Artois-Fance), ElhachemiAgnaou, <u>ChafikaDjelal</u>	Utilisation de trois rhéomètres à béton pour l'étude de l'influence des additions et des superplastifiants sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants
SESSION 2 : Durabilité des structures en béton Présidée par le Pr. Jamel Néji (Tunisie)		
11h30	<u>Othman Omikrine Metalssi</u> (IFSTTAR-France), Rim Ragoug, Jean-Michel Torrenti, Fabien Barberon, Loïc Divet, Nicolas Roussel, Jean-Baptiste d'Espinose de Lacaillerie.	Aspects physico-chimiques de l'attaque sulfatique externe dans les matériaux cimentaires
12h 00	<u>Lazhar Hariche</u> (LDMM Djelfa-Algérie), Said Kenai, Mohamed Bouhicha, Yunus Ballim.	L'effet de la corrosion sous chargement sur le comportement des poutres à l'état limite de service
12h 20	<u>Hassen Sabeur</u> (LGC-ENIT, Tunisie).	Effet de hautes températures sur l'évolution de la microstructure d'une pâte de ciment âgée de 2 ans à travers des essais thermo-gravimétriques
12h 40	<u>Farid Bouziadi</u> (LMSE Chlef-Algérie), Ben said Boulekbatche, Abdelkader Haddi, MostefaHamrat, <u>Chafika Djelal</u> , Nassira Lahmar.	Analyse du retrait total à long terme du béton à haute résistance contenant des fibres sous différentes températures de cure
SESSION 3 : Bétons à base de déchets ou de granulats recyclés Présidée par le Pr. Elhem Ghorbel (France)		
15h 00	<u>Khaled Saidani</u> (LGC-ENIT, Tunisie), Lassad Ajam, Karim Miled	Propriétés physiques et mécaniques des bétons à base de granulats plastiques de type PEHD ou PET issus de bouteilles recyclées
15h 20	<u>Wafa Ben Achour</u> (LR MOED-ENIT, Tunisie), Saloua El Euch Khay, Karim Miled, Jamel Neji.	Influence de la porosité sur les caractéristiques mécaniques du béton recyclé à base de déchets de brique concassés
15h 40	<u>Safa Jelassi</u> (CETEC, Tunisie), Farah Saidani, BesmaBouhalil, Naoufel Sassi, Ahmed Jelidi.	Approche expérimentale d'élaboration de bétons hydrauliques non structurels à base de matériaux alternatifs
16h 00	<u>Mounir Belghali</u> (LGC-ENIT, Tunisie), Aidi Marzouki	Étude de bétons ordinaires avec incorporation de sable de concassage
16h 50 18h 00	Table ronde autour du thème : «Les Journées Nationales du Béton: Bilan des quatre éditions, attentes et perspectives» Animée par O. Limam, K. Miled, A. Daoud, A. R'mili, A. Marzouki, M. Makni, E. Ghorbel, Ch. Djelal, S. Kenai	

2^{re} journée du séminaire

SESSION 4 : Caractérisation et modélisation du comportement du béton durci Présidée par le Pr. Amara Loulizi (Tunisie)		
09h 00	<u>Said Kenai</u> (LMGC, Université de Blida 1, Algérie)	CONFERENCE PLENIERE Évaluation de la résistance à la compression du béton sur site par des essais non destructifs : Méthodologie et cas d'études
09h 45	<u>Wien Ben Hassine</u> (LGC-ENIT, Tunisie), Marwa Loukil, <u>Qualid Limam</u>	Prédiction de l'effet de la température ambiante sur le comportement à la compression du béton par un modèle d'endommagement non local.
10h 15	<u>Ahmed Naija</u> (LGC-ENIT, Tunisie), Ghazi Hassen, Qualid Limam, Karim Miled	Étude numérique de la résistance biaxiale des bétons à hautes résistances
SESSION 5 : Bétons légers et Bétons fibrés Présidée par le Pr. Othman Omikrine Metalssi (France)		
11h 00	<u>Karim Miled</u> (LGC-ENIT, Tunisie).	Une approche combinée expérimentale et micromécanique pour prédire et optimiser les propriétés des bétons poreux en fonction de leur microstructure.
11h 30	<u>Marwa Ben Youssef</u> (LR MOED-ENIT, Tunisie), Ahmed Siala, Hamza Ousji, Karim Miled, JamelNeji.	Réponse du béton mousse sous l'effet d'une sollicitation dynamique : onde de choc et impact balistique
11h 50	<u>Abderraouf Trabelsi</u> (LGC-ENIT, Tunisie), Zied Kammoun	Caractéristiques mécaniques d'un béton classique allégé par l'ajout de pailles traitées
12h 10	<u>Houcem Naili</u> (LGC-ENIT, Tunisie), Hela Ben Ayed, Abdelhamid R'mili, Ahmed Jelidi	Effets de l'ajout de ciment, de plâtre et de fibres végétales de Junc sur la conductivité thermique du mortier de terre coulée stabilisée

EFFETS DE L'INCORPORATION DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC SUR LE COMPORTEMENT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS VIS-À-VIS DE L'ATTAQUE SULFATIQUE EXTERNE

BEHAVIOR OF SELF-COMPACTING RUBBERIZED CONCRETE EXPOSED TO EXTERNAL SULFATE ATTACK

SESSION 1 : COMPORTEMENT DU BÉTON FRAIS & BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Jihen Mallek¹, Atef Daoud², Othman Omikrine Metalssi³, Amara Loulizi⁴

1. Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis,
LGC, 1002, Tunis, Tunisie – mallek.jihen@gmail.com
 2. Université de Sfax, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, LGC, Sfax, Tunisie
 3. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IFSTTAR, Laboratoire FM2D, Paris, France
 4. Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis,
LAMOED, 1002, Tunis, Tunisie
-

1. INTRODUCTION

Le développement durable est un thème d'actualité dans le domaine de génie civil puisque la construction en béton est une grande consommatrice de granulats naturels. Ce type de granulats est de moins en moins disponible dans les différentes carrières, ce qui amène à utiliser des granulats recyclés ou à base d'autres déchets comme les pneumatiques usagés. En effet, la valorisation de ces pneus dans diverses applications civiles telles que l'incorporation comme agrégats dans les matériaux cimentaires est l'une des voies de développement durable.

Depuis le XIX^e siècle, les principales agressions potentielles des matériaux est l'attaque externe par des ions sulfatiques (SO_4^{2-}) qui réagissent chimiquement avec les hydrates du béton, principalement la portlandite en plus des sources d'aluminates (C_3A) pour former du gypse et de l'étringite secondaire, ce qui entraîne le gonflement, l'apparition des microfissurations et puis la dégradation des propriétés mécaniques des matériaux. Ceci est expliqué par l'augmentation significative du volume des produits néoformés par rapport au volume initial des composants qui se trouvent dans le béton [1,2]. L'objectif principal de cet article est d'étudier l'effet de l'incorporation des granulats de caoutchouc (GC) sur le comportement des bétons autoplâtrants (BAP) vis-à-vis l'attaque sulfatique externe (ASE).

Khelifa *et al.* [3] ont étudié l'effet de l'ASE sur les propriétés mécaniques des bétons autoplâtrants. Ils ont confirmé une augmentation significative de la masse des éprouvettes en béton ainsi qu'un gonflement visible des parties les plus exposées aux sulfates. Le gain de masse provient principalement de l'eau utilisé pour précipiter une phase hydratée telle que l'étringite secondaire.

Blessen Skariah *et al.* [4] ont analysé le comportement des bétons à base de GC vis-à-vis l'ASE. Les résultats expérimentaux montrent, qu'au bout de 182 jours d'exposition aux sulfates, une plus grande dégradation des bétons a eu lieu pour un taux important de GC accompagnée d'une perte de résistance à la compression qui était de l'ordre de 7% pour les bétons de référence et 16% pour les bétons contenant 20% de caoutchouc.

L'exposition des bétons autoplâtrants et des bétons caoutchoutés sont étudiées dans la littérature. Cependant, le comportement d'un béton autoplâtant à base de GC vis-à-vis l'ASE est encore sujette à controverses et nécessite davantage de recherches [5]. Cet article vise à présenter quelques premiers résultats de l'effet de l'incorporation des GC sur le comportement macroscopique et microscopique d'un BAP au cours de l'ASE. Les résultats des mesures d'expansion et de masse seront présentés et discutés.

2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

2.1. Matériaux et conservations

Les principaux matériaux utilisés dans cette recherche sont :

- Un ciment Portland CEM I 42.5 provenant de la cimenterie CAT à JBELEJLOUD, ses spécifications et sa classification sont conformes à la norme NT 47.01 [6]. La composition de ce ciment est sa composition chimique sont présentées dans le Tableau 1.
- Un gravier concassé fourni par la carrière de la région d'El-FAYETH-Sidi Bouzid avec une taille nominale maximale de 12 mm et un sable fourni par la société Préfabrication et Traitement de Sable (PTS) avec une taille maximale de 4 mm. Les coupures de granulats naturels sont obtenues par tamisage conformément à la norme tunisienne NF EN 12948 [7].
- Un additif minéral, carbonate de calcium fin, fourni par la société SOFAP sous le nom commercial de SUPCAL10 pour améliorer la fluidité et la compacité des BAP.
- Un superplastifiant réducteur d'eau polyvalent (SIKA VISCOCRETTE TEMPO 12).
- Des granulats de caoutchouc fournis par ECOPNEU avec une taille maximale de 8 mm.

Toutes les formulations seront désignées par BAPxC (Tableau 2), x est le taux de granulats naturels remplacé par le même volume absolu de granulats de caoutchouc de même classe. Le taux de substitution volumique des granulats naturels par des granulats de caoutchouc varie de 0 à 15%.

Tableau 1 : Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 42.5 N

Ciment		Clinker		Composition chimique (%)			
Constituant	Contenu (%)	Constituant	Contenu (%)				
Clinker	95,4	C_3S	73	SiO_2	20,49	MgO	1,34
Fillers de Calcaire	1,6	C_2S	6,3	Al_2O_3	3,39	Na_2O	0,2
Gypse	3	C_3A	2,2	Fe_2O_3	4,75	K_2O	0,38
		C_4AF	13,5	CaO	63,6	SO_3	2,51

La campagne expérimentale repose d'abord sur la fabrication d'éprouvettes cylindriques de 13 cm de hauteur et de 11 cm de diamètre, et d'autres éprouvettes ayant 5 cm d'épaisseur et 11 cm de diamètre en béton autoplâtant à base de GC (de 5, 10 et 15%) prélevées par sciage des éprouvettes de 22 cm de hauteur et de 11 cm de diamètre.

Une solution de sulfate de sodium, de concentration 10 g/l renouvelée chaque deux semaines au cours de la période de latence et chaque mois jusqu'à l'expansion finale des éprouvettes, dans laquelle les échantillons sont totalement immergés à une température ambiante de 22 °C.

Tableau 2 : Composition du BAP à base de granulats de caoutchouc [8]

	FORMULATION			
	BAPOC	BAP5C	BAP10C	BAP15C
MATERIAUX	QUANTITES DE MATERIAUX (kg/m ³)			
CEMI 42,5	370	370	370	370
GRAVIERS (8/12)	340	340	340	340
FILLER	80	80	80	80
EAU	212.75	212.75	212.75	212.75
ADJUVANT	7.03	7.03	7.03	7.03
GRAVIERS (4/8)	510	484.5	459	433.5
SABLE (0/4)	850	807.5	765	722.5
CAOUTCHOUC (0/4)	0	19.6	39.1	58.7
CAOUTCHOUC (4/8)	0	11.2	22.4	33.5

2.2. Méthodes d'investigation macroscopique

2.2.1. Observation visuelle

Pour évaluer l'effet de l'incorporation des GC sur la dégradation des différents bétons, une comparaison a été faite visuellement avant et après 23 semaines de conservation dans la solution sulfatique. Cette comparaison sera effectuée jusqu'à l'expansion finale des éprouvettes.

2.2.2. Mesures pondérales et dimensionnelles

Dans le but d'analyser les dommages causés principalement par la formation de l'ettringite secondaire, l'expansion

est la grandeur la plus utile à suivre. Les déformations de chaque béton ont été suivies durant l'exposition à l'ASE, à différentes échéances qui sont adaptées en fonction de la réactivité des matériaux, par un extensomètre de résolution minimale de 1 µm et un étalon de calibrage de 100 mm (Figure 1-a). Pour cela, chaque éprouvette a été instrumentée par des plots de mesures dimensionnelles en fixant trois séries de plots qui sont équidistantes de 120° suivant la circonférence des éprouvettes en utilisant une colle résistante au contact avec la solution sulfatique (Figure 1-b). Ces plots sont distants de 10 cm et fixés à égale distance de la mi-hauteur (Figure 1-c).

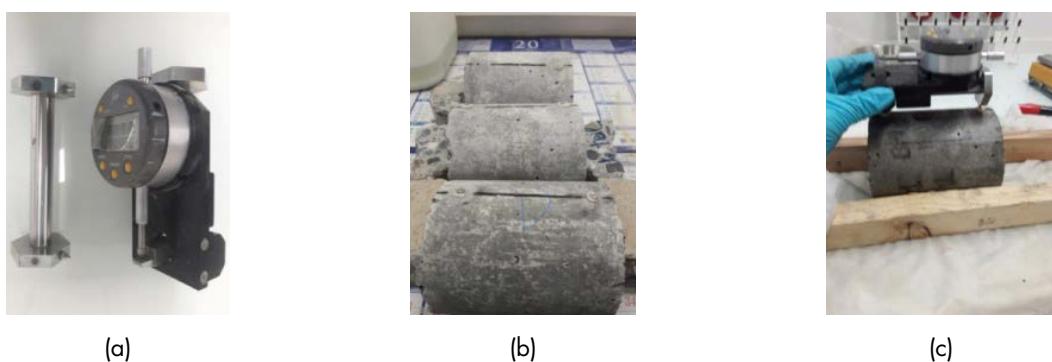


Figure 1 : Extensomètre et instrumentation des éprouvettes

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La Figure 2 présente la variation de la masse des éprouvettes des quatre bétons (BAP, BAP5C, BAP10C et BAP15C) en fonction de la durée d'immersion jusqu'à 23 semaines dans la solution sulfatique à 10 g/l de SO₄²⁻. Cette figure montre que les bétons présentent un gain de masse équivalent. Cette évolution est la conséquence de la formation de gypse et d'ettringite secondaire

suite à la réaction à la fois des hydrates particulièrement la portlandite et d'aluminates contenant principalement dans les C₃A avec les sulfates. Une comparaison entre les BAP et les BAP à base de GC (de 5% à 15%) montre que la cinétique du gain en masse est pratiquement la même pour les quatre formulations. A ce stade de l'essai, il n'est pas possible d'analyser l'effet de l'incorporation des granulats de caoutchouc sur la cinétique du gain en masse des BAP.

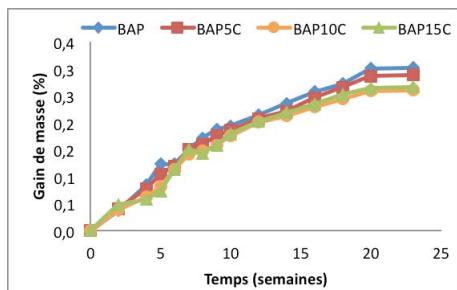


Figure 2 : Variation de la masse des échantillons immersés dans la solution du sulfate de sodium

Les variations dimensionnelles des BAP à base de GC sont illustrées dans la Figure 3. Les comportements ne sont pas stabilisés à ce jour mais on peut tirer que les expansions restent faibles puisqu'on est toujours dans la période de latence où on n'a pas beaucoup d'expansion. Les résultats de la variation d'expansion à 23 semaines ont été étudiés. Il y avait une augmentation d'expansion plus importante des bétons contenant 0% et 15% de GC, tandis que les deux mélanges (5% et 10%) ont montré des résultats plus faibles.

En ce qui concerne la porosité, il existe une stabilité de la porosité totale des BAP pour une teneur de caoutchouc allant de 0 à 10%. Dans le cas où la teneur est 15%, il y a une augmentation de la porosité accessible à l'eau (Tableau 3). En effet, l'augmentation de la porosité est due probablement à l'apparition des microfissures et principalement aux défauts d'adhérence entre la matrice cimentaire et les GC dans la zone de transition. Ceci confirme indirectement que l'incorporation de 15% de caoutchouc dans un BAP entraîne un gonflement plus important que celle des différents bétons analysés dans cette étude. Cependant, dans le cas où la teneur est 5% et 10%, le passage des ions sulfates est plus faible dû probablement à la structure poreuse et l'imperméabilité de GC.

Tableau 3 : Porosité accessible à l'eau des bétons avant leurs immersions dans la solution sulfatique

	BAP	BAP5C	BAP10C	BAP15C
Porosité totale (%)	11,632	11,740	11,907	12,805

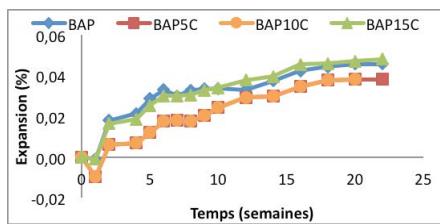


Figure 3 : Variation d'expansion des échantillons immersés dans la solution du sulfate de sodium

La Figure 4 présente la variation dimensionnelle en fonction de la variation de masse pour les bétons autoplaçants à base de GC. A ce stade d'essai, les expansions observées dans les différents bétons sont accompagnées d'un gain de masse avec une tendance linéaire. De plus, on observe que la présence d'un taux important de GC dans le béton autoplaçant (BAP15C) augmente

la pente de cette tendance. En effet, la pente expérimentale du BAP15C est environ 15% quant au béton de référence BAP0C, elle est d'environ 12.6%. L'évolution du gain de masse dépend principalement de l'apparition ou non du gonflement. En effet, l'apparition de fissures, qui sont d'autant plus importantes que l'expansion est importante, dans ces matériaux accélère la prise d'eau. L'origine des gains de masse lors des expansions est attribuée, en plus de remplissage des pores, à une pénétration d'eau dans les fissures développées suite au gonflement induit principalement par la formation d'ettringite secondaire.

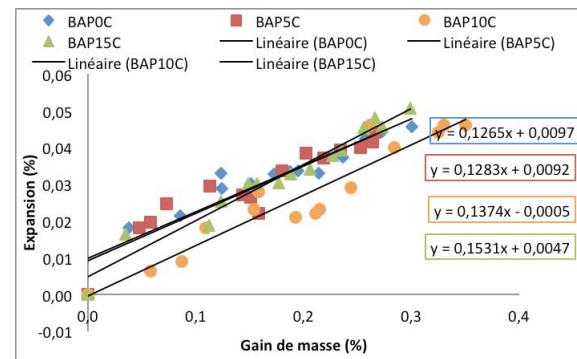


Figure 4 : Evolution de la déformation longitudinale des bétons en fonction du gain de leurs masses

Par ailleurs, des photos ont été prises pour visualiser l'évolution de la dégradation des éprouvettes en béton autoplaçant à base de GC suite à leur conservation pendant 160 jours dans le milieu sulfatique (Figure 5). D'une manière générale, l'examen visuel des BAP montre à ce stade d'essai l'absence partielle des gonflements. Par ailleurs l'examen visuel des BAP15C montre des microfissures autour les granulats de caoutchouc qui sont présents sur la surface des éprouvettes et la formation d'une couche blanchâtre qui caractérise le déclenchement de la formation du gypse secondaire.



Figure 5 : Echantillons des BAP15C après 160 jours d'immersions dans une solution sulfatique de dosage 10 g/l

4. CONCLUSION

L'attaque sulfatique externe est étudiée en condition d'immersion totale dans une solution de sulfate de sodium dont la concentration en ion sulfate est de 10 g/L. L'étude expérimentale a montré que les différents bétons présentent un développement similaire du gain de masse lorsqu'ils sont conservés sous immersion totale jusqu'à ce stade d'essai. Cette tendance pourrait changer avec le temps en poursuivant les mesures jusqu'à rupture des éprouvettes.

A ce stade, des expansions faibles ont été observées sur les corps d'épreuve (période de latence). Les résultats du suivi dimensionnel ont mis en évidence une augmentation significative de l'expansion dans le cas des éprouvettes à 15% de GC. Les résultats de la porosité accessible à l'eau ont confirmé une augmentation de la porosité pour ce type de béton due probablement à l'apparition des premières microfissures notamment au niveau de l'interface pâte de ciment – GC et également à la mauvaise adhérence entre la matrice cimentaire et les GC quand ces derniers sont utilisés avec un taux important.

L'étude des expansions des corps d'épreuve en fonction de leurs variations massiques indique que, dans le cas où le dosage de GC est de 5% et 10%, l'incorporation des GC dans un BAP n'accélère pas la prise d'eau. Cela est probablement dû à l'imperméabilité de GC et à la même porosité que celle du BAP0C. Cependant, l'utilisation de 15% de GC permet d'accélérer le gain de masse, ce qui est due probablement à la pénétration d'avantage de solution sulfatique à travers les microfissurations causées par la mauvaise adhérence entre la matrice cimentaire et les GC.

Actuellement, les éprouvettes des différents bétons sont encore immergées dans la solution sulfatique. A différentes échéances

(accélération de l'expansion, dégradation totale), des études macroscopique et microscopique comme la porosité totale à l'eau, la porosité au mercure et la diffraction aux rayons X sont programmées pour analyser principalement l'effet de l'ASE sur le réseau poreux et la nature minéralogique des produits néoformés dans le cas de ces bétons autoplaçants à base de GC.

RÉFÉRENCES

- [1] ANPE (Agence Nationale de Protection de l'Environnement), 2015, Tunisie.
- [2] Mather B., 2000, Sulphate Attack on Hydraulic-Cement Concrete, Fifth International Conference on Durability of Concrete, pp. 13-23.
- [3] Khelifa R., Brunetaud X., Chabil H., Al-Mukhtar M., 2008, Conséquences Mécaniques de l'Attaque Sulfatique Externe sur les Bétons Autoplaçants, *Sciences et Technologie*, B-N°28, pp. 23-28.
- [4] Blessen Skariah T., Ramesh Chandra G., 2015, Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber, *Journal of Cleaner Production*, vol. 102, pp. 78-87.
- [5] Ilker B.T., Aytac U., 2018, Scrap tires/crumb rubber, Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete.
- [6] NT 47.01, INORPI., 1996, Ciment : Composition, Spécification et Critères de Conformité.
- [7] NF EN 12948, 2010, Amendements minéraux basiques - Détermination de la distribution granulométriques par tamisage par voie sèche et par voie humide.
- [8] Gargouri A., A. Daoud, Loulizi A., Kallel A., 2016, Laboratory Investigation of Self-Consolidating Waste Tire Rubberized Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 113, pp. 661-668.

L'EFFET DE LA CORROSION SOUS CHARGEMENT SUR LE COMPORTEMENT DES POUTRES À L'ÉTAT LIMITÉ DE SERVICE

THE EFFECT OF CORROSION UNDER LOAD ON THE SERVICEABILITY BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

SESSION 2 : DURABILITÉ DES STRUCTURES EN BÉTON

Lazhar Hariche¹, Said Kenai², Mohamed Bouhicha³, Yunus Ballim⁴

1. Laboratoire « LDMM » Université de Djelfa, Route de Moudjbara Djelfa Algérie
lazhariche@univ-djelfa.dz ou lazhariche@yahoo.fr
2. Laboratoire « LMGC » Université de Blida, BP 270 Blida Algérie
3. Université de Laghouat, Laghouat Algérie
4. Université de Witwatersrand Johannesburg, l'Afrique de sud

1. INTRODUCTION

La corrosion de l'acier est l'une des causes majeures de dégradation des structures en béton armé. Les travaux sur la corrosion des armatures dans le béton sont généralement réalisés au laboratoire, afin d'étudier le phénomène de corrosion et son influence sur le comportement des poutres en béton armé. Ces résultats demeurent incomplets, puisqu'ils sont réalisés sans charge, alors qu'en réalité les poutres sont en service (sous charge). La corrosion accélérée est généralement effectuée, dans ces travaux, par l'ajout de sel au béton lors du malaxage avec l'eau de gâchage, ce qui ne représente pas la réalité et affecte

la durabilité du béton. L'objectif est d'évaluer la performance des poutres en béton armé sous charge et corrosion des armatures simultanément [1-2].

2. LA PARTIE EXPÉRIMENTALE

Quatre séries de poutres sont réalisées (six poutres pour chaque série, trois poutres soumises à la corrosion accélérée et les trois autres ne sont pas soumises à la corrosion). Les trois premières séries de poutres ont été soumises aux mêmes conditions d'essai, sauf que le choix et la disposition des armatures longitudinales

varient entre les trois séries (Figure 1). Pour la quatrième série, la charge de service a été augmentée (20 kN pour les trois premières séries et 30 kN pour la dernière série). Les dimensions des poutres sont les même pour toutes les séries. Les dimensions sont 160x100x1500 mm³.

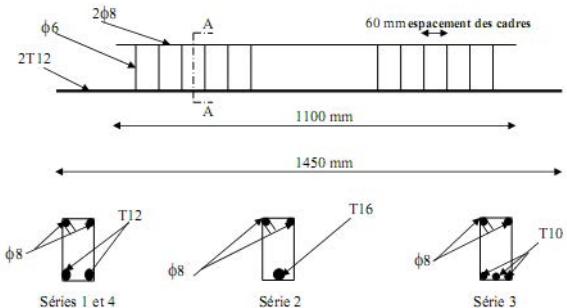


Figure 1 : Ferrailage des poutres des quatre séries

Afin de corroder uniquement les barres inférieures des poutres, on a passé un courant électrique continu dans ces barres, par le soudage d'un fil électrique sur les barres qu'on veut corroder. Pour protéger les cadres vis-à-vis de la corrosion nous avons placé un isolant en plastique entre les cadres et les armatures inférieures. La corrosion accélérée est effectuée par une

solution saline (NaCl) à 3% de concentration massique et un courant électrique, un générateur de courant constant de 30V maximum et 3A de courant est utilisé. L'anode (+) est connectée à l'armature dans le béton et la cathode (-) est branché avec une barre qui est mise dans la solution saline à l'intérieur du bassin en plastique, jouant le rôle de la cathode dans la réaction électrochimique. Le bac d'eau est rempli jusqu'à 10 cm. Pour l'enregistrement du courant électrique pour chaque barre nous avons utilisé une centrale d'acquisition, branchée à un micro portable. L'enregistrement s'effectue automatiquement chaque une heure durant la période de l'essai. Le taux de corrosion est calculé par la loi de Faraday, donc à chaque instant durant la période des essais on peut estimer le taux de corrosion. Les poutres sont soumises à la flexion quatre points et l'armature inférieure à un courant électrique continu pour l'accélération de la corrosion. Donc, à l'âge de 28 jours, nous avons procédé au chargement des poutres et en même temps à l'accélération de la corrosion. La charge est appliquée par un ressort. Le ressort est comprimé à l'aide de deux tiges filetées qui traversent cette pièce et sont fixées sur la poutre de support en « I ». Les poutres sont chargées par des ressorts, dont le coefficient de rigidité est connu préalablement.



Figure 2 : Dispositif expérimental

La distance de compression du ressort est mesurée par un pied à coulisse avec une précision de 0.05 mm, à travers un trou au milieu de la plaque mobile. Pour mesurer la flèche à mi-traversée, une selle métallique bien fixée au centre de la poutre et sous le distributeur de charge, et le capteur de déformation est placé sur la selle. Afin de tenir compte des déplacements possible des supports de la poutre en plastique, deux capteurs de déformation, un sur chaque support, sont placés sur la partie supérieure de la poutre au niveau des supports.



concentrée. Ceci est conforme à ce qui a été rapporté dans la littérature [3-7], et peut être expliquée par l'absence de carbonatation du béton, puisque la carbonatation dans le béton armé entraîne généralement une corrosion distribuée de manière plus uniforme.

3.2. Les fissurations du béton des poutres

Après l'essai d'accélération de corrosion sous chargement les poutres ont été nettoyées et les allures des fissures ainsi que les ouvertures des fissures ont été mesurées.

Le choix et la disposition du ferraillage longitudinal inférieur des armatures d'acier semblent donc avoir une forte influence sur le type et lieu des fissurations dans les poutres, ainsi que, les ouvertures des fissures qui ont une relation directe avec le taux de corrosion des armatures à l'intérieur du béton. Cela nous montre le rôle important de l'enrobage sur la protection des armatures d'acier vis-à-vis la corrosion à l'intérieur des structures en béton armé [1-11].

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Taux de corrosion

Deux méthodes ont été utilisées pour estimer le taux de corrosion : la méthode de loi de Faraday et la méthode gravimétrique (perte de masse). Après enlèvement et nettoyage des barres du béton des poutres, toutes les barres corrodées ont montré une corrosion par piqûres avec quelques zones de corrosion

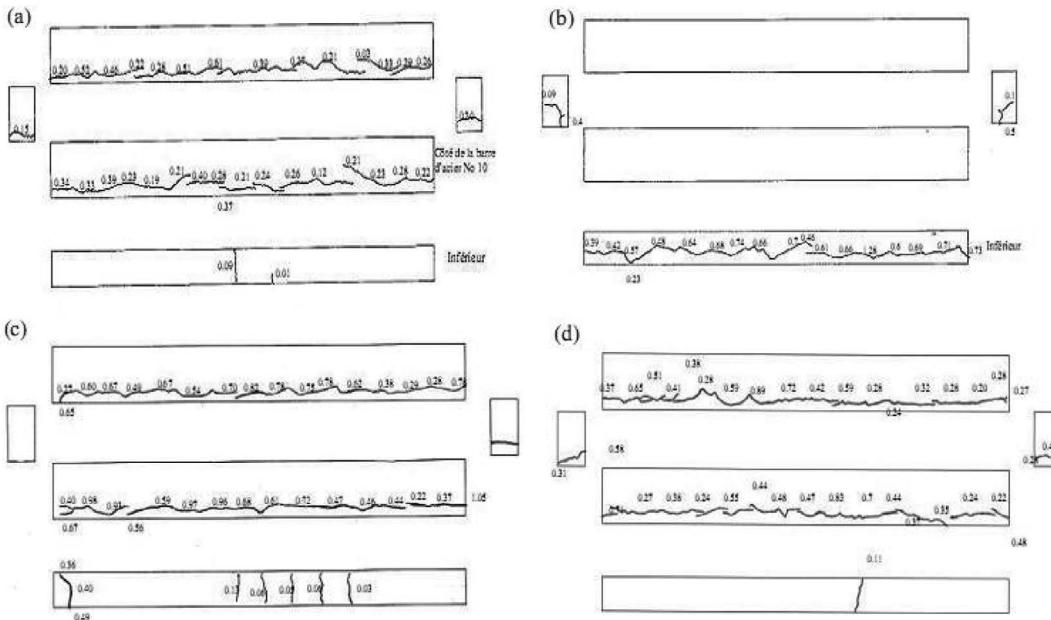


Figure 3 : Allures et ouverture des fissures des poutres corrodées : (a) séries 1, (b) séries 2, (c) séries 3 et (d) séries 4

3.3. Déformation des poutres à l'état limite de service

Les déformations à mi-travée des poutres de contrôle (Figure 4 -a-), non corrodées, augmentent avec le temps. Cette augmentation de la

flèche est due principalement à l'effet dépendant du temps, comme le fluage. Pour avoir un aperçu sur l'évaluation de cette flèche dans le temps, la déformation relative est représentée dans la Figure 4 -b- pour les différentes séries.

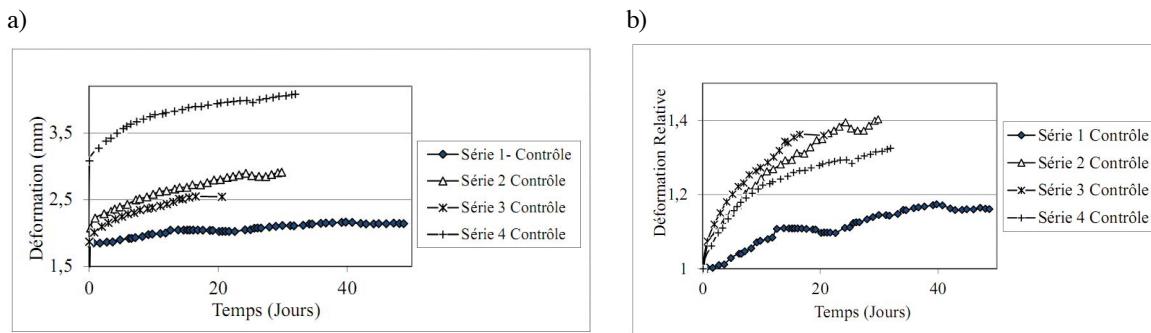


Figure 4 : Déformation des poutres de contrôle : (a) Flèche (en mm) dans le temps, (b) Déformation relative dans le temps

Il peut être remarqué que l'effet de fluage diminue lorsque l'âge et la résistance du béton augmentent [7-8].

Les variations de flèche durant le temps sont données figure 5.

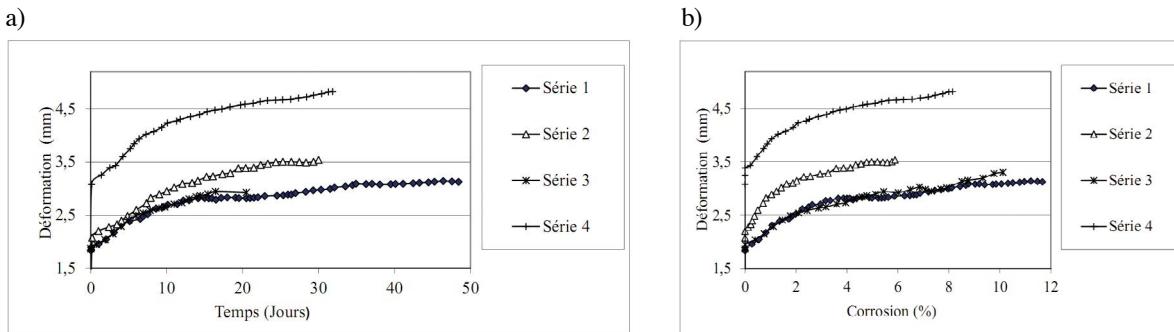


Figure 5 : Flèches des poutres corrodées : (a) en fonction du temps, (b) en fonction de la corrosion

Les figures 5-a et 5-b montrent respectivement la variation des déformations à mi-travée en fonction du temps et en fonction du pourcentage de corrosion des barres d'aciers. On peut voir que la déformation augmente avec le temps et

avec l'augmentation du degré de corrosion des armatures. Il peut également être constaté de ces figures que les flèches de la première et de la troisième série sont plus ou moins identiques, et sont relativement plus faibles que les flèches de la

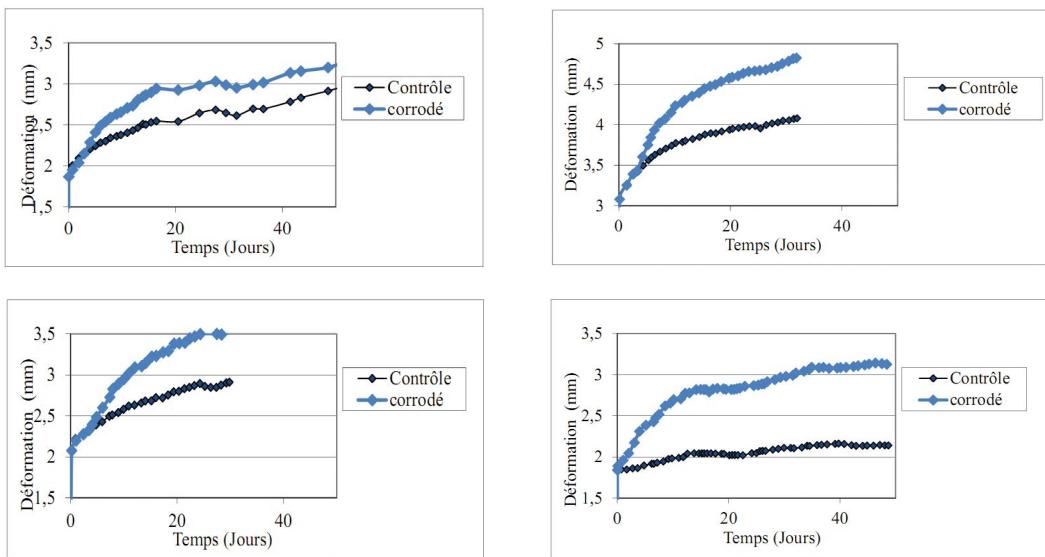


Figure 6 : Déformation à mi-travée des poutres contrôlées et corrodées en fonction du temps :
(a) séries 1, (b) séries 2, (c) séries 3 et (d) séries 4

seconde série. Ceci met en évidence l'importance d'une disposition adéquate de l'armature tendue dans la partie inférieure des poutres.

Les flèches des poutres augmentent durant le temps. Cette augmentation est due principalement à la corrosion des armatures en acier des poutres et au fluage des poutres.

Les déformations relatives des poutres corrodées ont été obtenues en divisant leurs déformations par les déformations correspondantes aux déformations des poutres de contrôle.

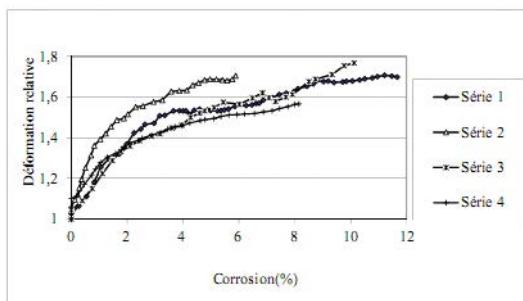


Figure 7 : Déformation relative en fonction de la corrosion

Pour un faible pourcentage de corrosion, les déformations relatives augmentent linéairement avec la corrosion. Cette augmentation diminue une fois le taux de corrosion dépasse 2 à 4%. En outre, les courbes de la première série, la troisième série et la quatrième série sont plus ou moins identiques alors que les déformations relatives de la deuxième série sont les plus élevées pour tous les taux de corrosion considérés. Par conséquent, le choix et la disposition de ferraillage longitudinal inférieur des armatures des barres d'acier tendu semblent avoir une grande influence non seulement sur les allures des fissures, mais aussi sur l'augmentation du taux de corrosion qui provoque la croissance des déformations.

4. CONCLUSION

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette investigation expérimentale :

- Étant donné que la corrosion est provoquée par infiltration des ions chlorure dans le béton, la corrosion obtenue dans ces séries d'essais est principalement une corrosion par piqûres.
- Les fissures dans les poutres dues à la corrosion sont des fissures longitudinales le long des barres corrodées, à l'exception des poutres avec un ferraillage de la nappe inférieure de 2T12 et 3T10 où les fissures sont dans les faces latérales des poutres. Les fissures sont dans la face inférieure dans le cas des poutres avec 1T16.
- Le choix et la disposition de ferraillage longitudinal inférieur dans les structures a un rôle important sur l'évolution des dégradations et fissuration de l'enrobage pour les éléments en béton armé endommagés par la corrosion des armatures.
- Sous chargement et corrosion accélérée simultanées, les déformations des poutres augmentent avec l'augmentation progressive de la corrosion des armatures d'acier inférieur dans les poutres en béton armé. Une forte augmentation de déformation a été observée durant les premiers stades de la corrosion en raison principalement de la propagation des fissures de la face tendue des poutres. Ces fissures sont provoquées par la traction par flexion dans les fibres inférieures et des contraintes engendrées par l'expansion volumique des produits de corrosion.

5. REMERCIEMENTS

Remerciements de la Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique (DGRSDT) du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS) d'Algérie pour le financement de ces travaux.

RÉFÉRENCES

- [1] Hariche L., 2016, « Comportement des éléments de structures en béton armé sous les effets simultanés de la charge de la corrosion », thèse de Doctorat, Université de Blida 1, Algérie.
- [2] Hariche L., Ballim Y., Bouhicha M., Kenai S., 2012, “Effects of reinforcement configuration and sustained load on the behavior of reinforced concrete beams affected by reinforcing steel corrosion”, *Cement & Concrete Composites*, 34 (2012), pp. 1202-1209.
- [3] Raharinaivo A., Arliguie G., Chaussadent T., Grimaldi G., Pollet V. et Taché G., 1998, « *La corrosion et la protection des aciers dans le béton* », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [4] Ballim Y. et Basson J., 2001, “Durability of concrete” Fulton’s Concrete Technology 8th ed. Edited by B.J Addis and G.R Owens, Midrand: *Cement and Concrete Institute*, pp. 135-161.
- [5] Almusallam A.A., Al-Gahtani A.S., Aziz A.R, Rasheeduzzafar, 1996, “Effect of reinforcement corrosion on bond strength”, *Construction and Buildings Materials*, Vol. 10, No 2, pp. 123-129.
- [6] Cabrera J.G., 1996, “Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 18, pp. 47-59.
- [7] Ballim Y., Reid J.C., 2003, “Reinforcement corrosion and deflection of RC beam—an experimental critique of current test methods”, *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, pp. 625-632.
- [8] Malumbela G., Alexander M., Moyo P., 2010, “Lateral deformation of RC beam under simultaneous load and steel corrosion”, *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 17-24.
- [9] Chong Cao & Moe M. S. Cheung, 2014, “Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC Structures”, *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 75-81.
- [10] Andrade C. & Buják R., 2013, “Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion”, *Cement and Concrete Research*, vol. 53, pp. 59-67.
- [11] Muthulingam S. & Rao B.N., 2014, “Non-uniform time-to-corrosion initiation in steel reinforced concrete under chloride environment”, *Corrosion Science*, vol. 82, pp. 304-315.

EFFET DE HAUTES TEMPÉRATURES SUR L'ÉVOLUTION DE LA MICROSTRUCTURE D'UNE PÂTE DE CIMENT ÂGÉE DE 2 ANS À TRAVERS DES ESSAIS THERMO- GRAVIMÉTRIQUES

EFFECT OF HIGH TEMPERATURES ON THE EVOLUTION OF THE 2-YEAR-OLD CEMENT PASTE MICROSTRUCTURE THROUGH THERMO-GRAVIMETRIC TESTS

SESSION 2 : DURABILITÉ DES STRUCTURES EN BÉTON

Hassène Sabeur^{1,2}

1. Université de Carthage, Ecole Polytechnique de Tunisie
2. Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis
sabeur_hassen@yahoo.fr
-

1. INTRODUCTION

Les recherches publiées sur les effets de hautes températures sur la microstructure de la pâte de ciment, du mortier ou du béton chauffés sont généralement relatifs à des essais réalisés à 28 jours. De plus, dans [1,2], la température maximale atteinte au cours de ces

recherches était de 800°C. Néanmoins, lors d'un incendie réel, cette température de 800°C est atteinte au bout de 20 minutes environ (courbe de feu ISO) et les bétons datent de plusieurs années. D'où la nécessité de réaliser des tests sur des pâtes de ciment âgés où la température maximale est supérieure à 800°C en phase de chauffage. En outre, de nombreux articles se sont intéressés à

L'étude de l'influence des vitesses de chauffage sur le comportement du béton [3,4] et d'autres ont étudié l'effet des hautes températures sur les propriétés mécaniques du béton et des mortiers à base de ciment Portland [5- 7]. Néanmoins, peu de recherches ont été menées sur l'effet de la nature des régimes de refroidissement, en particulier dans le cas d'une pâte de ciment chauffée, ce qui pourrait être important dans le cas d'un incendie, par exemple. Pour cela, ce papier met en évidence les effets thermiques et ceux du régime de refroidissement à l'air libre sur les propriétés minéralogiques ainsi que sur la microstructure de pâtes de ciment âgées de 2 ans en étudiant les courbes TGA/ DTG, où la température maximale atteinte est égale à 1000° C.

2. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

2.1. Matériaux et préparation des spécimens

Le ciment a été fabriqué conformément aux normes européennes ISO 9001 (2000). L'analyse chimique du CEM I est présentée par le tableau 1. Des cylindres en pâte de ciment (diamètre 30 mm et hauteur 30 mm) ont été fabriqués selon un rapport eau / ciment de 0,272. Ces cylindres avaient une densité moyenne de 2,18 g/cm³. Après le démoulage, les échantillons ont été placés dans des sacs en plastique étanches pendant 28 jours, de sorte qu'aucun gain d'eau supplémentaire n'était possible pendant l'hydratation.

2.2. Cycle chauffage-refroidissement

Après un vieillissement d'environ 2 ans et sans protection du contact avec l'air, des échantillons ont été découpés et broyés jusqu'à atteindre une taille de grain de 80 µm. Ensuite, ils ont été chauffés jusqu'à 1000°C par paliers de 100°C. Un échantillon a été conservé sans chauffage comme échantillon de référence. Le processus de chauffage a été poursuivi en plusieurs étapes : chaque spécimen a d'abord été placé dans un four PROLABOVolca MC 25 et a été chauffé à partir de la température ambiante jusqu'au plateau de température sélectionné. Ensuite, lorsque la température souhaitée a été atteinte, chaque palier de température a été maintenu pendant 6 h afin d'assurer la stabilisation de la température, la perte de masse, la déshydratation et d'autres phénomènes physiques et chimiques. Après un refroidissement à la température ambiante dans le four, les spécimens sont placés à l'air libre dans des conditions de laboratoire 20 ± 2°C. Ce régime de refroidissement à l'air représente le cas réel d'un

incendie où le béton est en contact direct avec l'air. En effet, après un incendie le béton est exposé à l'air humide dans la phase de refroidissement : des processus de réhydratation se déroulent dans la pâte de ciment qui, combinée aux variations de volume et de masse, peut entraîner une augmentation supplémentaire de la porosité et la formation de fissures supplémentaires en comparaison à la partie chauffage [2]. Après environ 24 heures du début de ces régimes de chauffage-refroidissement, des essais TGA / DTG et DRX sont réalisés à l'échelle de la pâte de ciment. Plus de détails sont fournis dans la référence [8].

3. RÉSULTATS

3.1. Impact du vieillissement sur la microstructure du béton

Les courbes TGA / DTG d'une pâte de ciment « fraîche » (CP28) - à 28 jours et d'un échantillon de pâte de ciment en âgée de deux ans (Ag) sont tracées à la figure 1. Les mêmes pâtes de ciment ainsi que la même vitesse de chauffage ont été utilisés ici pour les deux échantillons.

Pour les deux spécimens, la figure 1 montre trois pertes de masse. La première perte de masse s'est produite entre 100°C et 200°C. Cette perte de masse résulte des réactions de déshydratation de plusieurs hydrates (C-S-H, carboaluminates, ettringite, etc.). Cette perte d'eau est principalement due à la déshydratation des C-S-H. Par conséquent, les différents hydrates seront inclus dans l'annotation C-S-H. Entre 450°C et 550°C, la deuxième perte de masse majeure est due à la décomposition de la portlandite [3]. La décomposition du CSH se poursuit avec une nouvelle phase d'évacuation de l'eau liée chimiquement. Entre 700°C et 900°C, le carbonate de calcium CaCO₃ s'est décomposé, libérant le CO₂ par réaction endothermique. Ceci est en accord avec les observations similaires de plusieurs auteurs concernant les réactions qui se produisent dans la pâte de ciment lorsque la température augmente [3-5]. Les effets du vieillissement sur un échantillon de pâte de ciment sont illustrés à la figure 1. Premièrement, le CP28 présente des valeurs de perte de masse plus élevées que l'Ag en raison du départ de l'eau libre de cette dernière pâte. Cette différence de perte de masse semble être constante jusqu'à la fin du test. Les différences sont également notées dans les valeurs maximales des pics des trois réactions principales. L'absorption d'humidité et la carbonatation semblent augmenter les pics d'intensité des réactions de déshydroxylation et de décarbonatation.

Tableau 1 : Composition chimique du CEM I 42.5

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	CO ₂	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ A F
20-20.9	4.9-5.3	3.7-4.2	63.5-64.8	1-1.3	0.4-0.5	1.5-2	1.6-2.4	52.8-63	7.8-17	5-12	8-14

Cependant, l'intensité maximale du pic de la réaction de déshydratation (C-S-H) du CP28 est supérieure à celle de l'Ag. De plus, les valeurs des températures de début de décomposition et des pics de température de ces réactions sont plus élevées pour l'Ag. Le vieillissement des échantillons de pâte de ciment implique donc une modification de ces températures caractéristiques et de la microstructure de la pâte de ciment où les quantités des phases principales : hydrates (CSH), carbonates de portlandite et de calcium sont modifiées par rapport au CP28, comme le montre la deuxième colonne du tableau 2. En effet, la comparaison entre les valeurs de cette colonne CP28 et de la troisième colonne (Ag) montre que le vieillissement de la pâte de ciment induit une carbonatation plus élevée de la pâte de ciment et une absorption plus élevée d'humidité. Cela implique des quantités plus élevées de portlandite et de carbonate de calcium, et une diminution des quantités de C-S-H. Ces modifications de la microstructure de l'(Ag) non chauffée par rapport au CP28 induiront nécessairement des modifications de cette microstructure lorsqu'elles sont chauffées à divers plateaux de température, comme indiqué ci-dessous, à l'aide des résultats tests de TGA / DTG.

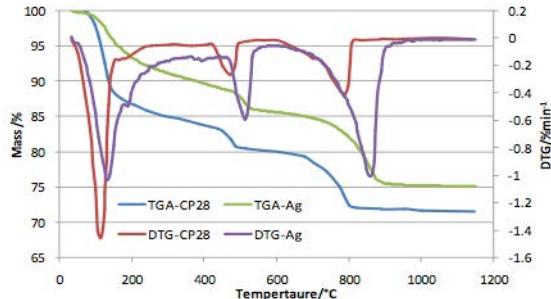


Figure 1 : TGA et DTG pour les pâtes de ciment (CP-28) et (Ag)

pour les échantillons chauffés au-dessus du de 800°C, augmente pour les deux derniers plateaux de température. Afin d'analyser le rôle de chaque réaction principale - la réaction de déshydration (CSH), la réaction de déshydroxylation (portlandite) et la réaction de décarbonatation (carbonates de calcium) - dans la perte de masse totale, les valeurs de perte de masse correspondante pour chaque échantillon sont résumées dans le tableau 2. Dans le dernier tableau, nous donnons également ces valeurs de perte de masse pour la pâte de ciment CP28 (première colonne). À partir du dernier tableau, nous pouvons noter les valeurs importantes de la décarbonatation du carbonate de calcium (environ 40%) pour le spécimen non chauffé. En effet, pendant deux ans et sans protection du contact avec l'air, l'absorption de CO₂ a lieu, ce qui induit des quantités plus importantes de CaCO₃. Ceci est également confirmé par la première colonne du tableau 2, où ces quantités, pour le spécimen âgé non chauffé, ont augmenté d'environ 11% par rapport à celles du CP28.

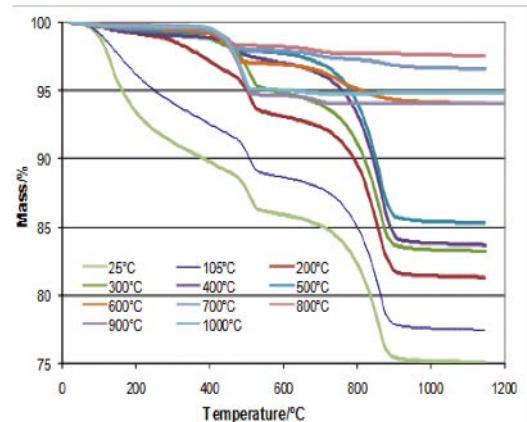


Figure 2 : TGA de la pâte de ciment à différents paliers de températures

3.2. Analyse des courbes TGA / DTG

Les résultats des tests thermogravimétriques sont résumés à la figure 2. Cette figure montre que la deuxième perte de masse, correspondant à la réaction de déshydroxylation, subsiste même pour les échantillons au-delà de 500°C ce qui montre que cette réaction est réversible [1]. De plus, la première et la troisième perte de masse disparaissent pour les échantillons chauffés à des températures supérieures à 300°C et 600°C respectivement. Ainsi, on peut en déduire que la réaction de décarbonatation et de déshydration sont irréversibles. De plus, un phénomène original a été observé : pour les deux plateaux de températures 900°C et 1000°C, cette deuxième perte de masse semble dépasser celle de 800°C, ce qui augmente la perte de masse totale. En outre, la température de départ de la deuxième perte de masse, qui diminue

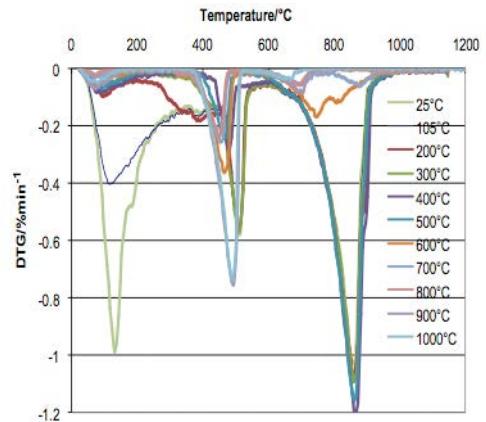


Figure 3 : DTG de la pâte de ciment pour différents paliers de température

Tableau 2 : Perte de masse des trois réactions principales

Décomposition	25°C- CP ²⁸	25°C	105°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C	1000°C
C-S-H	57.90	44.74	37.36	21.44	11.09	7.63	5.33	9.59	10.97	11.62	7.61	5.98
Ca(OH) ₂	12.28	14.82	16.61	19.05	24.08	15.22	14.74	43.66	52.04	63.44	81.43	89.83
CaCO ₃	29.82	40.43	46.03	59.50	64.84	77.14	79.93	46.75	36.99	24.94	10.96	4.18

Ceci diffère des résultats de la littérature où la contribution de la perte de masse de la décarbonatation par rapport à la perte de masse totale est très faible comparée aux deux autres réactions principales. D'où l'intérêt de réaliser des tests où les échantillons sont en contact direct avec l'air afin de représenter au mieux le comportement réel d'une pâte de ciment vieillie soumise à des températures élevées. En outre, le tableau 2 montre que, jusqu'à 500°C, la réaction de déshydratation des hydrates diminue progressivement et semble être corrélée à la décomposition de CaCO₃. En effet, une partie du CSH qui se décompose contribue à l'augmentation de la concentration de calcite. En outre, au-delà de 500°C, les réactions de déshydroxylation et de décarbonatation semblent être corrélées : une augmentation de la masse de portlandite est corrélée à une diminution de la réaction de masse de décarbonatation. Ces réactions sont étudiées plus attentivement avec les résultats des courbes DTG qui sont représentées à la figure 3. Nous pouvons remarquer un pic plus faible à 188°C qui correspond probablement à la décomposition des monocarboaluminates [1]. Notez ici les valeurs importantes du pic de décarbonatation du carbonate de calcium pour les plateaux de température [25°C-500°C] en raison de la carbonatation de nos échantillons, comme expliqué ci-dessus. À partir de la figure 3, on peut observer la diminution importante de la valeur du pic de la décarbonatation du carbonate de calcium à 600°C. Ce pic disparaît complètement pour un traitement thermique au-delà de 700°C. C'est également le cas pour le premier pic (décomposition de CSH) ; qui disparaît au-delà du plateau de température de 300°C. Ces deux réactions pourraient être considérées comme des indicateurs permettant de déterminer l'historique de la température du béton après une exposition au feu. De plus, pour les plateaux de température [25°C -300°C], les courbes DTG de déshydroxylation et de la décarbonatation sont comparables et même identiques (du début de la déshydroxylation de la portlandite à la fin du test). En ce qui concerne la décomposition de la portlandite et également pour [25°C -300°C], les pics et les températures correspondants de début de décomposition sont également comparables. Cependant, pour les traitements thermiques [500°C -800°C], le pic ne disparaît pas, même si son intensité diminue

(Figure 3). De plus, au-delà de 800°C, l'augmentation de la perte de masse constatée pour 900°C et 1000°C (Figure 3) est à nouveau corrélée à une augmentation de l'intensité des pics correspondants. En effet, cette intensité augmente et elle devient même supérieure à celle du spécimen non chauffé pour les plateaux de température 900°C et de 1000°C (Figure 3). Notez ici que les courbes DTG des plateaux de température de 900°C et de 1000°C sont presque identiques. La présence du pic de décomposition de la portlandite pour les plateaux de température au-delà de 500°C est due à la formation d'une nouvelle portlandite pendant la phase de refroidissement à l'air ambiant. En effet, pendant cette période, au contact de l'air ambiant (molécules H₂O), la chaux CaO (un produit issu de la déshydroxylation au cours du premier chauffage) produira une nouvelle portlandite selon l'équation suivante :



Ce raisonnement explique également l'importante augmentation de la masse totale pour les plateaux de température à 900°C et à 1000°C (Figure 2). En effet, à partir de la Figure 3 et concernant l'échantillon de référence, nous pouvons voir que les limites du troisième pic (la température du pic correspondant est égale à 864°C) sont 700°C et 920°C. Par conséquent, on peut supposer que pour un traitement inférieur à 900°C, près de 90% de la masse de CaCO₃ est décomposée et qu'au plateau de 1000°C, la majorité de la masse totale est décomposée. En effet, lorsque le carbonate de calcium se décompose, il libère également la chaux CaO selon la réaction endothermique suivante :



Ces nouvelles quantités de CaO libérées par le CaCO₃ décomposé seront ajoutées à celles libérées par la décomposition de la portlandite. Cela augmentera la masse totale de la nouvelle portlandite formée pendant la phase de refroidissement (équation 1). Cette conclusion est confirmée par les valeurs de la masse de la décomposition de la portlandite, obtenues dans le tableau 2, égales à 82% et 90% pour 900°C et 1000°C, respectivement. Ces valeurs importantes de la nouvelle portlandite formée induisent des valeurs plus élevées de la masse totale indiquée sur la figure 2 pour les deux plateaux de température par rapport à celles du plateau de température de 800°C.

Tableau 3 : Température de pic, intensité de pic, et température de départ de la réaction en fonction des paliers de températures

	25°C	105°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C	1000°C
Temp. de Pic/°C	513.43	512.38	512.09	512.83	477.69	467.39	468.13	454.18	450.22	492.92	492.08
Intensité de Pic /% min ⁻¹	-0.58	-0.56	-0.56	-0.57	-0.28	-0.25	-0.36	-0.26	-0.23	-0.75	-0.74
Temp. de départ./°C	468.44	467.39	472.09	457.83	437.69	402.39	358.13	359.18	355.22	382.92	377.08

À partir de cette analyse, la réaction de la portlandite pourrait alors être considérée comme l'indicateur le plus important de l'historique de l'évolution de la température du béton après une exposition au feu, notamment lorsque la température de l'incendie dépasse 500°C, car la portlandite subsiste jusqu'à 1000°C. Nous définissons ensuite ce que nous considérons comme les « paramètres de la réaction de portlandite » : la température du pic, l'intensité du pic correspondant et la température de départ de la réaction. Ces paramètres pourraient être considérés comme des marqueurs permettant de déterminer

l'historique de l'évolution de la température du béton après une exposition au feu. Dans le tableau 3, nous avons résumé l'évolution des trois paramètres de la réaction de déshydroxylation pour chaque plateau de température.

4. CONCLUSION

Dans ce papier, des cycles de chauffage - refroidissement à l'air libre ont été appliqués à des éprouvettes de pâte de ciment

âgées de deux ans et chauffées à des températures allant jusqu'à 1000°C. Des tests TGA / DTG ont été menés pour explorer les modifications de la microstructure d'une pâte de ciment à hautes températures. Des conclusions peuvent être avancées :

- Le vieillissement de la pâte de ciment induit une carbonatation plus élevée de la pâte de ciment et une absorption accrue d'humidité. Cela implique des quantités plus élevées de portlandite et de carbonate de calcium et une diminution des quantités de C-S-H. Ce qui entraîne une modification importante de la microstructure de la pâte de ciment, entraînant un comportement différent d'une pâte de ciment vieillie chauffée à de hautes températures par rapport à un CP28.
- Les courbes TGA / DTG montrent que la nouvelle portlandite formée pendant la phase de refroidissement continue d'exister jusqu'aux plateaux de température de 1000°C. Les paramètres de la réaction de déshydroxylation : la température maximale, l'intensité maximale et la température de départ de la réaction peuvent être utilisés comme indicateurs pour déterminer l'historique de la température du béton après un incendie.

RÉFÉRENCES

- [1] Alarcon-Ruiza L, Platret G, Massieu E, Ehrlacher A, 2005. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste, *Cement and Concrete Research*; 35: 609-613.
- [2] Alonso C, Fernandez L, 2004. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *J Mater Sci.*; 39 (9): 3015-24.
- [3] Chan YN, Peng GF, Chan KW, 1996. Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature. *Mater Struct*; 29: 616-9.
- [4] Felicetti R, Gam. Barova P, 1998. Effects of high temperature on the residual compressive strength of high-strength siliceous concretes. *ACI Mater J.*; 95(4): 395-406.
- [5] Husem M, 2006. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Safety Journal*; 41(2): 155-163.
- [6] Qianmin Ma, RongxinGuo, Zhiman Zhao, Zhiwei Lin, Kecheng He, 2015. Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. *Construction and Building Materials*; 93: 371-383.
- [7] Zhai Y, Deng Z, Li N, Xu R, 2014. Study on compressive mechanical capabilities of concrete after high temperature exposure and thermo-damage constitutive model. *Construction and Building Materials*; 15: 777-782.
- [8] Sabeur H, Platret G, Vincent J, 2017. The effect of ageing and heat treatment on microstructure evolution of a commercial cement paste, *Heat and Mass Transfer*; 53: 2609-2626.

ANALYSE DU RETRAIT TOTAL À LONG TERME DU BÉTON À HAUTE RÉSISTANCE CONTENANT DES FIBRES SOUS DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES DE CURE

ANALYSIS OF THE LONG-TERM TOTAL SHRINKAGE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE CONTAINING FIBERS UNDER DIFFERENT CURING TEMPERATURES

SESSION 2 : DURABILITÉ DES STRUCTURES EN BÉTON

**Farid Bouziadi¹, Bensaid Boulekache¹, Abdelkader Haddi², Mostefa Hamrat¹,
Chafika Djelal², Nassira Lahmar¹**

1. Hassiba Ben Bouali University of Chlef, Laboratory of Materials Sciences
and Environment, Chlef, Algeria
 2. Univ. Artois, EA 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, Béthune, France
bouziadi.farid@gmail.com
-

1. INTRODUCTION

L'utilisation des bétons à hautes résistance (BHR) est actuellement en plein essor dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction des ouvrages d'art et des gratte-ciels. Ces bétons sont caractérisés par un rapport E/C inférieur à 0.4 [1,2].

Le retrait total est défini comme étant le retrait mesuré sur une éprouvette en échange avec le milieu extérieur. Le retrait commence à partir du début de prise du ciment, dans les BHR, le rapport E/C est inférieur à 0.4, la présence de la fumée silice et le rapport de surface sur le volume du spécimen utilisé sont importants et causent une diminution de l'humidité interne du béton, ce qui provoque le déclenchement du retrait [2-5]. Le

retrait est l'un des problèmes majeurs constatés sur la durabilité à long terme des BHR [6,7].

L'élévation de la température de cure du béton provoque l'accélération de l'hydratation et la distribution non-uniforme des produits d'hydratation. Les hydrates formés n'ont pas suffisamment de temps pour s'arranger convenablement et provoquent ainsi une grande porosité de la pâte du ciment. Ainsi la porosité attribue une augmentation du retrait [8,9]. L'objectif de ce travail porte sur l'effet des propriétés des fibres sur le retrait total du béton fibré à haute résistance sous l'effet de trois températures de cure correspondant à la variation de température en Algérie.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1. Matériaux utilisés

Le ciment utilisé est de type CEM II/A 42.5, de densité 3.1 et de surface spécifique 3 298 cm²/g. La fumée silice "CONDENSIL S95 DS" utilisée par substitution du ciment (8% par masse du ciment), conforme à la norme EN 13263-1, de densité 2.4 et de surface spécifique 220 000 cm²/g. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment et de la fumée de silice sont présentées dans le Tableau 1. Le superplastifiant (SP) utilisé pour assurer une bonne ouvrabilité, est un Polycarboxylate à base de copolymère acrylique "SIKA VISCOCRETE TEMPO12"

conforme à la norme EN 934-2. Le sable utilisé est un sable roulé de densité spécifique 2.60, de module de finesse 2.67. Le gravier utilisé est un gravier concassé calcaire de densité spécifique 2.70. Deux types de fibres ont été utilisés : métalliques à crochets d'élançements 55 et 80 et polypropylène. Le tableau 2 présente les caractéristiques des fibres utilisées.

Tableau 1 : Propriétés du ciment portland composé et de la fumée de silice

Composition chimique	Ciment II/A	Fumée de silice
SiO ₂	20.58	93
Al ₂ O ₃	4.90	0.47
Fe ₂ O ₃	4.70	0.91
CaO	62.8	0.8
SO ₃	2.28	0.35
MgO	0.53	0.93
K ₂ O	0.42	1.20
Na ₂ O	0.12	0.40
CaO libre	2.17	0.8
Composition minéralogique		
C ₃ S	57.79	-
C ₂ S	20.47	-
C ₃ A	7.20	-
C ₄ AF	11.49	-

Tableau 2 : Caractéristiques des différentes fibres

Caractéristique	Fibre métallique	Fibre en polypropylène
Longueur L _f (mm)	50	30
Diamètre d _f (mm)	0.62	0.55
Élancement (L _f /d _f)	80	55
Densité	7.8	7.8
Résistance en traction (MPa)	1100	1100
Module élastique (GPa)	200	200
Déformation à la rupture (%)	3.5	3.5
Morphologie		

2.2. Procédure expérimentale

2.2.1. Formulation des bétons

Pour formuler les bétons à haute résistance, le rapport Eau/Ciment sélectionné est égal à 0,4. Le tableau 3 présente les formulations des bétons testés.

Tableau 3 : Formulations des bétons testés (kg par m³)

Béton	Ciment	Gravier	Sable	Eau	Fumée de silice	SP	Fibres métalliques			Fibres polypropylène	
							(%)	I _f /d _f =80	I _f /d _f =55	(%)	
BHR	415	1003	668	177.5	36	5	-	-	-	-	-
BHFRM-0.5-55	415	1003	668	177.5	36	5.9	0.5	-	37.78	-	-
BHFRM-1-55	415	1003	668	177.5	36	7.65	1	-	75.65	-	-
BHFRM-0.5-80	415	1003	668	177.5	36	5.9	0.5	37.78	-	-	-
BHFRM-1-80	415	1003	668	177.5	36	7.65	1	75.65	-	-	-
BHFRP-0.1	415	1003	668	177.5	36	5.9	-	-	-	0.1	0.884
BHFRP-0.2	415	1003	668	177.5	36	5.9	-	-	-	0.2	1.77
BHFRH	415	1003	668	177.5	36	5.9	0.5	-	37.78	0.1	0.884

2.2.2. Mesure du retrait total

Les éprouvettes sont coulées dans des moules prismatiques 100×100×400 mm, munis de deux plots en cuivre espacés de 15.5 cm. Les éprouvettes ont été recouvertes d'une toile de jute humide afin d'empêcher toute évaporation au très jeune âge et laissées dans le laboratoire à une température constante de 20 °C±2 et d'humidité de 90%±5. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et préparées pour les mesures de retrait total. Les éprouvettes sont munies d'une mince couche de bitume entourée d'une bande adhésive aux deux bouts pour éviter les effets de bord et assurer un milieu sans échange hydrique avec le milieu extérieur. Les éprouvettes sont conservées dans des étuves à vapeur dans une position verticale à différentes températures avec une humidité relative de 50%±5. Les mesures du retrait sont prises à l'aide d'un comparateur digital ayant une précision de 1μm comme le montre la Figure 1.



Figure 1 : Eprouvettes dans l'étuve à vapeur

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Influence de la température de cure sur le retrait total

Le tableau 4 montre l'évolution du retrait total en fonction du temps pendant 180 jours (3, 28, 91 et 180 jours) sous différentes températures de cure. La cinétique et la magnitude du retrait total varient de manière significative avec la température de cure. En général, une température élevée donne un retrait total important et augmente sa vitesse d'évolution. L'influence de la température de cure est plus importante au jeune âge qu'à long. Ce phénomène est dû à la création de microfissures. Les écarts du retrait ne sont pas proportionnels aux écarts de températures. Les résultats montrent que l'augmentation du retrait total des bétons due à l'élévation de la température de cure de 20 °C à 35 °C est plus grande que celle de 35 °C à 50 °C (Tableau 4). Cet écart peut être expliqué par le mécanisme d'hydratation et le potentiel des différentes réactions du ciment et leur relation avec la température [6,12].

L'élévation de la température provoque l'accélération de l'hydratation et une distribution non uniforme des CSH, ce qui conduit à une augmentation dans la porosité au jeune âge. Cette élévation de densité des CSH entraîne une modification de la taille des pores capillaires, le nombre de pores de faibles rayons étant plus important pour des températures élevées [10].

Tableau 4 : Valeurs du retrait total à différent âges

Béton	Retrait total ($\mu\text{m}/\text{m}$)												
	3 J			28 J				91 J			180J		
	20°C	35°C	50°C	20°C	35°C	50°C	20°C	35°C	50°C	20°C	35°C	50°C	
BHR	27.5	120	170	225	347.5	422	317.5	435	502.5	397.5	522.5	595	
BHFRM-0.5-55	-7.5	55	105	217	257.5	270	305	340	362.5	382	440	465	
BHFRM-1-55	-25	-10	50	140	192.5	203	197.5	232.5	247	277.5	340	360	
BHFRM-0.5-80	20	65	120	90	197.5	225	220	285	300	385	452.5	480	
BHFRM-1-80	10	52.5	59	142	206	221	210	265	290	292	347	370	
BHFRP-0.1	18	37.5	90	200	223	237.5	260	310	354	350	393	450	
BHFRP-0.2	5	10	75	110	150	197	240	290	315	320	365	390	
BHFRH	-20	35	62.5	170	183	205	241	256	280	271	305	325	

3.2. Influence du dosage des fibres sur le retrait total

Les résultats expérimentaux permettent de montrer l'effet du dosage des fibres métalliques sur le retrait. En général, l'addition de 0,5% de fibres métalliques réduit le retrait au jeune âge jusqu'à 27% sous une température de cure de 20 °C, 46% sous une température de cure de 35 °C et 29% sous une température de cure de 50 °C. A long terme, les réductions de retrait total sont 3%, 13% et 19% sous les conditions isothermes de 20 °C, 35 °C et 50 °C, respectivement. Pour l'addition de 1% de fibres métalliques, les réductions de retrait total au jeune âge sont de 50%, 70% et 65% pour les conditions isothermes de 20 °C, 35 °C et 50 °C respectivement. A long terme, les réductions sont de 25%, 32% et 42% sous les températures de cure de 20 °C, 35 °C et 50°C respectivement. On remarque que le retrait diminue avec l'augmentation du dosage de fibres métalliques. Le retrait génère des contraintes de traction internes dans la pâte de ciment. Lorsque ces contraintes dépassent la résistance à la traction apparente du béton, elles induisent des microfissures [11,13]. Concernant le retrait total des BHFRP, on constate que le retrait diminue avec l'augmentation du dosage de fibres en polypropylène. L'addition de 0.1% de fibres en polypropylènes réduit le retrait total au jeune âge jusqu'à 35%, 69% et 47% sous température de cure de 20 °C, 35 °C et 50 °C respectivement. A long terme, les réductions de retrait total sont 12%, 20% et 29% sous les conditions isothermes de 20 °C, 35 °C et 50 °C respectivement. Pour l'addition de 0.2% de fibres en polypropylènes, les réductions de retrait total au jeune âge sont de 60%, 92% et 56% pour les conditions isothermes de 20 °C, 35 °C et 50 °C respectivement. A long terme, les réductions sont 31%, 40% et 45% sous les températures de cure de 20 °C, 35 °C et 50 °C respectivement. Les fibres polypropylènes ne peuvent pas empêcher le mouvement de la pâte de ciment au jeune âge et conservent la stabilité du volume du béton fibré en raison de son faible module élastique (5 GPa). Ce type de fibre peut inhiber seulement les microfissures et leurs propagations au jeune âge. Les résultats

montrent que les fibres en polypropylène sont plus efficaces sur le retrait total par rapport aux fibres métalliques.

On trouve que les réductions de retrait total sont proportionnelles à la température de cure, ceci peut être expliqué par la relation entre les comportements physiques des fibres et la température de cure telle que la flexibilité et la ductilité des fibres. Les fibres sous une température de cure de 50 °C deviennent plus flexibles et ductiles par rapport aux cures de 35 °C et 20 °C ce qui permet de mitiger les microfissures et les macro-fissures puis diminuer le retrait total. Et aussi l'élévation de la température de cure permet d'augmenter l'adhérence fibre-matrice du ciment.

3.3. Influence l'élancement des fibres sur le retrait total

Les résultats montrent que l'élancement des fibres a une légère influence sur le retrait total. L'influence de l'élancement total sur le retrait total n'apparaît qu'après 60, 28 et 7 jours sous les conditions isothermes 20 °C, 35 °C et 50 °C respectivement. L'addition du dosage de 1% de FM d'élancement 55 donne des réductions de retrait total à long terme de 30%, 35% et 42% à température de cure de 20 °C, 35 °C et 50 °C respectivement et pour l'élancement 80, les réductions sont de 25%, 32% et 39%. On constate que la réduction de l'élancement 55 est supérieure à celle de l'élancement 80 parce que les mélanges avec des fibres d'élancement 55 ont une bonne ouvrabilité que les mélanges avec des fibres d'élancement 80. En effet, la fibre métallique d'élancement 55 a une bonne concentration dans le cœur de l'éprouvette du béton fibré grâce à sa bonne distribution par rapport à la fibre métallique d'élancement 80.

4. CONCLUSION

L'étude expérimentale du béton fibré à haute résistance avec différents types et différents dosages de fibres et à différentes températures de cure a permis de tirer les conclusions suivantes :

1. L'addition des fibres dans le béton à haute résistance améliore la stabilité du volume de manière significative. Les réductions de retrait par addition de 1% fibres métalliques sont respectivement de 25%, 32% et 42% sous des températures de cure de 20 °C, 35 °C et 50 °C. Et par addition de 0.2% de fibres en polypropylènes, les réductions sont de 31%, 40% et 46% sous les températures de cure de 20 °C, 35 °C et 50°C respectivement. L'hybridation des fibres (0.5% FM et 0.1% FP) réduit la déformation de retrait jusqu'à 48%.
2. Les résultats de retrait total montrent que les fibres en polypropylène sont plus efficaces que les fibres métalliques. L'évolution du retrait total est influencée par les caractéristiques géométriques des fibres métalliques tels que la longueur et l'élancement ; l'élancement diminue la déformation du retrait total.
3. Une expansion locale augmente avec l'augmentation du dosage des fibres métalliques d'élancement 55 et avec la diminution de la température de cure. On n'enregistre pas une expansion à la température de cure 50 °C.
4. L'élévation de la température de cure du béton augmente la cinétique et l'amplitude du retrait total de manière significative.

RÉFÉRENCES

- [1] Aitcin P. C. 2001. Béton à haute performance. Edition, Eyrolles, Paris.
- [2] Al-Amoudi OSB, Maslehuddin M, Shameem M, Ibrahim M. 2007. Shrinkage of plain and silica fume cement concrete under hot weather. *Cement and Concrete Composite* Vol. 29, 690-699.
- [3] Itim A, Ezziane K, Kadri EH., 2011. Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions. *Construction and Building Materials* Vol. 25, 3603-3609.
- [4] Lura P, Jensen OM, Breugel K., 2003. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms. *Cement and Concrete Research* Vol. 33, 223-232.
- [5] Sivakumar A, Santhanam M., 2007. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composite* Vol. 29, 575-581.
- [6] Jiang C, Yang Y, Wang Y, Zahou Y, Ma C., 2014. Autogenous shrinkage of high-performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures. *Construction and Building Materials* Vol. 61, 260-269.
- [7] Jiang Z, Sun Z, Wang P., 2005. Autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance cement pastes. *Cement and Concrete Research* Vol. 35, 1539-1545.
- [8] Carino NJ., 1994. The maturity method: theory and application. *Cement and Concrete Aggregates* 61-73.
- [9] Lura P, Breugel K, Maruyam I., 2001. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research* Vol. 31, 1867-1872.
- [10] Mounanga P, Baroghel-Bouny V, Loukili A, Khelidj A., 2006. Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro-macro correlations. *Cement and Concrete Research* Vol. 36, 110-122.
- [11] Loukili A, Chopin D, Khelidj A, Le Touzo JY. 2000. New approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history. *Cement and Concrete Research* Vol. 30, 915-922.
- [12] Bjøntegaard Ø, Hammer TA, Sellevold E., 2004. On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete. *Cement and Concrete Composite* Vol. 26, 427-35.
- [13] Banthia N, Gupta R., 2006. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research* Vol. 36, 1263-1267.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES BÉTONS INCORPORANT DE GRANULATS PLASTIQUES DE TYPE PEHD OU PET ISSUS DE BOUTEILLES RECYCLÉES

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING HDPE OR PET PLASTIC AGGREGATES ISSUED FROM RECYCLED BOTTLES

SESSION 3 : BÉTONS À BASE DE DÉCHETS OU DE GRANULATS RECYCLÉS

Khaled Saidani^{1,2}, Lassad Ajam^{1,2}, Karim Miled¹

1. Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Laboratoire de Génie civil, BP 37, Le Belvédère, 1002, Tunis, Tunisie
 2. Université de Carthage, Institut Supérieur des Technologies de l'Environnement de l'Urbanisme et du Bâtiment, 2035, Tunis, Tunisie – khaled.saidani@enit.utm.tn
-

1. INTRODUCTION

Les bétons incorporant des granulats en plastique contribuent à réduire la masse volumique des bétons et à améliorer à la fois leur isolation thermique et acoustique [1]. En outre, l'incorporation des agrégats plastiques issus du recyclage dans le béton contribue à réduire la pollution de l'environnement et à limiter l'utilisation des ressources naturelles. Le polyéthylène téréphthalate

(PET) et le polyéthylène à haute densité (PEHD) sont parmi les plastiques les plus utilisés dans l'industrie du conditionnement en raison de leur grande stabilité. Dans la littérature, l'utilisation de tels plastiques dans le béton a été principalement motivée par la réduction de l'impact environnemental des déchets [2]. Ainsi, les déchets en plastique sont introduits dans le béton après un simple déchiquetage [3] ou après un traitement thermique pour obtenir des granulats légers de forme plus régulière [4].

Des études récentes expérimentales ont montré que l'incorporation de granulats de plastique dans le béton affecte négativement ses propriétés mécaniques [1,3]. Ces études ont également montré une différence entre le comportement mécanique de différents types de bétons à base de granulats plastiques dépendant principalement de la nature, de la taille et de la forme des agrégats plastiques [5,6]. Cependant, dans la plupart de ces études, peu d'attention a été portée à la modélisation et à la prédition du comportement mécanique des bétons à base de granulats plastiques. Ainsi, dans la présente étude, nous nous concentrons principalement sur la prédition des propriétés mécaniques des bétons de granulats de polyéthylène en fonction de leur type et de leur fraction volumique.

2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES

Le ciment utilisé est un ciment Portland ordinaire de classe CEM I 42.5N conforme à la norme NT 47.01, sa masse volumique est de 3 100 kg/m³ et sa surface de Blaine est d'environ 321 m²/kg. Deux types de granulats naturels (GN) ont été utilisés : un sable siliceux 0/1,25 mm, que l'on notera (S) et ayant une masse volumique de 2 670 kg/m³, et un gravier calcaire 4/12,5 noté (G) de masse volumique égale à 2 700 kg/m³ (figure 1).

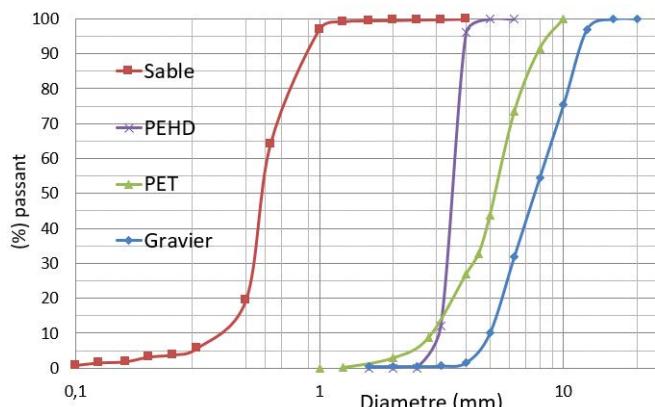


Figure 1 : Courbes granulométriques des granulats naturels et des granulats en plastique

Deux types de granulats plastiques (GP) ont été utilisés. Le premier type noté ici (P) est constitué de « déchets de PET » obtenus à partir du déchiquetage de bouteilles usagées. La masse volumique de ces granulats est d'environ 1 330 kg/m³, leur forme est aplatie et irrégulière et leur taille est comprise entre 1,2 et 10 mm (figures 1 et 2). Le second type, noté (H), est constitué de « granules de PEHD » couramment utilisés pour la fabrication de bouteilles en plastique, des matériaux d'emballage, et de récipients. La masse volumique des agrégats de PEHD est d'environ 940 kg/m³, leur forme est sphérique de diamètre moyen de 3 mm (figures 1 et 2).

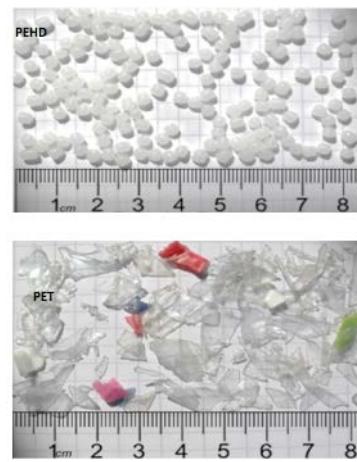


Figure 2 : Granulats en plastique

3. PRÉPARATION DES ÉPROUVENTES ET MODE OPÉRATOIRE

Dans la présente étude les granulats en plastique (P ou H) ont été utilisés en substitution volumique des granulats naturels (S ou G). Pour chaque type de GP, quatre ratios de substitution volumique ont été considérés : 10, 40, 70 et 100% pour les granulats de PEHD et 10, 15, 25 et 40% pour les granulats de PET. Pour ce dernier, il était impossible de dépasser un taux de substitution volumique de 40% en raison de problème de ségrégation (figure 3c), en effet un taux élevé de PET a induit un mélange caractérisé par un pourcentage élevé de vides et des nids d'abeilles généralisées. Le tableau 1 résume les compositions de tous les mélanges de béton. Des éprouvettes cubiques de 100 mm de côté ont été utilisées pour les mesures de densités à l'état frais et durci. Pour chaque mélange, la teneur en air entraînée a été déterminée par un aéromètre à l'état frais. Des éprouvettes cylindriques de diamètre 100 mm et de hauteur 150 mm ont été utilisées pour les essais de module de Young et de résistance à la compression. Tous les échantillons ont été démoulés au bout d'un jour et conservés ensuite dans de l'eau à environ 20 °C (figure 3a) pendant 28 jours, puis au laboratoire à l'air libre jusqu'à ce que leur masse se stabilise. A cet état sec, la teneur en air entraîné a été déterminée par mesure de masse. Ensuite, la fraction volumique des agrégats plastiques dans les échantillons de béton a été calculée à l'état durci (Tableau 1) en tenant compte de l'eau évaporée après durcissement.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats expérimentaux sont résumés dans le tableau 2 (les valeurs entre parenthèses sont les écarts-types calculés à partir d'au moins trois essais). Afin de faciliter l'interprétation et la prédition des propriétés mécaniques, les résultats expérimentaux seront représentés dans la suite par leurs valeurs normalisées ou relatives (c'est-à-dire rapportés à la valeur de la propriété du béton ordinaire de référence sans agrégats plastiques).

Tableau 1 : Composition des mélanges ($1m^3$)

Mélange	GN substitué	GP substituant	Substitution volumique (%) ⁽¹⁾	Fraction volumique de plastique (%) ⁽²⁾	Composition (kg/m^3) ⁽¹⁾ Ciment (C) : 403 kg/m ³ ; eau (E) 207.3 l/m ³ E/C=0.51			
					Sable	Gravier	PEHD	PET
B ₀	-	-	0	0	633.2	1103.2	0	0
H10S	Sable	PEHD	10	2.3	569.9	1103.2	22.4	0
H40S	Sable	PEHD	40	9.4	379.9	1103.2	89.8	0
H70S	Sable	PEHD	70	16.5	189.9	1103.2	157.1	0
H100S(*)	Sable	PEHD	100	23.7	0	1103.2	224.5	0
H10G	Gravier	PEHD	10	4.1	633.2	992.9	39.3	0
H40G	Gravier	PEHD	40	16.6	633.2	661.9	157.4	0
H70G	Gravier	PEHD	70	29.1	633.2	330.9	275.4	0
H100G(*)	Gravier	PEHD	100	41.6	633.2	0.00	293.5	0
P10S	Sable	PET	10	2.3	569.9	1103.2	0	31.3
P15S	Sable	PET	15	3.5	538.2	1103.2	0	47.0
P25S	Sable	PET	25	5.6	474.9	1103.2	0	78.3
P40S	Sable	PET	40	8.8	379.9	1103.2	0	125.3
P10G	Gravier	PET	10	4.1	633.2	992.9	0	54.9
P15G	Gravier	PET	15	6.2	633.2	937.7	0	82.4
P25G	Gravier	PET	25	9.7	633.2	827.4	0	137.3
P40G(*)	Gravier	PET	40	13.6	633.2	661.9	0	219.6

(1) : état frais ; (2) : état durci ; (*) mélange avec une ségrégation importante

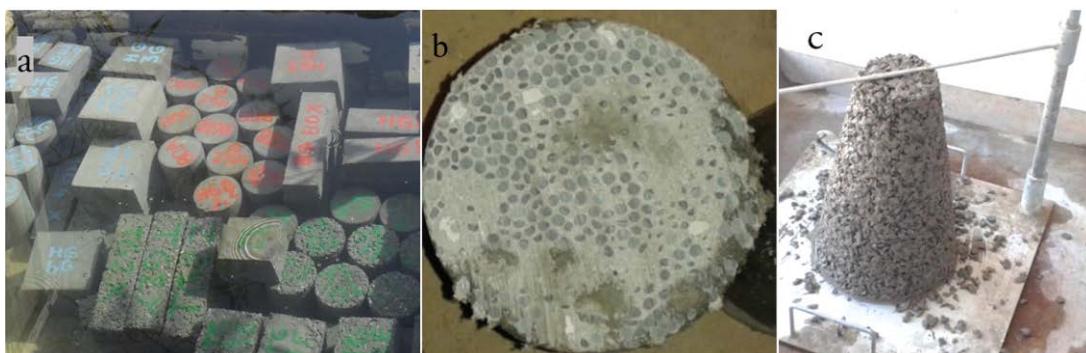


Figure 3 : Confection et préparation des éprouvettes de bétons à base de granulats plastiques

Tableau 2 : Résultats expérimentaux du béton de référence et des bétons à base de GP

Béton	Air entrainé état durci (%)	Masse volumique état durci (g/cm ³)	Module d'Young (GPa)	Résistance à la compression (MPa)
B ₀	4.27 (0.50)	2.32 (0.02)	43.31 (1.73)	40.60 (1.47)
H10S	4.28 (0.32)	2.28 (0.02)	39.89 (2.43)	38.76 (1.38)
H40S	4.33 (0.28)	2.17 (0.04)	31.90 (2.60)	27.39 (1.71)
H70S	4.40 (0.53)	2.10 (0.04)	25.58 (2.77)	20.17 (2.11)
H10G	4.32 (0.53)	2.27 (0.02)	40.61 (2.59)	35.80 (1.98)
H40G	4.36 (0.44)	2.06 (0.02)	29.26 (3.46)	21.78 (1.62)
H70G	4.43 (0.47)	1.89 (0.05)	19.23 (2.60)	14.06 (2.44)
P10S	5.53 (0.65)	2.26 (0.02)	36.09 (3.46)	26.70 (1.06)
P15S	5.99 (0.95)	2.23 (0.02)	31.90 (3.29)	22.60 (1.79)
P25S	8.89 (0.83)	2.15 (0.02)	26.50 (3.98)	18.68 (2.11)
P40S	11.56 (1.12)	2.09 (0.03)	16.84 (4.50)	11.25 (2.35)
P10G	6.30 (0.90)	2.23 (0.03)	30.2 (2.60)	24.71 (2.08)
P15G	7.50 (1.21)	2.17 (0.02)	23.6 (2.42)	19.41 (4.06)
P25G	11.54 (0.64)	2.05 (0.03)	15.2 (2.77)	9.38 (2.44)

4.1. Volume d'air entraîné

Le volume d'air entraîné dans les bétons formulé à base de GP dans la présente étude n'est pas contrôlé, il est fonction de la composition du mélange et principalement de la fraction volumique et du type de GP (PEHD ou PET). En effet, il a été observé que le volume d'air entraîné dans le béton à base de GP augmente avec l'augmentation de la fraction volumique en GP en raison de leur comportement qui augmente l'eau libre dans le béton à l'état frais. Cette eau s'évapore pendant le processus de durcissement, laissant des vides remplis par l'air. Pour le

béton à base de PEHD (figure 4.a), cette augmentation est très faible, car la fraction volumique d'air entraîné ne dépasse pas 4,5% pour 30% en volume d'agrégats de PEHD, sachant que le volume d'air entraîné dans le béton de référence (B0) est d'environ 4,3%. Cependant, pour le béton de PET, l'augmentation de la fraction volumique d'air entraîné en fonction de la fraction volumique de granulats PET est plus prononcée, ces résultats convergent avec les constations rencontrées dans la littérature [3]

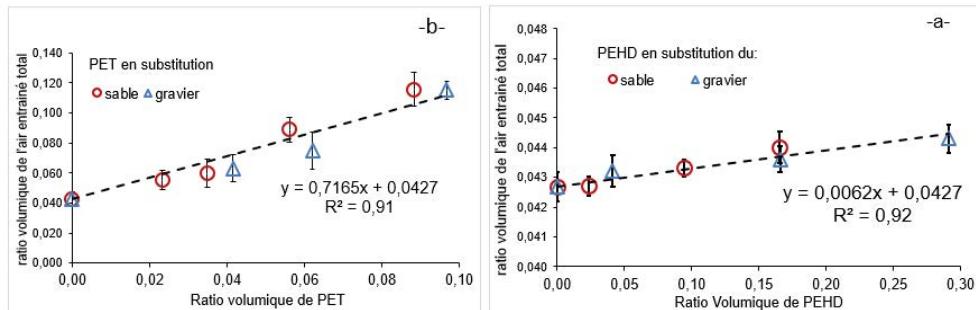


Figure 4 : Air total entraîné à l'état durci en fonction de la fraction volumique de plastique

Sur la base des résultats expérimentaux (figure 4), la fraction volumique totale d'air entraîné dans les bétons à base de GP, notée ici « a_t », peut être prédite en fonction de la fraction volumique des GP notée « p » par la loi linéaire suivante :

$$a_t = a_0 + C_a p \quad (1)$$

où a_0 est la fraction volumique d'air entraîné du béton de référence B0 (ici $a_0 = 0,0427$) et C_a est un paramètre constant qui dépend du type de GP ; C_a est identifié à 0,0062 pour le PEHD et à 0,7165 pour le PET. Ainsi, la quantité ($C_a p$) représente la fraction supplémentaire du volume d'air entraîné résultant de l'incorporation des GP dans le béton. Cette dernière sera désignée dans la suite par « a ».

4.2. Densité apparente

La densité apparente diminue avec l'augmentation du taux de substitution en volume des GN par les GP (Figure 5). De plus, il a été observé que l'effet du type de GN substitué est négligeable

sur la densité apparente (Figure 5). En outre, la fraction volumique de l'air entraîné affecte négativement la densité apparente du béton, en particulier pour les granulats de PET. Ainsi, la densité apparente, notée ici d , des bétons étudiés peut être prédite en fonction de la fraction volumique des GP (p) et de la fraction volumique d'air entraîné supplémentaire (a) par la loi de mélange suivante :

$$d = [1 - (p + a)] d_0 + p d_p \quad (2)$$

d_0 et d_p sont respectivement la densité apparente du béton de référence (B0) et la densité spécifique des GP. Étant donné que la fraction volumique d'air entraîné supplémentaire « a » peut être déterminée en fonction de la fraction volumique et du type de GP par $a = C_a \cdot p$, la densité apparente relative du béton à base des GP peut être prédite de manière satisfaisante (figure 5) uniquement en fonction de la fraction volumique et du type de GP selon la loi de mélange suivante :

$$\frac{d}{d_0} = [1 - p(1 + C_a)] + p \frac{d_p}{d_0} \quad (3)$$

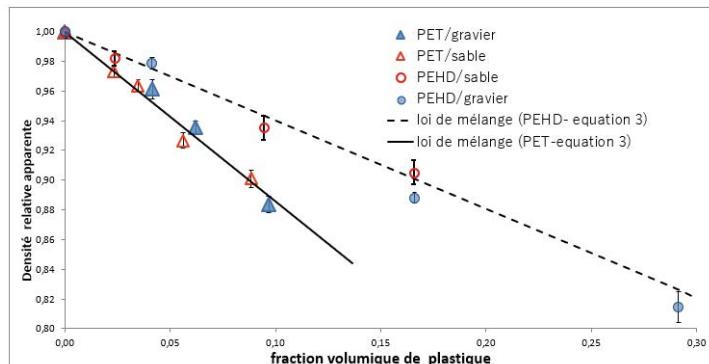


Figure 5 : Densité relative en fonction de la fraction volumique de plastique

4.3. Module d'Young

Le module d'Young, noté E , diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des GP (Figure 6). Cette diminution est plus prononcée pour les granulats en PET en raison de leur forme aplatie et irrégulière. De plus, il a été observé que l'effet du type du GN substitué (S ou G) est négligeable sur le module d'Young du béton (Figure 6). Ainsi, le module d'Young relatif des bétons à base des GP peut être prédit en fonction de la fraction volumique et du type de GP par la loi en puissance suivante qui est une loi de mélange généralisée (LMG) :

$$\frac{E}{E_0} = (1 - p(1 + C_a))^n \quad (4)$$

avec $n = 5,5$ pour le PET et $n = 2,5$ pour le PEHD (E_0 étant le module d'Young du béton de référence B0). Notons que Ben Youssef *et al.* [7] ont démontré que la même loi en puissance $(1-p)^{2,5}$ trouvée ici pour le béton à base de granulats en PEHD, prédit également le module de Young relatif du béton cellulaire non autoclavé (avec p est la fraction volumique de la mousse). De plus, Miled *et al.* [8] ont trouvé que la loi en puissance $(1-p)^2$ prédit le module de Young relatif du béton léger en polystyrène. Cette similitude dans le comportement élastique de ces trois types de béton à base de granulats légers peut s'expliquer par la forme similaire des granulés en PEHD, des billes de polystyrène et des vides dans le béton cellulaire, qui se comportent tous comme des pores sphériques dans la matrice de béton.

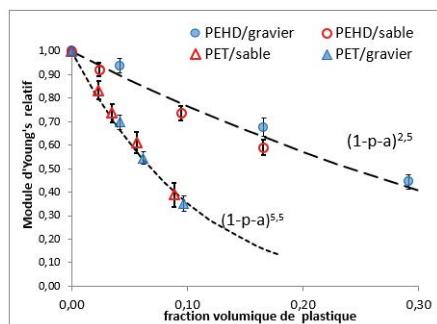


Figure 6 : Module d'Young relatif en fonction

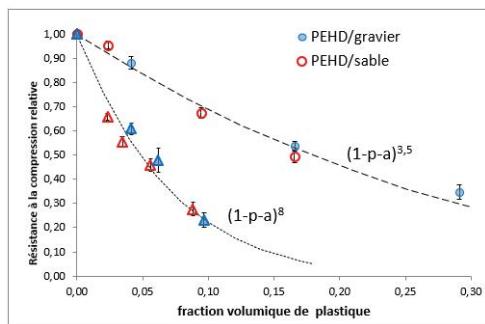


Figure 7 : Résistance à la compression relative du volume de plastique en fonction du volume de plastique

4.4. Résistance à la compression

La figure 7 confirme que la résistance relative à la compression du béton, notée R_c , diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des agrégats plastiques. Cette diminution prévisible

est plus prononcée pour le béton de PET. En fait, la résistance à la compression du béton de PET diminue d'environ 80% pour seulement 10% de fraction volumique de GP, alors qu'elle ne diminue que de 30% dans le cas du béton de PEHD pour la même fraction volumique de GP. En outre, il a été constaté que la résistance relative à la compression du béton à base de GP peut être prédite en fonction de la fraction volumique et du type de GP selon la loi de mélange généralisée suivante :

$$\frac{R_c}{R_{c0}} = (1 - p(1 + C_a))^m \quad (5)$$

avec $m = 8$ pour le PET et $m = 3,5$ pour le PEHD (R_{c0} étant la résistance à la compression du béton de référence B0). Il est intéressant de mentionner que la diminution de la résistance à la compression relative du béton à base d'agrégats en PEHD en fonction de la fraction volumique de PEHD suit presque la même tendance observée dans d'autres types de bétons légers contenant des pores sphériques tels que le béton mousse [7] ou le béton de polystyrène expansé [9].

5. CONCLUSION

A l'issue de la présente étude, nous concluons que la fraction volumique et le type de granulat en plastique (PEHD ou PET) ou encore sa forme (sphérique ou aplatie) sont les principaux paramètres microstructuraux régissant toutes les propriétés mécaniques des bétons à base de granulats plastiques. Par ailleurs, nous avons observé que le type d'agrégat naturel substitué (gravier ou sable) a un effet négligeable sur la densité et sur le comportement mécanique des bétons à base des GP étudiés. Finalement, des lois de mélange généralisées (LMG) permettent de prédire de manière satisfaisante les propriétés mécaniques des bétons à base de granulats plastiques en fonction de la fraction volumique et du type de GP (PEHD ou PET). Les perspectives de ce travail seraient de varier d'autre paramètres de formulation tel que la granulométrie des constituants et les caractéristiques de la pâte de ciment.

RÉFÉRENCES

- [1] S. Akcaozoglu, K. Akcaozoglu, and C. D. Atis, Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA), *Composites Part B: Engineering*, 45(1) (2013) 721-726.
- [2] S. Rahimi R., I. M. Nikbin, H. Allahyari, S. Habibi T., Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack, *Journal of Cleaner Production*, 126, (2016), 166-177.
- [3] F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, S. Jalali, Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre-rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview, *Construction and Building Materials* 30 (2012) 714-724.

- [4] Y.W. Choi, D.J. Moon, Y.J. Kim, M. Lachemi, Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles, *Construction and Building Materials* 23(8) (2009) 2829-2835.
- [5] N. Saikia and J. de Brito, Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate, *Construction and Building Materials*, 52, (2014) 236-244.
- [6] Nursyamsi and W.S. B. Zebua, The Influence of Pet Plastic Waste Gradations as Coarse Aggregate Towards Compressive Strength of Light Concrete, *Procedia Engineering*, 171, (2017), 614-619.
- [7] M. Ben Youssef., K. Miled, J. Néji, Mechanical properties of non-autoclaved foam concrete: analytical models vs experimental data, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2017) 1-9.
- [8] K. Miled, K. Sab, R. Le Roy, Effective elastic properties of porous materials: Homogenization schemes vs experimental data. *Mechanics Research Communications* 38, (2011) 131-135.
- [9] K. Miled, K. Sab, R. Le Roy, Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and Modelling, *Mechanics of Materials*, 39 (3), (2007) 222-240.

INFLUENCE DE LA POROSITÉ SUR LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU BÉTON INCORPORANT DES DÉCHETS DE BRIQUES CONCASSÉS

INFLUENCE OF POROSITY ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CONCRETE INCORPORATING CRUSHED BRICK WASTE

SESSION 3 : BÉTONS À BASE DE DÉCHETS OU DE GRANULATS RECYCLÉS

Wafa Ben Achour^{1,2}, Saloua El Euch Khay¹, Karim Miled³, Jamel Neji¹

1. Université Tunis El Manar - Laboratoire de Matériaux, d'Optimisation et d'Energie pour la Durabilité (LAMOED) - Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, BP 37, Le belvédère, 1002, Tunis
2. Institut Supérieur des Etudes Technologique de Radès, BP, 172-2098 - Radès Médina, Tunis
3. Université Tunis El Manar - Laboratoire de Génie Civil (LGC), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, BP 37, Le belvédère, 1002, Tunis – Karim.miled@enit.utm.tn
-

1. INTRODUCTION

La Tunisie est un pays en voie de développement où les secteurs du bâtiment et des travaux publics ne cessent d'évoluer et les besoins en granulats, par conséquent, ne cessent d'augmenter. Pour cette raison, et afin de limiter l'emprunt des granulats neufs (très nocif pour l'environnement) et en vue de contribuer au développement durable du pays, il devient nécessaire de chercher d'autres ressources en granulats. L'idée est l'utilisation des déchets de briques, en substitution des granulats

neufs, dans la fabrication de béton hydraulique routier, sachant que l'industrie du béton est l'un des plus grands consommateurs des ressources naturelles en granulats. En effet, le secteur de briqueterie en Tunisie libère annuellement des quantités importantes de déchets de brique. La production en 2015 a été estimée à 15 millions de tonnes [1]. Suite à une enquête effectuée auprès de quelques briqueteries, la quantité de déchets engendrée est d'environ 5%.

Le béton de brique est ainsi un béton qui contient en plus de l'eau et du ciment, des déchets de briques concassés finement

pour remplacer le sable neuf et d'autres concassés grossièrement pour remplacer le gravier neuf. La substitution peut être totale ou partielle.

Plusieurs investigations récentes à travers le monde avaient pour but la valorisation des déchets de briques dans le béton hydraulique où les chercheurs se sont intéressés à étudier l'influence de l'introduction de ces déchets sur les performances mécaniques des bétons. La plupart des études ont été menées en utilisant des déchets de briques concassés (finement et/ou grossièrement), pour remplacer le sable neuf, le gravier neuf, ou les deux simultanément en faisant varier les pourcentages de substitution du déchet dans le béton [2-9]. Il a été constaté par les différents chercheurs une baisse des caractéristiques du béton en présence de déchets de briques [2-9]. Selon certains chercheurs, la porosité de la brique concassée influe directement sur la porosité globale du béton, une substitution totale augmente la porosité du béton de 63% ce qui a par conséquent un effet négatif sur les caractéristiques mécaniques du béton [4,9]. Néanmoins, ces recherches ont toutes affirmées que ces déchets peuvent être utilisés avec succès pour produire un béton de qualité acceptable [2-9]. Ainsi, cette communication présente les résultats d'une étude expérimentale où différentes caractéristiques physiques et mécaniques du béton de brique ont été déterminées. Plusieurs formules à base de déchets de briques ont été mises au point en utilisant les modèles récents du LCPC. La résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage et le module d'élasticité ont été déterminés pour les différents mélanges à plusieurs échéances. Enfin, la porosité ouverte du béton de brique a été mesurée et son influence sur les caractéristiques mécaniques a été étudiée.

2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

2.1. Identification des matériaux et formulation

Le béton de brique est un béton hydraulique composé de granulats neufs (graviers et sables), de déchets de briques concassés, de ciment et d'eau. Lors de cette investigation un ciment portland de classe CEMI 42.5, répondant à la norme tunisienne NT47.01 [10] et ayant une densité spécifique de 3.1 a été utilisé.

Les granulats neufs utilisés sont un gravier 4/16 mm (noté Gn) et un sable de concassage 0/4 mm (noté Sn), provenant d'une carrière du nord du pays. Les déchets de briques, provenant d'une briqueterie du centre du pays ont été criblés après leur concassage au laboratoire au moyen d'un mini concasseur à mâchoires pour obtenir des classes granulaires similaires à celles des granulats neufs, à savoir un sable brique 0/4 mm (noté Sb) et un gravier brique 4/16 mm (noté Gb). Un échantillon de chaque classe granulaire de brique est montré dans la Figure 1. La distribution granulométrique des différents granulats utilisés dans cette étude est présentée dans la Figure 2. Le sable Sb et le sable Sn présentent deux courbes granulométriques étalées et similaires allant de 0 à 4mm, et les deux graviers Gn et Gb présentent deux courbes granulométriques presque superposées.



Figure 1 : Echantillons de sable et de gravier de déchets de brique

Les propriétés physiques et les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés ont été déterminées selon les normes en vigueur, et les résultats ont été récapitulés dans le Tableau 1. Les briques concassées présentent un coefficient d'absorption d'eau nettement supérieur à celui des granulats neufs en raison de leur porosité. La résistance à la fragmentation du gravier neuf est plus élevée que celle du gravier brique.

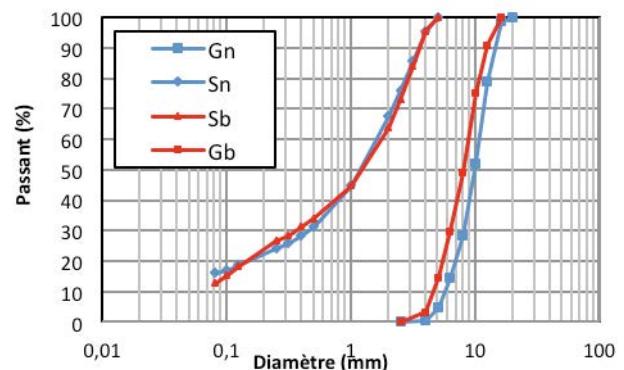


Figure 2 : Courbes granulométriques des granulats neufs et recyclés utilisés

Tableau 1 : Propriétés physiques des granulats neufs et recyclés

	Gn	Gb	Sn	Sb
Densité volumique réelle (NF P 18-554) (NF P 18-555)	2.7	2.3	2.7	2.3
Equivalent de sable ES (NF P 18-598)	-	-	75.5	78.9
Module de finesse MF (NF P 18-560)	-	-	2.95	2.9
Impuretés t(%) (NF P 18-591)	1.3	0.7	-	-
Absorption d'eau(%) (NF P 18-554) (NF P 18-555)	0.56	12.4	0.56	12.4
Los Angeles LA(%) (NF P 18-573)	22.8	38		

L'étude de formulation a été menée en utilisant les modèles du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC, regroupés dans le logiciel Bétonlab Pro [11], destiné à la formulation des bétons hydrauliques et à l'optimisation de leur composition. La méthode est basée sur une analyse granulaire du matériau permettant de maximiser la compacité d'un mélange granulaire quelconque. Le rapport Eeff/Ca a été maintenu constant et égal à 0,57.

Six formules de béton désignées par B0, B10, B20, B30, B60 et B100 et caractérisées par respectivement 0%, 10%, 20%, 30%, 60% et 100% en pourcentage de substitution des granulats neufs de sable et gravier par des déchets de brique, ont été mises au point. La composition des différentes formules est donnée dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Composition des formules de béton testées

Formules	E eff kg/m ³	C kg/m ³	Sn kg/m ³	Gn kg/m ³	Sb kg/m ³	Gb kg/m ³
B0	190	330	930	913.5	0	0
B10	190	330	837	822.1	79.2	77.8
B20	190	330	744	734.7	158.5	155.6
B30	190	330	651	639.5	237.7	233.4
B60	190	330	372	365.4	475.3	467
B100	190	330	0	0	792.2	778.2

L'absorption d'eau des déchets de brique a été prise en compte en imbibant d'une part les graviers de brique (Gb) dans l'eau pendant 24 heures et qui sont ensuite soigneusement essuyés par un chiffon avant leur utilisation, et en ajoutant d'autre part, la quantité d'eau absorbée par le sable de brique (Sb) lors du gâchage.

2.2. Essais réalisés

Lors de cette campagne expérimentale, des essais à l'état frais et à l'état durci des différents mélanges de béton de brique ont été effectués au laboratoire.

La maniabilité du béton a été testée pour tous les mélanges au cône d' Abrams (NF P 18-451) et l'affaissement a été trouvé égal environ à 6 cm ce qui représente une bonne consistance pour un béton plastique (Figure 3a). L'essai de l'air occlus (NF P 18-353) a été réalisé au moyen d'un aéromètre à béton (Figure 3b) afin de mesurer la quantité d'air présente dans le béton avant la prise.



Figure 3 : Essais sur béton frais : a) Mesure d'affaissement au cône d' Abrams ; b) Essai de l'air occlus

Ensuite, les six formules ont été soumises aux essais mécaniques standards afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de chaque composition : Des essais de compression simple (NF P 18-406), des essais de traction par fendage (NFP 18-408) et des essais du module d'élasticité (ISO 6784) (Figures 4a, 4b et 4c). Les différents essais ont été réalisés à 7, 14 et 28 jours d'âge du béton. Pour chaque formule, 3 éprouvettes cylindriques (10cmx20cm) ont été testées à chaque âge. Par ailleurs, les six formules ont été soumises à l'essai de la porosité ouverte (NF P 18-459) afin de déterminer le pourcentage de pores accessibles qui sont, soit en communication directe avec l'extérieur, soit de proche en proche.



Figure 4 : Essais réalisés sur béton durci : a) Essai de compression ; b) Essai de traction par fendage ; c) Essai du module d'élasticité ; d) Essai de la porosité ouverte

3. RÉSULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSION

3.1. Essais sur béton frais

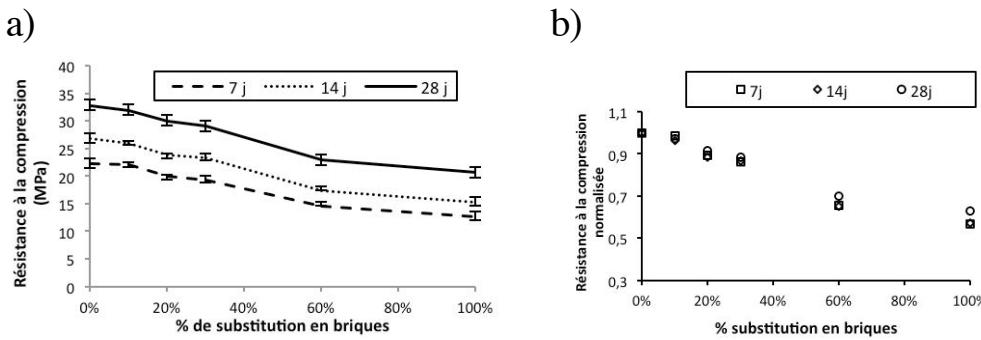
Les résultats de l'essai de l'air occlus montrent bien que le volume d'air augmente avec le pourcentage de substitution en déchets de brique. Ce volume dépasse le double de celui du béton témoin B0 (sans déchets de brique) pour le béton B100 (Tableau 3). Ceci est dû essentiellement à la porosité élevée des déchets de briques concassés.

Tableau 3 : Les volumes d'air occlus présents dans les différentes formules de béton

Formules	B0	B10	B20	B30	B60	B100
Air occlus (l/m ³)	9.78	10.7	12.2	14.5	21.83	24.83

3.2. Essais sur béton durci

L'évolution de la résistance à la compression avec le temps et avec le pourcentage de substitution en déchets de briques est présentée dans la Figure 5a. La Figure 5b montre les valeurs de la résistance normalisée (le rapport de la résistance de chaque formule sur la résistance du béton témoin B0).

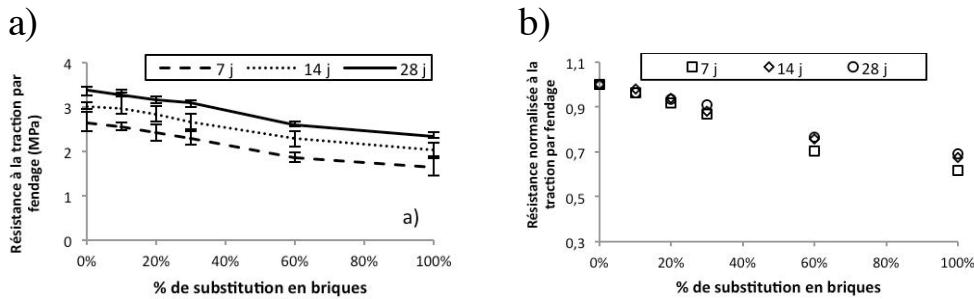


**Figure 5 : a) Evolution de la résistance à la compression en fonction du % de substitution en briques ;
b) Variation de la résistance à la compression normalisée en fonction du pourcentage de substitution en briques**

Il est clair d'après les Figures 5a et 5b que la résistance à la compression augmente avec l'âge du béton et diminue en présence de déchets de brique. Pour un pourcentage de substitution de 10%, la baisse de la résistance à 28 jours est non significative. Pour un pourcentage de substitution de 30%, la baisse de la résistance reste faible de l'ordre de 12% à 28 jours. Toutefois, la résistance à la compression marque une réduction de 37% pour une substitution totale (B100). Les valeurs de la résistance à la compression

trouvés restent acceptables pour les bétons de chaussées de classe 2 au sens de la norme française NF P 98-170 [12].

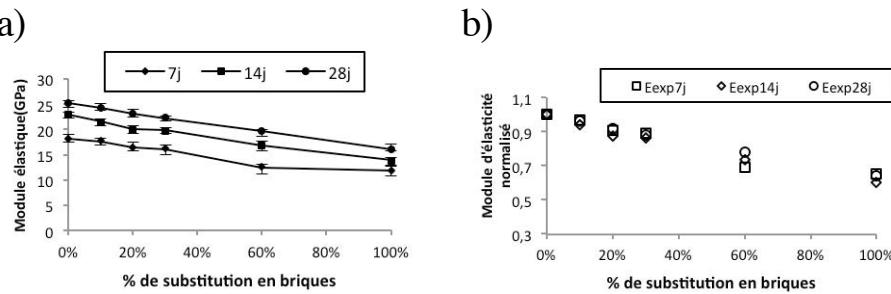
La résistance à la traction par fendage augmente avec l'âge et baisse aussi en présence de déchets de briques (Figures 6a et 6b) ; cette baisse est de l'ordre de 30% pour le béton B100 à 28 jours. Néanmoins, la valeur de la résistance à la traction reste supérieure à 2,3 MPa à 28 jours, une valeur supérieure à l'exigence minimale normative [12].



**Figure 6 : Variation de la résistance à la traction par fendage du béton en fonction du % de substitution en briques :
a) Résistance à la traction par fendage ; b) Résistance à la traction par fendage normalisée**

Le module d'élasticité a été déterminé pour les différentes formules testées. Les résultats obtenus sont représentés sur les Figures 7a et 7b. Le module d'élasticité du béton diminue avec l'augmentation du pourcentage de substitution des granulats neufs par

les granulats de brique concassés. A 28jours, le B100 enregistre une baisse de son module d'environ 36% par rapport au béton témoin. Cela confirme que le module d'élasticité est gouverné en grande partie par le module d'élasticité des granulats utilisés.



**Figure 7 : Variation du module d'élasticité en fonction du pourcentage de substitution en briques :
a) Module d'élasticité mesuré ; b) Module d'élasticité normalisé**

Les valeurs de la porosité ouverte mesurées ont été représentées en fonction du pourcentage de substitution en déchets de briques (Figure 8). Il est clair que l'augmentation du pourcentage de substitution en déchets de briques s'accompagne par une augmentation de la porosité ouverte du béton qui augmente de 55% pour le B100 par rapport à celle de B0. En effet, la présence de brique, qui est un matériau contenant des pores

connectés entre eux formant des canaux très fins, augmente la porosité du béton. Le lissage des points expérimentaux aboutit à la loi empirique suivante (équation (1)) reliant la porosité ouverte (p) du béton de brique au pourcentage de substitution en déchets de briques (%B) :

$$p (\%) = p_0 \cdot e^{0,7 \% B} \quad (1)$$

$p(\%)$ étant la valeur de la porosité du mélange considéré, p_0 représente la porosité du mélange à 0% de déchets de briques et %B est le pourcentage de briques présent dans chaque formule.

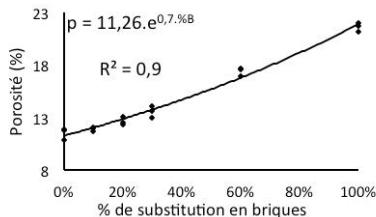


Figure 8 : Variation de la porosité du béton en fonction du pourcentage de substitution en briques

4. INFLUENCE DE LA POROSITÉ SUR LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Afin d'étudier l'influence de la porosité sur le module élastique et les résistances à la compression et à la traction, ces derniers ont été représentés en fonction de la porosité pour les différents mélanges de béton étudiés. Les résultats sont présentés sur la (Figure 9). La même tendance a été enregistrée : Le module d'élasticité, les résistances à la compression et à la traction par

fendage diminuent en fonction de la porosité, ce qui confirme l'importante de ce paramètre et son effet négatif sur les caractéristiques mécaniques des bétons à base de brique. Les corrélations obtenues sont définies par les équations (2), (3) et (4). Notons que les coefficients de détermination pour ces trois relations dépassent 0.95.

$$E = 122.p^{-0.65} \text{ (GPa)} \quad (2)$$

$$R_c = 197.p^{-0.74} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

$$R_t = 13.p^{-0.56} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

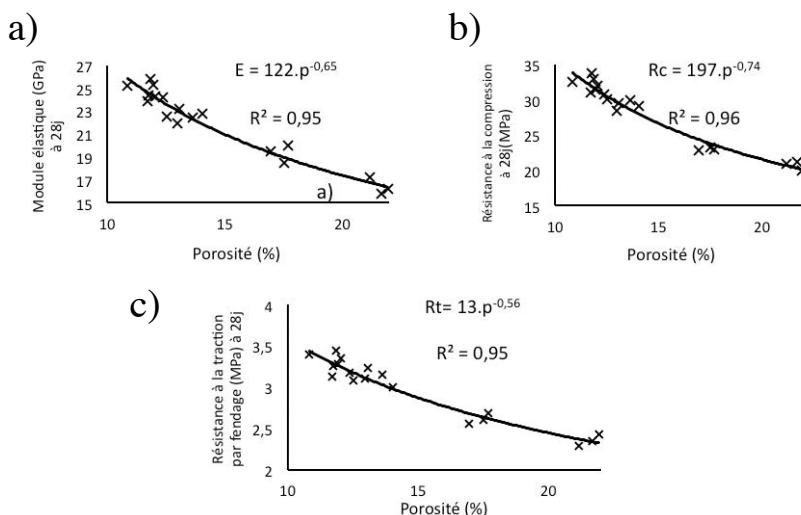


Figure 9 : Variation des caractéristiques mécaniques en fonction de la porosité : a) Module élastique ; b) Résistance à la compression ; c) Résistance à la traction par fendage

5. CONCLUSION

Cette investigation a permis de caractériser un béton hydraulique à base de déchets de brique à différents taux de substitution (variant entre 0 et 100%) de granulats neufs de sable et gravier par les déchets de briques concassés. Ainsi, six mélanges de béton ont été formulés en utilisant le modèle d'empilement compressible du LCPC. L'effet de la substitution de granulats neufs par ces déchets a été analysé à travers des essais de laboratoire standards. Les résultats trouvés ont permis de tirer les principales conclusions suivantes :

- Pour un pourcentage de substitution allant jusqu'à 30%, la baisse des résistances de compression et de traction par fendage est modérée. Au-delà de 30%, la diminution des résistances devient plus remarquable. Toutefois, toutes les valeurs trouvées restent supérieures aux valeurs minimales exigées par la norme en vigueur (NF P 98-170).
- Le module d'élasticité a également enregistré une baisse avec le pourcentage de substitution en déchets de briques. À 28 jours, le mélange B100 (100% de substitution) enregistre une baisse de son module d'environ 36% par rapport au béton témoin B0 (0% de substitution). Cela confirme que

le module d'élasticité est piloté par le module d'élasticité des granulats utilisés dans le béton.

- La présence de la brique qui est un matériau poreux augmente la porosité du béton. En effet, plus le pourcentage de substitution est élevé plus la porosité du béton augmente. Cette augmentation engendre par conséquent une diminution des caractéristiques mécaniques du béton. Les résistances à la compression, à la traction par fendage et le module d'élasticité diminuent avec l'augmentation de la porosité du béton. Enfin, des lois empiriques de type puissance reliant ces caractéristiques mécaniques à la porosité ont été proposées.

RÉFÉRENCES

- [1] Agence de promotion de l'industrie et de l'innovation, 2014. Les industries des matériaux de construction, de la céramique et du verre en Tunisie.
- [2] F. Debieb, S. Kenai, 2008. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete, *Constr. Build. Mater.* 22:886-893.
- [3] P.B. Cachim, 2009. Mechanical properties of brick aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 23:1292-1297.
- [4] Ali A. Aliabdo, Abd-Elmoaty M. Abd-Elmoaty, Hani H. Hassan, 2014. Utilization of crushed clay brick in concrete industry, *Alexandria Engineering Journal.* 53:151-168.
- [5] FM. Khalaf, AS. Devenny, 2004. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review. *J Mater Civil Eng* 16(4):331-40.
- [6] AA. Akhlar Uzzman, A. Hasnat, 1983. Properties of concrete using crushed brick as aggregate. *ACI Con int Design Constr* 5(2):58-63.
- [7] S. Kenai, F. Debieb, L. Azzouz, 2002. Performances of concrete made using brick masonry as coarse and fine recycled aggregates, In: Discovery, recycling, re-integration. R'02-6th world congress on integrated resources management, Geneva.
- [8] S. Kenai, F. Debieb, 2011. Characterization of the durability of recycled concretes using coarse and fine crushed bricks and concrete aggregates, in: *Materials and Structures* 44:815-824.
- [9] Kibriya T, Speare PRS. 1996. The use of crushed brick coarse aggregate in concrete. In: Proceedings of the international conference, Dundee; 495-503.
- [10] INORPI, Ciment, 1996. Composition, Spécification et Critères de conformité, NT47-01.
- [11] Sedran Th., De Larrard F., 2000. BétonlabPro2 – Logiciel de formulation de bétons – version exécutable sous Windows, logiciel sur CD ROM avec aide en ligne, Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées.
- [12] AFNOR. 1992. Chaussées en béton de ciment, exécution et contrôle. NFP98-170.

RÉPONSE DU BÉTON MOUSSE SOUS L'EFFET D'UNE SOLLICITATION DYNAMIQUE : ONDE DE CHOC ET IMPACT BALISTIQUE

BLAST AND BALLISTIC LOADING ON FOAM CONCRETE: EXPERIMENTAL APPROACH

SESSION 5 : BÉTONS LÉGERS ET BÉTONS FIBRÉS

Marwa Ben Youssef^{1,4}, Ahmed Siala², Hamza Ousji², Karim Miled³, Jamel Neji¹

1. Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis,
LAMOED, 1002, Tunis, Tunisie

2. Académie militaire, Fondouk Jedid, 8030, Grombalia, Tunisie

3. Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, LGC, 1002, Tunis, Tunisie

4. Université Privée de Tunis Carthage, 2036, La Soukra, Tunisie

marwa.benyoussef@utctunisie.com

1. INTRODUCTION

La sécurité des biens et des personnes et la protection contre les effets des explosions ou des attaques terroristes est une des premières préoccupations des travaux de recherche. En effet, le nombre des attaques terroristes a bondi de 600% pendant les derniers quinze ans. Les structures et les personnes ont été sollicitées sous deux types de chargement : (i) une onde de choc générée par une détonation d'une charge explosive et (ii) un impact balistique effectué par une balle. Des études ont été menées pour développer des systèmes de protection. Essentiellement, il est possible de distinguer deux types de recherches : des recherches sur la forme de la structure de protection et d'autres sur les matériaux absorbants. Dans ce travail, le béton mousse est étudié comme étant un matériau absorbant. En effet, ce béton est un matériau poreux très performant en termes d'absorption sonore et d'isolation thermique [1-6]. Par conséquent, le béton

mousse est caractérisé à priori, par un bon pouvoir d'absorption d'ondes de choc et d'impacts balistiques.

Ainsi, le but de ce travail est d'étudier d'abord le comportement dynamique du béton mousse sous l'effet d'une onde de choc générée par une charge explosive et ensuite sous l'effet d'un impact balistique.

2. FORMULATION ET CONFECTON DU BÉTON MOUSSE

2.1. Choix et caractérisation des matériaux utilisés

Le béton mousse objet de cette étude est constitué de :

- **Un liant** : un ciment type CEM I 42,5 ;

- **Eau de gâchage** : l'eau du réseau de distribution (l'eau de la SONED) qui se caractérise par une faible salinité et un PH neutre (**Salinité = 0,6g /l, PH= 7,8**) ;
- **Un Agent moussant** : l'agent moussant utilisé dans cette étude est l'agent moussant organique 'NEOPOR' ;
- **Un sable** : Le 'bon' sable pour le béton mousse doit respecter des critères et des recommandations bien spécifiques [1]. En se basant sur une étude récente de caractérisation [1-3], le sable de Borj Hfaidh, de granulométrie 0/2mm et répondant à tous les critères spécifiques demandés, a été choisi pour la production du béton mousse.

2.2. Formulation des mélanges du béton mousse

Cinq compositions de béton mousse ayant des densités comprises entre 0,5 et 1,4, ont été formulées à partir d'une même matrice cimentaire (un mortier) caractérisée par un rapport massique (E/C) égal à 0,38 et par un rapport massique (S/C) égal à 1. Les compositions de ces mélanges ($1m^3$) de béton mousse sont résumées dans le tableau 1.

D'abord, la mousse est produite moyennant l'agent moussant, le générateur de mousse, le compresseur d'air et la pompe à eau et de l'eau.

Ensuite, le mortier est préparé en mélangeant dans un malaxeur pendant 5 minutes l'eau de gâchage, le ciment et le sable. Enfin, la mousse est ajoutée au mortier et le malaxage est poursuivi pendant une minute. Après coulage du béton mousse dans des moules dont les parois intérieures ont été huilées au préalable,

le démoulage est possible après 6 à 8 heures. La cure de ces échantillons se fait au laboratoire à l'air libre et à la température ambiante ($20 \pm 2 ^\circ C$).

2.3. Confection et fabrication du béton mousse

La confection du béton mousse nécessite les matériaux cités précédemment (ciment+ sable+ eau+ mousse) et le matériel suivant :

- **Un générateur de mousse** : Il transforme l'agent moussant liquide en une mousse. Cette dernière doit être utilisée aussitôt fabriquée avec une masse volumique comprise entre 70 g/l et 80 g/l pour obtenir les densités prévues du béton mousse.
- **Un compresseur d'air** : Le compresseur d'air doit fournir un débit de 600 l/min. le compresseur doit être équipé par un filtre à eau et un filtre à huile afin que l'air soit pur.
- **Une pompe à eau** : La pression nécessaire dans cette pompe est de 4 bars avec un débit d'eau stable de l'ordre de 50 l/min.
- **Un malaxeur de béton** : Il est préconisé d'utiliser un malaxeur dont l'axe horizontal tourne de façon que la mousse s'incorpore facilement avec les matériaux lourds (le mortier dans le cas de la présente étude).
- **Des moules** : Le coulage du béton mousse se fait dans des moules de différentes tailles selon le besoin. Dans le cas de la présente étude et afin de caractériser la gamme du béton mousse sous l'effet d'une sollicitation dynamique, des moules prismatiques de dimensions ($30 \times 30 \times 5 \text{ cm}^3$) et ($120 \times 120 \times 18 \text{ cm}^3$) ayant des faces planes et parallèles ont été utilisés.

Tableau 1 : Compositions ($1m^3$) des différents mélanges de béton mousse

Densité Théorique	0,5	0,6	0,8	1,2	1,4	2,1 (mortier de référence dit « matrice »)
Ciment C (kg)	220	260	340	500	580	927
Sable S (kg)	220	260	340	500	580	927
Eau E (kg)	84	100	130	190	222	350
Mousse M (litre)	800	720	630	460	370	0

3. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU BÉTON MOUSSE SOUS L'EFFET D'UNE ONDE DE CHOC

Une explosion peut être définie comme étant « La transformation chimique rapide d'une substance explosive, accompagnée d'un dégagement d'une très grande quantité d'énergie ». La détente des gaz générés peut donner lieu à des effets mécaniques et en particulier à une onde de choc caractérisée par une montée brusque de la pression dans une durée de temps très courte [7]. A de très courtes distances (charge explosive – cible), la propagation de l'onde de choc dépend de la forme initiale de la charge explosive : si la forme est sphérique, la propagation de l'onde de choc est sphérique. En réalité, vue les dimensions de la structure sollicitée par rapport à la distance entre la charge

explosive et la structure sollicitée [7, 8], la structure est considérée comme étant sollicitée par une onde de choc plane. Ce sujet a fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques depuis environ une vingtaine d'années [9-12]. De ce fait, les éprouvettes du béton mousse ont été testées sous l'effet d'une onde de choc plane. Cette dernière a été générée par un tube à choc explosif (Explosive-DrivenShock Tube EDST) [8]. Ce sujet a fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques depuis environ une trentaine d'années [1-6].

Ce dispositif expérimental est illustré dans la Figure 1. Un tube cylindrique de diamètre 0,2 m et de longueur 1m a été utilisé pour générer une onde de choc plane à sa section de sortie. La charge explosive, à savoir 30g de C4, est installée à l'entrée du tube. En fonction du rapport diamètre du tube/longueur du tube, une onde de choc plane est obtenue à la sortie du tube.

En utilisant les modèles analytiques développés par Ousji *et al.* (2015) [8], la pression et l'impulsion appliquées sur la plaque du béton mousse ont été calculées. La pression réfléchie est égale à 3,2MPa, tandis que l'impulsion réfléchie est égale à 589Pa.s. Face à la sortie du tube à choc, un échantillon du

béton mousse, de dimension (30x30x5cm³) est collé à un support rigide. Une caméra rapide (GoPro), d'une capacité de filmer 260 photos/seconde, a été installée dans le même plan de l'échantillon (Figure 1).

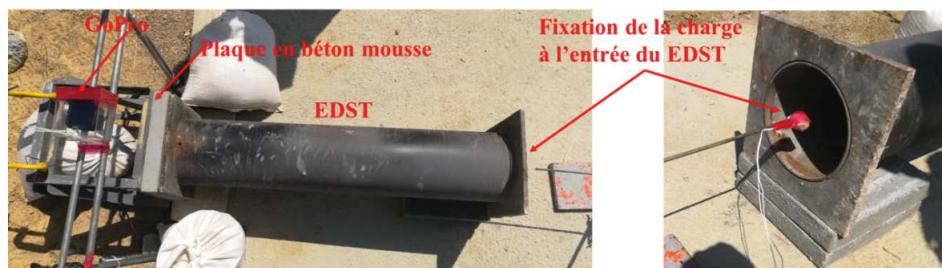


Figure 1 : Dispositif expérimental utilisé pour évaluer le comportement du béton mousse sous l'effet d'une onde de choc

Afin de vérifier la répétabilité des tests, trois essais ont été exécutés pour chaque densité du béton mousse. Une étude qualitative a été effectuée en vue d'identifier les effets de l'onde de choc sur le béton mousse de différentes densités. Le tableau suivant récapitule les résultats obtenus.

Ces résultats permettent de tirer les observations et les conclusions suivantes :

- L'absorption de l'onde de choc se traduit essentiellement par la pulvérisation et la fracturation du béton mousse.

- Plus la densité est faible plus le mécanisme de pulvérisation est favorisé, ce qui permettra de réduire la pression maximale et l'impulsion. En contrepartie, afin de garantir l'absorption de la totalité de l'énergie de l'onde de choc, il faudrait augmenter l'épaisseur de la plaque du béton mousse.
- Une étude paramétrique supplémentaire est nécessaire afin de pouvoir identifier les caractéristiques d'une plaque de béton mousse (densité et épaisseur) nécessaires pour absorber une onde de choc bien déterminée.

Tableau 2 : Résultats qualitatifs de l'effet d'une onde de choc sur différentes densités du béton mousse

Densité	Résultats	Observations
0,5		<ul style="list-style-type: none"> – Une grande partie du béton mousse a été pulvérisée – Une déformation de la plaque en acier installée derrière le béton mousse a été constatée, ce qui amène à conclure que le béton mousse n'a pas absorbé la totalité de l'énergie de l'onde de choc – Afin d'absorber totalement l'onde de choc, il faudrait augmenter l'épaisseur de la plaque du béton mousse
0,6		<ul style="list-style-type: none"> – Une partie du béton mousse a été pulvérisée – Les dimensions des fragments du béton mousse générés après le passage de l'onde de choc sont plus importantes que dans le cas précédent (densité 0,5)
0,8		<ul style="list-style-type: none"> – Une très faible quantité de béton mousse a été pulvérisée – L'absorption de l'onde de choc est essentiellement assurée par la fracturation du béton mousse
2,1		<ul style="list-style-type: none"> – Les fragments ont une dimension d'environ 10 cm – L'absorption de l'onde de choc est assurée par la fracturation du mortier

4. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU BÉTON MOUSSE SOUS L'EFFET D'UN IMPACT BALISTIQUE

4.1. Protocole expérimental

L'étude d'un impact balistique est examinée en faisant varier la balle (section et masse) et la distance entre le départ de la balle et la cible (**échantillon de dimension** 120x120x18 cm³). Sachant qu'en augmentant cette distance, la vitesse de la balle juste avant l'impact diminue. Dans cette étude, trois balles ont été utilisées : une balle (A) de diamètre 9mm, une balle (B) de diamètre 5,56mm et une balle (C) de diamètre 7,62mm. Vue la faible vitesse initiale de la balle type A (environ 370 m/s), deux distances par rapport à la cible ont été considérées à savoir 10 et 25m. Tandis que pour les balles B et C (la vitesse initiale est environ 900 m/s), trois distances ont été considérées à savoir 10, 25 et 100m. Deux densités du béton mousse ont été utilisées à savoir 1,2 et 1,4 et comparées par la suite avec le mortier de référence

de densité 2,1. Pour chaque configuration (Densité - Balle - Distance), la distance de perforation dans la cible (l'échantillon) a été enregistrée.

4.2. Résultats et interprétation

La distance moyenne de perforation de la balle dans le béton mousse est récapitulée dans la figure 2. Chaque configuration a été répétée trois fois. Une reproductibilité acceptable a été observée avec un écart type relatif inférieur à 5,8%.

Les essais réalisés ont permis de constater que :

- La pénétration d'une balle augmente en diminuant la densité du mur, ce qui était prévisible.
- La variation de la distance de tir n'a pas de grands effets sur la variation de pénétration de balle. Ceci est dû à la grande vitesse de la balle.
- Le risque qu'une balle ricoche est beaucoup plus élevé pour un mur sans mousse. Le mur en béton mousse constitue un piège à balles, surtout que les balles restent intactes après les tirs surtout pour les faibles densités (figure 3).

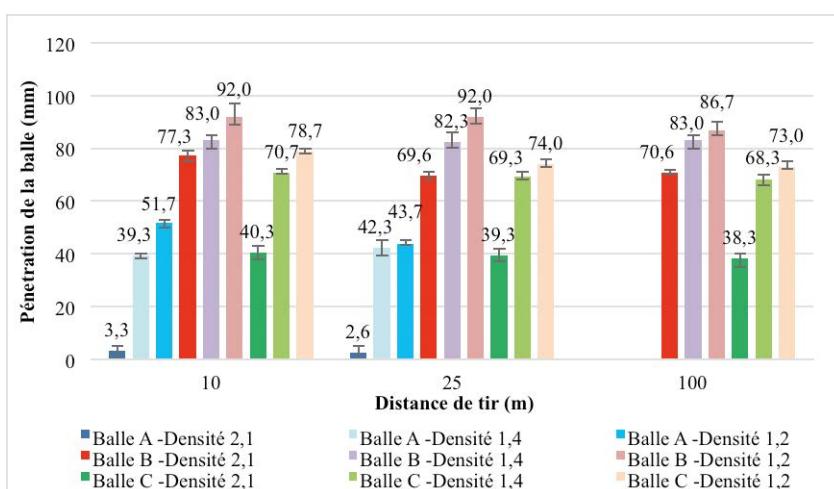


Figure 2 : Distance de perforation mesurée pour chaque configuration (Densité - Balle - Distance)



a) Impact d'une balle de type A sur un mur en mortier de densité 2,1 (la balle a ricoché)



b) Balles retirées intactes du béton mousse de densités 1,2 et 1,4

Figure 3 : Impacts balistiques sur le mortier et le béton mousse

5. CONCLUSION

Un dispositif expérimental permettant le confinement et la propagation d'une onde de choc dans un tunnel a permis de constater que le béton mousse a un excellent pouvoir absorbant de l'onde de choc par pulvérisation, pour des densités inférieures à 0,8. Une étude de l'épaisseur des murs en béton mousse permettra d'assurer une meilleure protection contre les effets des explosions. Enfin, l'examen à l'air libre des effets des impacts balistiques sur un mur en béton mousse a permis de constater que ce matériau est un excellent piège à balle pour des densités inférieures à 1,4. Le phénomène de ricochet disparaît complètement. Ainsi, le béton mousse est un béton poreux qui permet d'atténuer les effets des ondes de choc et d'avoir un bon comportement vis-à-vis des impacts balistiques.

RÉFÉRENCES

- [1] Ben Youssef M., 2018. Etude expérimentale et modélisation du béton mousse. Thèse de doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 1002, Tunis, Tunisie.
- [2] Ben Youssef M., Miled K. & Néji J., 2017. Mechanical properties of non-autoclaved foam concrete: analytical models vs. experimental data. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 10.1080.
- [3] Ben Youssef M., Lavergne F., Sab K., Miled K., Neji J., 2018. Upscaling the elastic stiffness of foam concrete as a three-phase composite material. *Cement and Concrete Research*, 10.1016,13-24.
- [4] K. Miled, O. Limam, 2016. Effective thermal conductivity of foam concretes: homogenization schemes vs experimental data and FEM simulations. *Mechanics Research Communications* 76 (2), 96-100.
- [5] Y.H.M. Amran, N. Farzadnia & A.A. Ali, 2015. Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials* 101, 990–1005.
- [6] D.K. Panesar, 2013. Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction and Building Materials* 44, 575–584.
- [7] Hetherington, J. & Smith, P., s.d., 1994. *Blast and Ballistic Loading of Structures*. 1st Edition éd. s.l.:CRC Press, Reference - 336 Pages ISBN 9780750620246 - CAT# Y132398.
- [8] Ousji, H. *et al.*, 2015. Parametric study of an explosive driven shock tube as blast loading tool. *Experimental Techniques*.
- [9] Larry C. Muszynski, Michael R. Purcell, 2003. Use of Composite Reinforcement to Strengthen Concrete and Air-Entrained Concrete Masonry Walls against Air Blast. *Journal of composites for construction*.
- [10] Abhishek Rajput, M.A. Iqbal, 2017. Ballistic performance of plain, reinforced and pre-stressed concrete slabs under normal impact by an ogival-nosed projectile. *International Journal of Impact Engineering*.
- [11] L.F. Pereira, J. Weerheim, L.J. Sluys, 2018. Simulation of compaction and crushing of concrete in ballistic impact with a new damage model. *International Journal of Impact Engineering*.
- [12] Abhishek Rajput, M.A. Iqbal, N.K. Gupta, 2018. Ballistic performances of concrete targets subjected to long projectile impact. *Thin-Walled Structures*.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES D'UN BÉTON CLASSIQUE ALLÉGÉ PAR L'AJOUT DE PAILLES TRAITÉES

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A CLASSIC CONCRETE LIGHTENED BY STRAWS

SESSION 5 : BÉTONS LÉGERS ET BÉTONS FIBRÉS

Abderraouf Trabelsi^{1,2} et Zied Kammoun³

1. Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, LR-03-ES05 Laboratoire de Génie Civil, 1002, Tunisia – abederraouftrabelsi@gmail.com
 2. Académie Militaire, département génie civil, fondouk jadid, Tunisia
 3. Université de Carthage, Institut Supérieur des Technologies de l'Environnement de l'Urbanisme et du Bâtiment, 2 Rue de l'Artisanat Charguia 2, 2035 Tunis, Tunisia
-

1. INTRODUCTION

Dans plusieurs pays, la réutilisation de divers déchets est devenue nécessaire pour éviter les nuisances environnementales et assurer des avantages économiques. Les déchets agro-industriels, en particulier les matériaux lignocellulosiques, augmentent les effets environnementaux de l'homme, et leur réutilisation affecte avantageusement la santé humaine en général. De plus, l'un des intérêts de la stratégie actuelle de développement du logement est la durabilité. L'utilisation des déchets agro-industriels pour développer des éco-matériaux dans la construction peut réduire le coût des matériaux de construction, économiser les ressources naturelles, augmenter le niveau de confort et protéger la santé et l'environnement. Ainsi, de nombreuses études considèrent l'ajout de déchets lignocellulosiques dans une matrice cimentaire, et exploitent leur aspect renouvelable et leurs bonnes qualités thermiques et acoustiques. L'idée d'introduire un déchet lignocellulosique dans un béton de sable pour améliorer ses performances thermiques a été étudiée dans de nombreuses

recherches. Dans ce contexte, les bétons et mortiers de sable ont déjà été allégés par l'addition de chanvre, de fibres de palmier dattier, de bambou, de fibres alfa et de pailles [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Dans l'ensemble, les résultats ont montré une amélioration significative notamment en matière de légèreté et d'isolation thermique. Néanmoins, un retrait élevé et une faible résistance mécanique ont été enregistrés. Afin de minimiser la perte de résistance mécanique du composite, différents traitements peuvent être appliqués aux déchets lignocellulosiques avant leur utilisation [1, 7, 8, 9]. Parmi les déchets lignocellulosiques, la paille représente un matériau économique abondant présent dans la plupart des pays, et caractérisée par sa légèreté et ses bonnes caractéristiques d'isolation thermique. C'est pourquoi la paille est traditionnellement utilisée dans de nombreux pays pour la construction de maisons. Ces constructions bénéficient du faible coût de la paille et de son excellente qualité d'isolation [10, 11, 12, 13]. Des travaux récents ont étudié la réutilisation de ce matériau dans le béton de sable [14, 15] et ont étudié l'influence de la quantité de paille et de son traitement sur les

propriétés physico-mécaniques. Mais si les bétons de sable, qui ne comportent pas de gravier, sont capables de remplacer les bétons conventionnels dans certaines structures, le béton traditionnel reste le plus utilisé dans les constructions, et l'addition de la paille dans ces bétons n'a pas été étudiée. Dans ce cadre le présent travail vise à élaborer un béton léger basé sur une formulation classique de gravier et de sable et utilisant de la paille, et d'étudier différentes propriétés mécaniques en utilisant certains traitements pour les pailles.

2. MATÉRIAUX UTILISÉS

Le béton considéré est un mélange de sable, de gravier, de ciment et d'eau. Dans ce mélange, la paille est utilisée comme inclusion.

2.1. Sable et gravier et ciment

Le sable utilisé dans cette étude est de 0/2,5 mm qui provient de la carrière de Khelidia. Le gravier (4/12 mm) provient de la carrière Jbel-Ressas. Les courbes granulométriques du gravier et du sable sont représentées sur la figure 1. La valeur obtenue de l'équivalent sable (ES), égale à 76, montre que le sable est propre. Le ciment utilisé pour le développement du béton est le ciment Portland CEM I 42,5 produit par l'usine Jebel Jeloud selon la norme tunisienne NT 47-01 est caractérisé par une compacité de 0,574 et une densité de 3210 g/cm³.

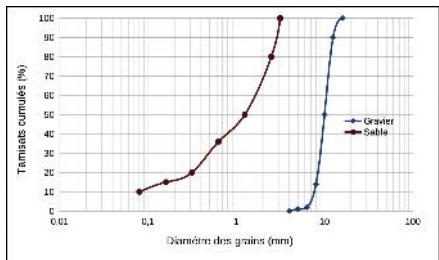


Figure 1 : Courbes granulométriques du gravier et du sable

2.2. Paille

Dans ce travail, la paille utilisée est celle d'avoine commercialisée en bottes, généralement d'une dimension de 35 cm × 45 cm × 115 cm, et de densité apparente 110 kg/m³. Le diamètre individuel de la paille est inférieur à 5 mm.



Figure 2 : Pailles non traitées



Figure 3 : Pailles traitées au bitume

La longueur des pailles à utiliser dans le béton est de 2 cm. Ces morceaux de paille sont obtenus par une coupe manuelle de la paille à la longueur choisie. Cette procédure, bien que lente, assure une longueur constante de paille utilisée dans tous les échantillons. Les études menées dans [16] ont montré que le traitement de la paille par l'eau chaude donne les performances mécaniques les plus intéressantes, il est donc choisi comme l'un des deux traitements considérés dans ce travail. Le bitume n'a pas été étudié jusqu'à présent comme traitement de la paille, c'est pourquoi il a été choisi comme deuxième traitement (figure 3). Le traitement à l'eau chaude consiste en une immersion complète des pailles dans une eau chauffée à 60 °C pendant 10 s avant son utilisation dans le béton. Le traitement du bitume est effectué manuellement par une immersion complète des pailles d'avoine dans un bitume Cutback 400-600, puis la paille est mélangée lentement jusqu'à ce que sa surface extérieure soit complètement recouverte par le produit. Ensuite, les pailles traitées sont retirées à l'air libre pour procéder au séchage. En plus des deux traitements envisagés pour améliorer les propriétés des pailles, la paille à l'état naturel (figure 2) est également considérée.

2.3. Elaboration du composite

La composition des différents bétons est indiquée dans le tableau 1. Le B₀ est un béton ordinaire, considéré comme une référence qui ne contient pas de paille. Le B_p est un béton avec de la paille sans traitement. Similairement à [16], la quantité de paille considérée est de 15 kg pour 1m³ de béton. Dans tous les mélanges, l'introduction des pailles se fait par substitution avec le même volume d'agrégats de sable et de gravier, en conservant le rapport volumétrique sable/gravier. Pour assurer une bonne homogénéité du mélange, le malaxage a été réalisé à basse vitesse dans toutes les étapes. La méthode suivante, inspirée de [15], est utilisée : Tout d'abord, un mélange sec de ciment, de sable et de gravier est réalisé jusqu'à l'obtention d'un mélange parfait et homogène. Ensuite, des pailles sont introduites dans le mélange sec et le malaxage est poursuivi pendant au moins trois minutes. Enfin, et sans arrêter le processus, l'eau est progressivement ajoutée au mélange. Après le mélange, le matériau est introduit dans des moules de 7 × 7 × 28 cm pour les essais de flexion et 16 × 32 cm pour les essais de compression. Le démoulage est fait après 24 h.

Tableau 1 : Formulation par m³ du béton

	Gravier (kg)	Sable (kg)	Ciment (kg)	Eau (l)	Paille (kg)
Béton ordinaire (B_0)	1232	680,5	350	175	-
Paille sans traitement (B_p)	1080,4	596,9	350	175	15
Paille traité à l'eau chaude (B_{pw})	1112,4	614,5	350	175	15
Paille traité au bitume (B_{pb})	1176,2	627,8	350	175	15

2.4. Résultats et discussions

Afin d'étudier les différentes propriétés du béton élaboré, un programme expérimental a été mené. Pour chaque propriété, trois mesures ont été effectuées et la valeur moyenne et l'écart type ont été calculées.

2.4.1. Affaissement et masse volumique

Conformément à la norme EN 12350-2, L'essai d'affaissement est réalisé au cône d' Abrams. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2 qui montre aussi les masses volumiques apparentes des bétons frais et durs. Comme toutes les valeurs d'essai d'affaissement varient entre 10 et 12 cm, on peut considérer que le béton utilisé appartient à la classe de consistance S3. A partir du même tableau, on voit également que la densité du béton avec de la paille traitée avec de l'eau est plus élevée que celle du béton avec de la paille non traitée ou traitée avec du bitume. Ceci peut s'expliquer par le fait que les pailles traitées à l'eau sont plus lourdes que les pailles des deux autres

formulations. D'autre part, le bitume agit comme un revêtement autour de la paille, empêchant ainsi l'absorption d'eau et de ciment à l'intérieur de la paille, d'où une densité plus faible du béton avec de la paille traitée au bitume.

Par rapport au béton de sable [15], on note que l'utilisation de 15 kg/m³ de paille dans le mélange donne, de même, une réduction de 6 à 7% de la densité par rapport au mélange sans la paille.

2.4.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression reste toujours l'une des caractéristiques les plus importantes du béton. Pour le déterminer, des essais de compression ont été réalisés sur les différentes formulations de béton. La figure 4 montre la résistance à la compression du béton à 28 jours, la valeur moyenne de la résistance à la compression du béton sans ajout de pailles est de 39 MPa. L'ajout des pailles diminue, comme prévu, la valeur de résistance à la compression. Une valeur moyenne de 24 MPa est obtenue avec de la paille non traitée.

Tableau 2 : Affaissement et masse volumique de différents bétons (valeurs moyennes et écart type (σ))

Désignation	B_0		B_p		B_{pw}		B_{pb}	
	Moyenne	σ	Moyenne	σ	Moyenne	σ	Moyenne	σ
Affaissement (cm)	11,07	0,153	11,43	0,153	11,67	0,153	11,83	0,058
Densité (g/cm ³)	Frais	2,49	0,016	2,34	0,023	2,39	0,01	2,3
	Dure	2,46	0,024	2,31	0,013	2,35	0,011	2,28

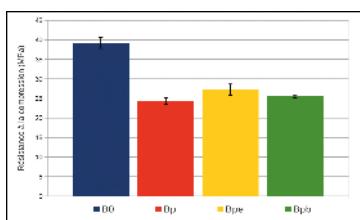


Figure 4 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours

Le traitement des pailles a amélioré la valeur moyenne, mais le résultat reste statistiquement très proche. Dans le cas du béton de sable [15], l'addition de 15 kg/m³ de paille non traitée entraîne une chute de la résistance à la compression à 28 jours de 40%, la valeur de résistance devient 13 MPa. Avec le béton conventionnel utilisé dans ce travail, on note une chute similaire (de 38%) de la résistance à la compression.

Après l'essai de compression, l'échantillon avec pailles conserve sa forme après atteinte de la contrainte maximale malgré l'apparition de fissuration dans l'échantillon (figure 6).

2.4.3. Résistance à la flexion

Les mesures de la résistance à la flexion sont effectuées sur des prismes 70×70×280 mm³. Les résultats illustrés sur la figure 5 montrent que l'addition de paille provoque une diminution de la valeur moyenne de la résistance à la flexion. Si pour du béton de sable avec 15 kg/m³ de paille, la résistance à la flexion est inférieure de 6% à celle de la composition de base [15], elle est inférieure à celle de la composition de base de 40% pour le béton de cette étude. L'utilisation du traitement a limité la diminution à 32% en utilisant de l'eau comme traitement et à 18% en utilisant le bitume. Dans l'essai de flexion, et si une rupture fragile a été observée pour la formulation classique du béton,

aucune rupture fragile n'a été observée pour les formulations de béton avec pailles lorsque la contrainte maximale est atteinte. En effet, une fissure discrète apparaît dans l'échantillon d'essai mais les deux parties de l'échantillon restent connectées l'une à l'autre comme le montre la figure 7. Ceci est dû à la présence de la paille qui maintient cette connexion entre les deux parties du béton comme le montre la figure 8. Cette remarque est également notée dans [1] et [15] avec l'ajout de fibres végétales à une matrice cimentée. En effet, cet ajout confère la capacité de supporter des charges au-delà de leurs limites élastiques.

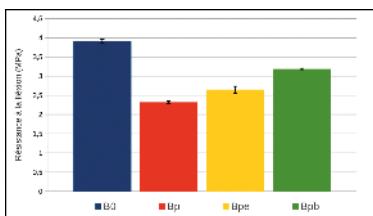


Figure 5 : Evolution de la résistance à la flexion



Figure 6 : Essai de compression



Figure 7 : Essai de flexion



Figure 8 : Fissure dans l'échantillon avec de la paille après rupture

2.4.4. Macrostructure

La macrostructure des bétons est donnée dans la figure 9. Elle représente l'examen des échantillons au niveau de la fissure. La première remarque révélée par la figure est que la paille est bien enduite avec du ciment. L'échantillon avec de la paille traitée avec de l'eau chaude montre une bonne adhérence entre la paille et la matrice, une remarque également trouvée dans [1] ainsi que dans [16]. Le dernier explique ce résultat par le fait que l'eau chaude semble être le meilleur traitement qui dissout facilement le sucre contenu dans les éléments végétaux, ce qui augmente la compatibilité entre les deux matériaux. En outre, il y a également une pénétration de la matrice dans les pailles, ce qui a pour effet de rigidifier la paille et d'augmenter la résistance à la compression du béton. Dans le cas de la paille traitée au bitume, on constate qu'une couche de bitume apparaît encore sur la paille et qu'elle empêche clairement l'eau d'être absorbée par la paille et, par conséquent, cela peut être à l'origine de la limitation de la chute des caractéristiques mécaniques.

2.4.5. Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique est déterminé à l'aide d'un testeur de vitesse à ultrasons (testeur UVP) selon la norme BS 4408. Le tableau 3 présente les résultats du module d'élasticité moyen déterminés sur quatre échantillons pour chaque mélange. Les résultats montrent que l'ajout de la paille au béton diminue le module d'élasticité de 17%. Le traitement de la paille améliore la valeur de ce module. La diminution du module moyen devient 13% pour la paille traitée à l'eau et 16% pour la fibre traitée au bitume, mais statistiquement, l'effet du traitement peut être considéré comme négligeable.

Tableau 3 : Module d'élasticité dynamique

Formulation	B_0	B_p	B_{pw}	B_{pb}
E_D (MN/m ²)	33758,5	27870,8	29479,7	28508

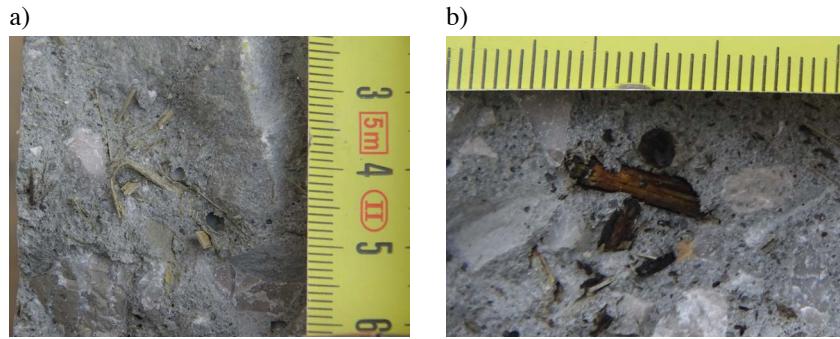


Figure 9 : Aspect du béton pour différentes formulations (a- paille sans traitement, b- paille traité avec du bitume)

3. CONCLUSIONS

La paille est un matériau écologique qui pourrait être introduit dans le béton pour obtenir un matériau léger et isolant. De plus, le recyclage des pailles conduit à l'obtention d'un matériau peu coûteux, et à la réduction de la pollution.

Ce travail met en évidence les propriétés mécaniques d'un béton conventionnel obtenu avec l'utilisation de paille. Avec l'utilisation de 15 kg/m³ de paille dans le mélange, on peut noter une certaine similitude avec le comportement du béton de sable comme la réduction de 6 à 7% de la masse volumique par rapport au mélange sans paille, et la baisse de la résistance à la compression de 38%. Mais certaines différences sont également notées, comme la diminution de la valeur de la résistance à la flexion de 40% en utilisant la paille non traitée. L'utilisation du traitement au bitume permet de limiter la diminution de cette baisse à 18%.

RÉFÉRENCES

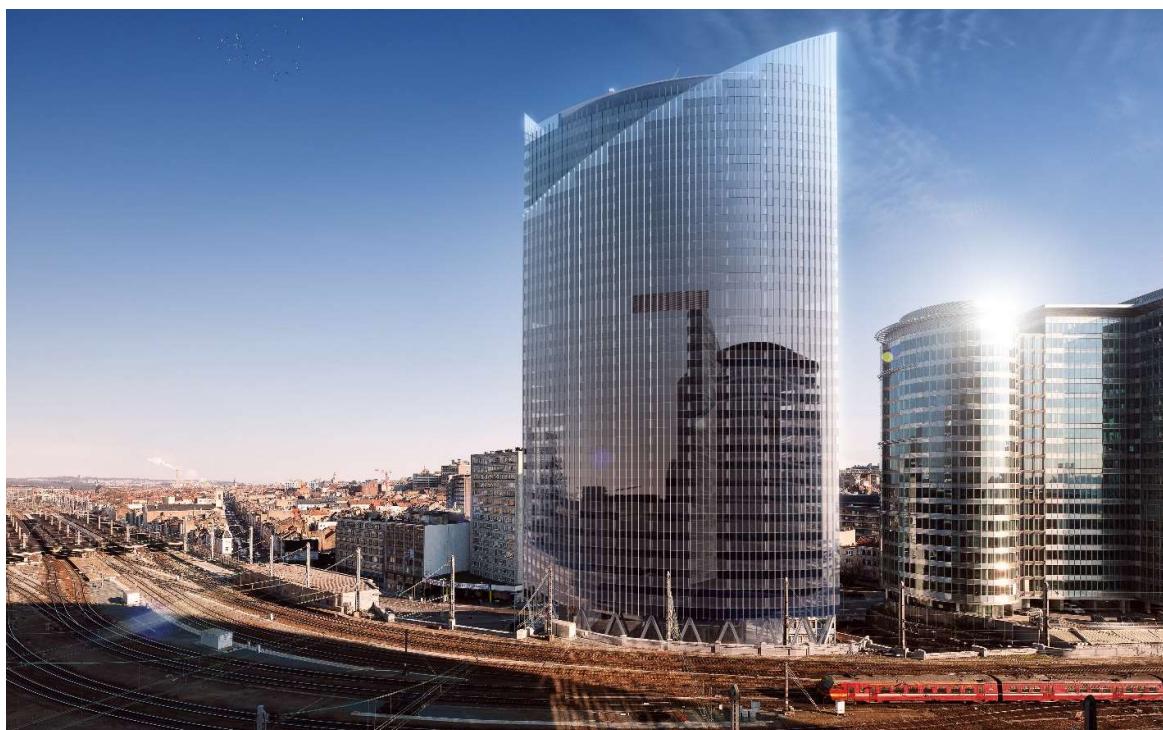
- [1] Bederina, M., Belhadj, B., Ammari, M.S., Gouilleux, A., Makhlofi, Z., Montrelay, N. and Queneudec, M. (2016), "Improvement of the properties of a sand concrete containing barley straws-treatment of the barley straws", *Constr. Build. Mater.*, 115, 464-477.
- [2] Bederina, M., Gotteicha, M., Belhadj, B., Dheilly, R., Khenfer, M. and Queneudec, M. (2012), "Drying shrinkage studies of wood sand concrete-effect of different wood treatments", *Constr. Build. Mater.*, 36, 1066-1075.
- [3] Bederina, M., Laidoudi, B., Goullieux, A., Khenfer, M., Bali, A. and Queneudec, M. (2009), "Effect of the treatment of woods having son the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes", *Constr. Build. Mater.*, 23(3), 1311-1315.
- [4] Belhadj, B., Bederina, M., Makhlofi, Z., Dheilly, R., Montrelay, N. and Queneudec, M. (2016), "Contribution to the development of a sand concrete lightened by the addition of barley straws", *Constr. Build. Mater.*, 113, 513-522.
- [5] Benmansour, N., Agoudjil, B., Gherabli, A., Kareche, A. and Boudenne, A. (2014), "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building", *Energy Build.*, 81, 98-104.
- [6] Cantor, D.M. and Manea, D.L. (2015), "Using wheat straw in construction", *ProEnvironment Promediu*, 8, 17-23.
- [7] Helepciu, C.M. (2016), "Utilization possibilities of some cereal plant wastes in the constructions domain, in the context of available crops in romania-a review", *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, 62(4), 121.
- [8] Khazma, M., Goullieux, A., Dheilly, R.M., Rougier, A. and Queneudec, M. (2014), "Optimization of flax shive-cementitious composites: Impact of different aggregate treatments using linseed oil", *Indust. Crop. Product.*, 61, 442-452.
- [9] Mansour, A., Srebric, J. and Burley, B. (2007), "Development of straw-cement composite sustainable building material for low-cost housing in egypt", *J. Appl. Sci. Res.*, 3(11), 1571-1580.
- [10] Milutiene, E., Jurmann, K. and Keller, L. (2007), "Straw bale building reaching energy efficiency and sustainability in northern latitudes", Proceedings of the 11th International Conference on Solar Energy at High Latitudes North Sun, 38-39.
- [11] Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S. (2011), "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review", *Constr. Build. Mater.*, 25(2), 575-581.
- [12] Rokbi, M., Rahmouni, Z.E.A. and Baali, B. (2017), "Performance of polymer concrete incorporating waste marble and alfa fibers", *Adv. Concrete Constr.*, 5(4), 331-343.
- [13] Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A. and Chotard, T. (2008), "Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction", *J. Euro. Ceramic Soc.*, 28(1), 183-192.
- [14] Sellami, A., Merzoud, M. and Amziane, S. (2013), "Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetal fibers", *Constr. Build. Mater.*, 47, 1117-1124.
- [15] Trabelsi, A., Kamoun, Z. and Beddey, A. (2017), "Seismic retrofitting of a tower with shear wall in UHPC based dune sand", *Earthq. Struct.*, 12(6), 591-601.
- [16] Whitman, C.J. and Holloway, D.F. (2010), "Improving energy efficiency and thermal comfort of rural housing in chile using straw bale construction", Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Universita Politecnica della Marche, Ancona, Italy.

Call for Papers

Belgian, French and Dutch National Groups of IABSE

Young Engineers Colloquium 2020 - YEC2020

13 and 14 March 2020 at Factory Forty, Brussels, Belgium



Silver Tower, Brussels, Belgium

Young Engineers Colloquium

The Belgian, French and Dutch National Groups of IABSE have the pleasure of inviting you to attend the jointly organized Young Engineers Colloquium 2020 (YEC2020) on 13 and 14 March 2020 at Factory Forty in Brussels in Belgium. YEC2020 is especially meant for young engineers to exchange knowledge internationally, with the focus on Belgium, the Netherlands and France. The colloquium is open to all professionals interested in structural engineering regardless their age, but apart from the keynote speaker, all presenters are young engineers under 35 years of age. This colloquium offers young engineers the opportunity to present their interesting research, engineering or construction projects to an audience of fellow engineers from the structural engineering sector. It provides attendees with an overview of current research topics as well as challenging engineering and construction projects and is an excellent platform to share experiences among experienced and young engineers.

We are looking forward to receiving interesting project descriptions from young engineers under 35 years of age (born 1984 or later). Please submit a two-page paper in English by **14 February 2020** to YEC2020@iabse.be. A two-page paper can present student projects, PhD research as well as engineering and construction projects. In the spirit of IABSE, contributions on buildings, bridges and any other civil engineering structure and in any material are welcome. In due time, you are asked to prepare either a 10 minutes presentation or a poster on A1 format. All presentations are in **English**.

About IABSE

IABSE stands for International Association for Bridge and Structural Engineering and is the international professional and scientific association active in the field of structural engineering. IABSE offers a platform for structural engineers to exchange information and to learn from each other at the international level.

IABSE covers all aspects of structural engineering in all materials.

The structures comprise besides bridges also buildings and all kinds of civil engineering structures. For more information see www.iabse.org. The Belgian, French and Dutch National Groups of IABSE are sister associations of the main IABSE organization which is based in Zurich, Switzerland.



About the Belgian, French and Dutch National Groups of IABSE

The Belgian, Dutch and French National Groups of IABSE have a strong tradition in organizing and co-organizing international events. The French National Group and the French Association of Civil Engineering recently organized the 40th annual IABSE International Symposium in Nantes in 2018 on the theme "Tomorrow's Megastructures". The Belgian and Dutch National Groups are now in the process of organizing the 43rd Congress of IABSE in Ghent, Belgium from 20 to 24 September 2021. These National Groups encourage young engineers to present their interesting research, engineering or construction projects to such an international audience of fellow engineers all over the world from the structural engineering sector. YEC2020 is a logical in-between step towards these main IABSE congresses.

Schedule YEC2020

Opening Ceremony at 10am on 13 March 2020

Welcome from the Belgian National Group of IABSE – Alain Dumortier

Welcome from the French National Group of IABSE – Bruno Godart

Welcome from the Dutch National Group of IABSE – Bert Hesselink

Keynote Presentation – Laurent Ney, Ney & Partners (winner 13th Gold Gustave Magnel medal)

Selected Presentations – Part 1

Poster Pitch Presentations

Lunch

Selected Presentations – Part 2

Short Presentation on IABSE

Closing Ceremony at 5pm

Colloquium Dinner at 6pm, (location to confirm), Brussels

Technical Excursion: Silver Tower, 9:30am – 3:30pm on 14 March 2020

Registration

Please register for YEC2020 by registration via the link <https://eventmanager.ugent.be/YEC>

Your name, address and affiliation and your presence to the colloquium dinner and/or the technical excursion will be asked.

- Registration fee for young engineers under 35 years of age (born 1985 or later) including colloquium, dinner and excursion: € 75,- (also including lunch, coffee/tea breaks and colloquium proceedings).
- Registration fee for other professionals interested in structural engineering including colloquium, dinner and excursion: € 150,- (also including lunch, coffee/tea breaks and colloquium proceedings).
- Registration fee for students for colloquium only: € 25,- (also including lunch and coffee/tea breaks).

Venue

Factory Forty, rue des anciens étangs, 40, 1190 Brussels, Belgium
Room: Conference Hall
Directions can be found on the website: <https://www.factoryforty.be/>



Awards

The best two oral and two poster pitch presentations will be awarded with € 500,-. The jury consists of representatives from Belgian, French and Dutch universities and industry.

Technical Excursion

The Technical Excursion takes place on Saturday 14 March 2020 visiting the Silver Tower in Brussels, Belgium under the guidance of technical specialists.

Organizing and Scientific Committee

Prof. dr. ir. H. (Hans) De Backer, Ghent University, Ghent, Belgium
Prof. ir. B. (Bart) De Pauw, Tucrail, Brussels, Belgium and Ghent University, Ghent, Belgium
Ir. A. (Alain) Dumortier, Bureau Greisch, Liege, Belgium
Ir. P. (Pierre) Mengeot, Besix, Brussels, Belgium
Ing. B. (Bruno) Godart, Gustave Eiffel University, IFSTTAR, Champs/Marne, France
Prof. E. (Emmanuel) Ferrier, Lyon 1 University, LMC2, Villeurbanne, France
Ing. D. (Daniel) BITAR, CTICM, Saint-Aubin, France
Ing. X (Xavier) Cespedes, Bureau d'études STRAINS, Paris, France
Prof. ir. H.H. (Bert) Snijder, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands
Ing. B.H. (Bert) Hesselink, Movares, Utrecht, The Netherlands
Dr. ir. A. (Ane) de Boer, formerly at Rijkswaterstaat, Utrecht, The Netherlands
Ir. S. (Sander) van Alphen, Movares, Utrecht, The Netherlands
Ir. S. (Stijn) Joosten, Arup, Amsterdam, The Netherlands and YOUNCON

Message from the President of IABSE Prof. Yaojun Ge

Young engineers will be the builders of our world in the coming generations when they will have to face the environmental changes effects, they will have to learn how to use new materials and they will need to solve the problems thinking, more and more, in terms of global interconnections. All this means a status of permanent innovation to face the future, building a better world.

With these ideas, IABSE strongly supports the organization of the Young Engineers Colloquium as a forum of discussion of innovative ideas that will lead the engineering profession in the next years, ideas that are invited to be brought inside IABSE, as technical groups, keeping IABSE a leading organization in structural engineering.



Message from the Chair of the Belgian National Group of IABSE, Alain Dumortier

In 2019, The Dutch and Belgian National Groups of IABSE co-organized the Young Engineers Colloquium 2019 in Eindhoven.

By this the idea of providing a platform for exchanging ideas, networking and common fun for young engineers continues on an international level. This is another example following the well-known spirit of IABSE. It is a pleasure to share this experience with our southern neighbors and now co-organize the Young Engineers Colloquium 2020 in Brussels. Looking forward to welcome many engineers – young of age or young-at-heart – from academia and practice for an exciting two-day event in Brussels!



Message from the Chair of the French National Group of IABSE, Bruno Godart

After having organized the 40th international IABSE annual Symposium in Nantes in 2018 on the theme “Tomorrow’s Megastructures”, the French National Group of IABSE and the French Association of Civil Engineering have the great pleasure to co-organize the Young Engineers Colloquium 2020 in Brussels, with our colleagues of the Belgian and Dutch National Groups of IABSE. It is with our young colleagues that the performance of our built environment has to be discussed, as they will be the builders of the future, achieving “higher, longer and stronger” solutions in a sustainable way, and meeting the challenges of tomorrow, especially facing the climate change. I am impatiently looking forward to welcome young and less young (!) engineers from academia and practice for an exciting two-day event in the Capital of Europe.



Message from the Chair of the Dutch National Group of IABSE, Bert Hesselink

On 13 and 14 March 2020 the Belgian and the Dutch National Group of IABSE will be the joint hosts of a colloquium aimed at young engineers. The Dutch National Group is proud to be part of this initiative.

YEC2020 builds on the long history of trade and collaboration between France, Belgium and the Netherlands and on the strong common engineering tradition. Offering a unique opportunity for young professionals to meet and exchange ideas across borders, the initiative truly reflects the international spirit of IABSE.

Students, young engineers and experienced professionals, who act as mentors and beacons of our profession, are warmly welcomed to participate actively in an inspiring day which will serve as an introduction to the vibrant community of IABSE and its activities.



IABSE Young Engineers Program

The IABSE Young Engineers Program (YEP) offers young engineers a platform inside IABSE to build up and enlarge their professional network as well as share experiences with other young engineers or experienced civil engineers. The Young Engineers Program is open to all engineers under 35 years of age.

Contact

Belgian National Group of IABSE

Prof. ir. B. (Bart) De Pauw

Ghent University, Ghent, Belgium

+32 474 564677

YEC2020@iabse.be

<http://www.iabse.be/>

French National Group of IABSE / French Association of Civil Engineering

Ing. Bruno Godart

Université Gustave Eiffel (IFSTTAR), Champs/Marne, France

+ 33 1 81 66 83 32

bruno.godart@ifsttar.fr

www.afgc.asso.fr



Dutch National Group of IABSE

Ing. B.H. (Bert) Hesselink

c/o Movares, Utrecht, The Netherlands

+31 06 5109 3972

bert.hesselink@movares.nl

<https://www.bouwenmetstaal.nl/iabse/>

Call for sponsors

Companies can contribute to the success of YEC2020 in three ways:

1. sending one or more of your young structural engineers (or other professionals) to YEC2020;
2. sponsoring YEC2020 by an amount of **€ 500,-** per company (engineering offices, contractors, software producers, governmental organizations);
3. a combination of the above two ways (which is of course the preferred way by the organizers).



As a sponsor you have the following advantages:

- you will be mentioned with your company logo as sponsor in the final program and in the final proceedings (please take note that the proceedings will be part of the IABSE publications https://www.iabse.org/IABSE/publications/Shop/IABSE_Reports.aspx)
- you will be mentioned with your company logo as sponsor on the websites of the Belgian, French and Dutch National Groups of IABSE
- you will be mentioned with your company logo as sponsor during the colloquium in the breaks on screen and in the program of YEC2020
- you are allowed to circulate flyers during the colloquium;
- you will be mentioned with logo as a sponsor in the colloquium proceedings.

You can apply as a sponsor by sending an email to YEC2020@iabse.be. You will be contacted subsequently and you will get a confirmation with an invoice.

Sponsoring of YEC2020 by companies is highly appreciated!

Inscriptions

Informations pratiques

Frais d'inscription

Les frais d'inscription pour le forum biodéterioration s'élèvent à :

- 120 € HT pour les étudiants,
- 220 € HT pour les membres du Cefracor,
- 270 € HT pour les non membres du Cefracor.

Ces tarifs comprennent l'admission aux sessions, les actes, les pauses café, le repas du mercredi midi et le repas de gala.

Modalités d'inscription

Inscription sur le site forumbiobiot.corrodys.com à partir de mi-février.

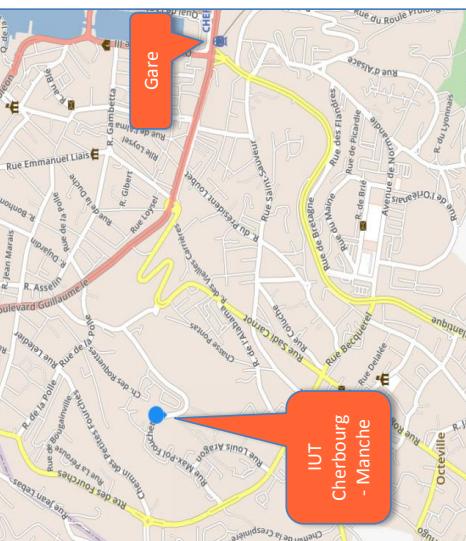
A partir de mi-février, plus d'informations seront disponibles sur le site forumbiobiot.corrodys.com

Sponsor : **NAVAL**
Partenaires :



XVI ème Forum Biodéterioration des Matériaux

Accès IUT Cherbourg-Manche



Adresse IUT Cherbourg – Manche : 60 Rue Max Pol Fouchet, 50130 Cherbourg-en-Cotentin
Tél : 02 33 01 42 00

Accès possible en bus de ville (Ligne 1, station Jaurès direction les Fourches, arrêt IUT)

Hôtels (liste non exhaustive)

Le Cercle : 13 Place de la république 50100 Cherbourg-en-Cotentin, Tél. : 02 33 01 44 60

Le Chantereine : Rue de la Brigantine - Port Chantereine, 50100 Cherbourg-Octeville, Tél. : 02 33 93 02 20

Le Mercure : 13 Quai de l' Entrepot, 50100 Cherbourg-en-Cotentin, Tél. : 02 33 44 01 11

Hôtel de la Croix de Malte : 5 Rue des Halles, 50100 Cherbourg-en-Cotentin, Tél. : 02 33 43 19 16



IUT Cherbourg-Manche

Cherbourg en Cotentin
Les 18 & 19 juin 2020

Organisé par



Présentation	Programme	Appel à communication
--------------	-----------	-----------------------

La Commission Biodéterioration des Matériaux et Corrodys organisent le XVème forum Biodéterioration des matériaux les **18 et 19 juin 2020** à Cherbourg-en-Cotentin. Ce forum, destiné plus particulièrement aux jeunes chercheurs, est un lieu d'échanges ouvert à tous les acteurs académiques et industriels préoccupés par les problématiques d'interactions entre microorganismes et matériaux.

Thèmes abordés

- Biodéterioration/Biocorrosion des matériaux (mécanismes, durabilité des matériaux, méthodes d'essais...),
- Prolifération des microorganismes et impacts délétères sur les performances des matériaux et structures (prolifération sur matériaux et impact sur la santé des occupants, sur la sécurité, l'esthétique des ouvrages...),
- Effets positifs des microorganismes (bio-déposition, bio-cicatrisation...). Amélioration de la bio-réceptivité des matériaux pour diverses applications (murs végétaux, récifs,...).

Prix Jeunes Chercheurs

Trois prix seront décernés dans le cadre du concours jeunes chercheurs.

Jeudi 18 juin 2020

- 13h30 : Accueil
- 14h-18h : Forum
- 18h-19h : Réunion Commission Biodéterioration
- 20h : Dîner de Gala

Vendredi 19 juin 2020

- 9h00-12h30 : Forum
- 12h30-13h45 : Déjeuner
- 13h45 : Remise des prix et clôture du forum
- 14h : Visite des laboratoires de Corrodys

Conférenciers invités

Anne-Marie GROLLEAU : Expert Senior corrosion marine et protection cathodique. Responsable du laboratoire de corrosion marine Naval Research/CESMAN/CM : « Influence du biofilm sur la corrosion localisée des alliages passivables pour circuits eau de mer ».

Damien FERON : Directeur de recherche CEA, Président de la WCO (World Corrosion Organisation) : « Corrosion bactérienne et prévision à long terme de la corrosion ».

Contact

Hervé GUEUNE : hgueune@corrodys.com
Françoise FEUGEAS : francoise.feugeas@insa-strasbourg.fr

Résumés

Les résumés d'une page doivent être envoyés à Hervé GUEUNE (hgueune@corrodys.com) avant le 30 avril 2020. Le modèle sera fourni sur le site internet.

Format des communications

Jeunes Chercheurs :
Présentation orale de 5-10 min d'introduction à un poster.
Les sessions poster permettront d'échanger autour de ces travaux.

Chercheurs académiques et industriels :
Présentation de 5-10 min de leur problématique possible.
Les sessions poster permettront d'échanger autour de ces travaux.

Articles

Le forum fera l'objet d'un numéro spécial de la revue Matériaux et Techniques (EDP sciences, indexée sur Scopus). Des articles issus des présentations faites lors du forum pourront être soumis à la revue et seront examinés par un binôme d'experts.



The Institute of Materials,
Minerals and Mining



The Institute of
Concrete Technology



National organising committee

The Cementitious Materials Group of IoM3

Yun Bai
Richard Ball
Stephanie Barnett
Susan Bernal
Leon Black
Steve Brooks
Robert Cather
Chris Cheeseman
Andrew Dunster

Chris Goodier
Colum McCague
Gary Perkins
Giovanni Pesce
John Provis
Julia Stegemann



International scientific committee

Maria Antonietta Aiello
University of Salento, Italy

Sofiane Amziane
Université Clermont Auvergne, France

Ueli Angst
ETH Zurich, Switzerland

Hassan Baaj
University of Waterloo, Canada

Arnaud Castel
University of Technology Sydney, Australia

Nele de Belie
University of Ghent, Belgium

Marco Di Prisco
Politecnico di Milano, Italy

Bruno Huet
LafargeHolcim, France

Said Kenai
University of Blida 1, Algeria

Eddie Koenders
TU Darmstadt, Germany

Kefei Li
Tsinghua University, China

Jiaping Liu
Southeast University, China

Barbara Lubelli
TU Delft, Netherlands

Viktor Mechtcherine
TU Dresden, Germany

Lily Poulikakos
EMPA, Switzerland

Javier Sánchez
IETcc (CSIC), Spain

Karen Scrivener
EPFL, Switzerland

Mohammed Sonebi
Queen's University Belfast, UK

Gabriele Tebaldi
University of Parma, Italy



KEY DATES

Abstract submission: 31 January 2020
(email to RILEM2020@sheffield.ac.uk)

Notification of acceptance: 31 March 2020

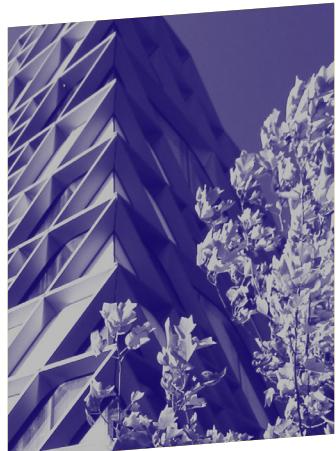
Finalisation of extended abstract: 31 May 2020

Conference opening: 31 August 2020

KEY CONFERENCE TOPICS INCLUDE:

- Chemistry, materials science, and engineering characteristics of cements and concretes
- Performance of materials and structures in traditional and innovative applications
- Testing and characterisation of construction and infrastructure materials
- Environmental and sustainability assessment of construction materials, systems, and structures

We invite presentations across the full scope of RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*, www.rilem.net) and its technical committees.



RILEM WEEK

RILEM Week is the annual meeting of the standing committees of RILEM. Such meetings occur every year in conjunction with a major international conference. The recent RILEM weeks were held in Nanjing (2019), Delft (2018), Chennai (2017), Copenhagen (2016), Melbourne (2015), and São Paulo (2014).

The conference will also include a commemoration of 100 years of cement and concrete science at the University of Sheffield, since the appointment of Professor Cecil H. Desch in 1919.





The Institute of Materials,
Minerals and Mining



The Institute of
Concrete Technology



recommandations aux auteurs

CONTEXTE GÉNÉRAL

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

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

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

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

PRÉSENTATION DU MANUSCRIT

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

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

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

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

Il est nécessaire de préciser :

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

FONCTIONNEMENT DE LA RELECTURE

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

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

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

Éditions ESKA, 12, rue du Quatre Septembre, 75002 Paris – agpaedit@eska.fr

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

VIENT DE PARAITRE

CORONAVIRUS

COVID-19

101 fiches pratiques pour connaître la maladie et s'en prémunir

Sous la coordination du Professeur Bruno Pozzetto

Cet ouvrage, en langue française, prend en compte l'ampleur de l'épidémie et les efforts gigantesques qui sont nécessaires pour la traiter. **Les 101 Fiches pratiques** permettent de comprendre la maladie CORONAVIRUS COVID-19 et de répondre, en un seul volume, à l'essentiel des questions que se posent les particuliers, les médias, les pouvoirs publics et aussi l'ensemble des décideurs. **Les soignants et les citoyens sont les grands acteurs de la prise en charge.** La présente édition française a été coordonnée par le Professeur Bruno Pozzetto.

MD, PhD, Virologiste / Professeur de Microbiologie à la Faculté de Médecine de l'Université Jean Monnet et du CHU de Saint-Étienne / Université de Lyon. Responsable du Service des Agents infectieux et d'Hygiène du CHU de Saint-Étienne. Expert du Haut Conseil de la Santé Publique. Rédigé par un groupe d'experts internationaux, ce livre constitue un guide à la fois précieux et unique. Unaniment reconnu dans le monde, il a déjà été traduit dans plusieurs langues.



Guide pratique à l'usage des particuliers et des établissements

Sous la coordination du Professeur Bruno Pozzetto

CORONAVIRUS

COVID-19

101 fiches pratiques pour connaître la maladie et s'en prémunir

Prévention
Contrôle
Prise en charge
de l'infection
au Virus SARS-CoV-2



Les bénéfices
de l'ouvrage
seront reversés
aux personnels
soignants des
hôpitaux

7,49 €
TTC

ISBN
9782288406369
128 pages
Format : 15x21 cm

MA
éditions

une marque
des éditions
ESKA

