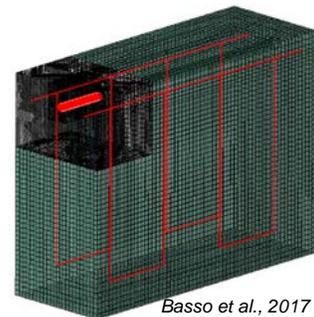
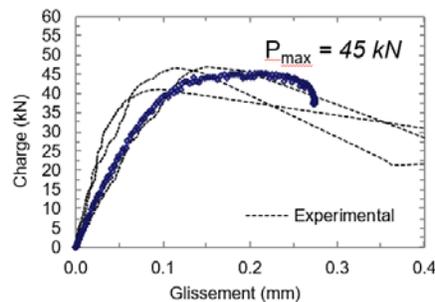


Actes de la 18^e édition des Journées Scientifiques

(RF)²B Regroupement Francophone
pour la Recherche et la
Formation sur le Béton

« Les nouveaux matériaux et les méthodes innovantes utilisés dans un
contexte de développement durable »



6 et 7 Juillet 2017

Université Laval
CRIB Québec



TABLE DES MATIÈRES

Programme des Journées pp. iv

Liste des affiches pp. viii

Articles

*UTILISATION DU BÉTON RECYCLÉ DANS LA FORMULATION DES
BÉTONS AUTO-COMPACTANTS* pp.1-11

Md El K. Bouarroudj^{A,B}, C. Colman^{A,B}, E. Robinet^A, Z. Zhao^A, F. Michel^A, L. Courard^A, S. Remond^B, D. Bulteel^B

A : Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental Engineering, – Université de Liège Belgique

B : IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et Géo Environnement, Département Génie Civil & Environnemental, F-59000 Lille, France

*STRATEGIE MULTI-ECHELLE DE MODELISATION NUMERIQUE DE LA
FISSURATION DES STRUCTURES EN BETON ARME DE GRANDES
DIMENSIONS* pp. 12-22

C. Nader^A, P. Rossi^A, J-L. Tailhan^A

A : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Université Paris-Est

*VALORISATION DE LAITIERS D'ACIÉRIE DANS DES BLOCS DE
BÉTONS D'ENROCHEMENT* pp. 23-33

C. Perlot^A, H. Carré^A

A : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie électrique, ISA BTP - Université de Pau et des Pays de l'Adour, Anglet, France

*PRÉ-MÉLANGES DE SABLES NATURELS AVEC DE FAIBLES
PROPORTIONS DE SABLES DE BÉTONS RECYCLÉS : PROPRIÉTÉS
ET DOSAGES* pp. 34-42

R. Trauchessec^A, E. Ghorbel^B, A. Lecomte^A, O. Safiuallah^B, Z. Ben Aouda^A, G. Wardeh^B

A : Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

B : Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France



*ÉTUDE DE L'AUTOCICATRISATION DE MORTIERS CONTENANT DES
ADDITIONS REACTIVES* pp. 43-58

S. Fattahi^A, R. Gagné^A

A : Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Université
de Sherbrooke, Québec, Canada

*FLUAGE DU BÉTON ET DU BÉTON PRÉCONTRAINTE SOUS
CONDITIONS THERMO-HYGRO-MÉCANIQUES VARIABLES* pp. 59-69

H. Cagnon^A, V.N. Nguyen^B, T. Vidal^A, J.M. Torrenti^B, A. Sellier^A

A : Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et
Durabilité des Constructions); 135, avenue de Ranguel; F-31 077
Toulouse Cedex 04, France.

B : Institut français des sciences et technologies des transports, de
l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), 14-20 Boulevard Newton -
Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France.

*RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DANS LA RECHERCHE ET LES
SPÉCIFICATIONS SUR LES GRANULATS À BÉTON INCORPORANT
DES SULFURES DE FER* pp. 70-80

B. Fournier^A, J. Duchesne^A, A. Rodrigues^B

A : Département de géologie et de génie géologique, Université Laval,
Québec, Canada

B : GHD Consultants Ltée, Québec, Canada

*EFFET DE LA PRÉSENCE DE VIDES SUR LA QUALITÉ DE
L'ADHÉRENCE D'UNE BARRE D'ARMATURE* pp. 81-89

P. Basso Trujillo^A, M. Jolin^A, B. Massicotte^B, B. Bissonnette^A

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Université Laval,
Québec, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Polytechnique
de Montréal, Québec, Canada

*AMELIORER L'EVALUATION DES STRUCTURES ENDOMMAGÉES PAR
DES REACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE A L'AIDE DE
MODELISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES* pp. 90-98

S. Multon^A, A. Sellier^A

A : Université de Toulouse, Laboratoire Matériaux et Durabilité des
Constructions, INSA - Université Paul Sabatier, Toulouse, France

*INFLUENCE DU TYPE DE FIBRES ET DE LEUR ORIENTATION SUR LA
FISSURATION ET LA PERMÉABILITÉ DU BÉTON ARMÉ SOLlicitÉ EN
TRACTION* pp. 99-117

T. Plagué^A, C. Desmettre^A, J.-P. Charron^A

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



UNIVERSITÉ
LAVAL



Centre de recherche sur les
infrastructures en béton (CRIB)

PASSERELLE PIETONNE ISABEY-DARNLEY – UTILISATION DE
DALLES PREFABRIQUEES EN BFUP

pp. 118-143

É. Cantin-Bellemare^A, J.-P. Charron^B

A : Ville de Montréal, QC, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



PROGRAMME DU 6 JUILLET 2017

8h30 Accueil des participants

9h00 Mot de bienvenue et présentation du (RF)²B par Gilles Escadeillas

9h15 **Conférencier invité** : Jacques Marchand, SIMCO Technologies
Titre : L'ingénierie de la durabilité - Concevoir des structures qui
atteindront une durée de vie de 100 ans et plus

10h15 **Étude du comportement résiduel de structures atteintes par la RAG**
Farid Benboudjema (1), Georges Nahas (1, 2), Ejona Kishta (1)
(1) LMT (ENS Cachan, CNRS, Université Paris Saclay), France
(2) Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France

10h45 : Pause-café – (affiches)

11h15 **Mécanismes d'hydratation des liants à base de ciments alumineux
en système dilué - confrontation mesures expérimentales et
modélisation numérique**
Nicolas Maach (1), Jean-François Georgin (1), Judith Pommay (2)
(1) LGCIE – INSA de Lyon, France
(2) Kerneos, France

11h45 **Passerelle piétonne Isabey-Darnley – Utilisation de dalles
préfabriquées en BFUP**
Étienne Cantin-Bellemare (1), Jean-Philippe Charron (2)
(1) Ville de Montréal
(2) École Polytechnique de Montréal

12h15 Repas

13h45 **Utilisation de bétons recyclés dans la formulation de bétons
autocompactants**
Mohamed El Karim Bouarroudj (1,2), Charlotte Colman (1,2), Eva
Robinet (1), Zengfeng Zhao (1), Frédéric Michel (1) Luc Courard (1),
Sébastien Remond (2), David Bulteel (2)
(1) Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental
Engineering, – Université de Liège, Belgique
(2) IMT Lille Douai, Université de Lille, France

14h15 **Stratégie multi-échelle de modélisation numérique de la fissuration
des structures en béton armé de grandes dimensions**
Christian Nader, Pierre Rossi, Jean-Louis Tailhan
IFSTTAR, France



14h45 **Valorisation de laitiers d'aciérie dans des blocs de bétons d'enrochement**

Céline Perlot, Hélène Carré

Université de Pau et des Pays de l'Adour - laboratoire SIAME, France

15h15 **Mélange de sable naturel avec une faible proportion de sables de bétons recyclés : dosages et propriétés**

Romain Trauchessec (1), Elhem Ghorbel (2), André Lecomte (1), Omary Safiuallah (2), Zakaria Ben-Aouda (1), George Wardeh (2)

(1) Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

(2) Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France

15h45 **Visite des laboratoires de l'Université Laval**

19h00 **Restaurant Le Cosmos** (terrasse), 2813 boulevard Laurier, Québec



PROGRAMME DU 7 JUILLET 2017

8h30 Accueil des participants

9h00 **Conférencier invité** : Luc Bédard, Association béton Québec (ABQ)
Titre : L'avenir de l'industrie du béton et l'intégration du développement durable

10h00 **Influence des additions cimentaires à forte teneur en chaux libre sur l'autocicatrisation naturelle des mortiers**
Salma Fattahi, Richard Gagné
Université de Sherbrooke

10h30 Pause-café (affiches)

11h00 **Fluage du béton et du béton précontraint sous conditions thermo-hygro-mécaniques variables**
Hugo Cagnon (1), V.N. Nguyen (2), T. Vidal (2), J.M. Torrenti (2), A. Sellier (1)
(1) LMDC, France
(2) IFSTTAR, France

11h30 **Récents développements dans la recherche et les spécifications sur les granulats à béton incorporant des sulfures de fer**
Benoit Fournier, Josée Duchesne et Andreia Rodrigues
CRIB, Université Laval

12h00 Repas

13h30 **Analyse du cycle de vie pour les infrastructures en génie civil : passé, présent et futur**
Ben Amor, Jean-Martin Lessard
CRIB, Université de Sherbrooke

14h00 **Calcul de la longueur de développement en présence de défauts**
Pasquale Basso (1), Marc Jolin (1), Bruno Massicotte (2)
(1) CRIB, Université Laval
(2) CRIB, École Polytechnique de Montréal

14h30 **Améliorer l'évaluation des structures endommagées par des réactions de gonflement interne à l'aide de modélisations physico-chimiques.**
Stéphane Multon, Alain Sellier
LMDC, France



15h00 **Influence de l'orientation et du type de fibres sur la fissuration et la perméabilité à l'eau du béton armé**

Thibault Plagué, Clélia Desmettre, Jean-Philippe Charron
École Polytechnique de Montréal

15h30 Clôture des Journées scientifiques

15h45 Réunion du Conseil d'orientation (interne)
Salle 3347, pavillon Alphonse-Desjardins



AFFICHES POUR LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU (RF)2B

BÉDARD, Frédéric. *Renforcement à l'effort tranchant des dalles épaisses en béton en conditions de service*. Université Laval

COLMAN, Charlotte. *Residues de plâtre dans les fines de recyclage*. Université de Liège

ESSALIK, Samy-Joseph. *Nouvel essai annulaire adapté aux bétons à retrait compensé*. Université Laval

FAUCON, Samuel. *Réactions de gonflement interne (RAS et DEF) soumis à des chocs thermiques*. Université de Sherbrooke

FRECH-BARONET, Jessy. *Influence de l'humidité relative sur le comportement du fluage et de la relaxation de la pâte de ciment à l'échelle de la microstructure*. Université Laval

GAGNON, Antoine. *Conception et évaluation de la performance du béton projeté renforcé de fibres : concepts et défis*. Université Laval

HILT, Mélodie. *Production de béton en usine et développement durable : utilisation de technologie de contrôle continu*. Université Laval

MENU, Bruce-Ghandi. *Comportement différé des bétons au jeune âge*. Université Laval

MBINA, Mihindou. *Évaluation non-destructive de la qualité de l'adhérence entre deux bétons par la méthode de la réponse impulsionnelle (RI)*. Université de Sherbrooke

VU, Viet Anh. *Mur radiant : panneaux composite hybride bois et matériel inorganique*. Université Laval

MASOUD, Hosseinpoor. *Simulation numérique de l'écoulement du béton autoplaçant (BAP)*. Université de Sherbrooke

AHMED, Mostafa. *Nouvelle méthode pour quantifier la structuration des suspensions cimentaires*. Université de Sherbrooke

DIMA, Youness. *Caractérisation améliorée de l'écoulement des liants, ajouts cimentaires et liants alternatifs*. Université de Sherbrooke

18^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Université Laval, Québec, Canada
6 et 7 juillet 2017

VALORISATION DE LAITIERS D'ACIÉRIE DANS DES BLOCS DE BÉTONS D'ENROCHEMENT

C. Perlot^A, H. Carré^A

A : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Électrique, ISA BTP - Université de Pau et des Pays de l'Adour, Anglet, France

RÉSUMÉ : Dans le sud-ouest de la France, des blocs d'ophite (pierre verte) sont utilisés dans les ouvrages de protection côtière (digue, épis, ...). Pour préserver cette ressource naturelle dont la disponibilité devient limitée localement, un béton lourd utilisant uniquement des laitiers d'aciérie à arc électrique comme granulats est développé. Il est formulé pour la réalisation de blocs d'enrochement en tenant compte des contraintes d'ingénierie et des sollicitations externes en milieu marin. La formulation finale est validée par la caractérisation du béton à l'état frais et durci, puis lors d'un coulage à échelle réelle sur un chantier pilote. Une analyse de cycle de vie est conduite pour comparer les impacts environnementaux de différents blocs : bloc d'ophite, bloc de bétons de laitiers et bloc de béton d'ophite. Elle démontre que la méthodologie classique de détermination de l'ACV ne considère pas l'impact lié à l'épuisement des ressources non rares à l'échelle mondiale mais qui représentent pourtant un défi environnemental à l'échelle locale. Une amélioration de la méthode est proposée afin de mieux quantifier cet aspect. Les résultats sont ensuite utilisés pour calculer des indicateurs opérationnels.

1. INTRODUCTION

Les laitiers d'aciérie de four électrique (LAFE) sont des sous-produits générés au cours de cette méthode particulière de production d'acier. En raison de la grande quantité de laitiers disponible, son recyclage est largement étudié (Pellegrino et al., 2012). La réutilisation de ce sous-produit comme matériau de génie civil semble être une alternative intéressante à sa mise en décharge ou à son utilisation en remblai (Akinmusuru, 1991 ; Qasrawi, 2014). La littérature relate que, comparés aux granulats naturels, les granulats LAFE présentent une importante densité, une forte porosité, un faible coefficient d'absorption d'eau et une dureté élevée empêchant la rupture transgranulaire (Pellegrino et Gaddo, 2009 ; Amaral de Lima, 1999 ; Manso, 2001 ; Maslehuddin et al., 2003). Leur utilisation est techniquement et économiquement justifiée pour la réalisation de sous-couches routières ou comme granulats pour le béton (Frias et al., 2004 ; Manso et al., 2004 ; Barišić et al., 2014). Des études menées sur l'utilisation de ces granulats dans du béton structural montrent que leurs propriétés mécaniques (résistance à la traction, module d'élasticité) sont similaires ou supérieures au béton traditionnel (Polanco et al., 2011 ; Abu-Eishah et al., 2012). L'amélioration de leurs propriétés post-incendie a également été établie (Netergera et al., 2013). Cependant, dans certains cas le remplacement de plus de 50% des granulats classiques par les laitiers LAFE induit une diminution significative de la maniabilité du matériau (González-Ortega et al., 2013) : le béton doit être soigneusement formulé pour être pompable et correctement mis en place dans les coffrages sur chantier. En raison de leur

densité élevée (entre 3300 et 3500 kg.m⁻³), les granulats de laitier LAFE pourraient être utilisés pour constituer un béton lourd, préservant ainsi les ressources naturelles d'hématite ou de baryte (González-Ortega et al., 2013).

L'ophite est une dolérite particulière des Pyrénées, roche basique, d'une teinte verte plus ou moins foncée et d'aspect de surface « peau de serpent », autrement appelée serpentine. Grâce à ses propriétés remarquables de densité (plus de 3000 kg.m⁻³), dureté et de résistance à l'abrasion, l'ophite est principalement utilisée sous forme de blocs monolithiques de plusieurs tonnes pour constituer des ouvrages de confortement et ainsi protéger les structures côtières contre l'érosion et l'impact des vagues. La côte aquitaine, pour sa protection, est très consommatrice de blocs d'enrochements naturels en ophite. Après une période d'exploitation intense, les ressources d'ophite commencent à s'épuiser. Des solutions alternatives et durables doivent être trouvées. Parallèlement, une usine sidérurgique locale utilisant le procédé par arcs électriques génère massivement des laitiers. Dans ce contexte, nous développons un béton lourd, respectueux de l'environnement, pour l'ingénierie côtière et permettant de valoriser les granulats de laitiers avec une transformation minimale à la sortie du processus sidérurgique. Dans un souci de limitation des impacts environnementaux, les transformations des laitiers seront réduites au minimum, c'est-à-dire au lavage, et criblage à 31,5 mm. Ceci implique donc d'utiliser des granulats lourds et de grandes dimensions.

La première partie de cette étude est consacrée à l'exposé de la démarche de mise au point de la formulation, la présentation détaillée de cette formulation et sa validation par des essais sur le béton frais et durci. Dans une seconde partie, la méthodologie de l'analyse du cycle de vie et son application pour évaluer les avantages environnementaux de l'utilisation des laitiers LAFE sont présentées.

2. MATÉRIAUX D'ÉTUDE ET FORMULATION

Pour un béton destiné à composer des blocs d'enrochement, donc en zone de marnage ce qui correspond à la classe d'exposition XS3, la norme NF EN 206-1 impose : un rapport Eau efficace sur Liant équivalent (E_{eff}/L_{eq}) maximal de 0,5 ; une classe de résistance minimale C35/45 (ces deux nombres correspondent à la résistance caractéristique en compression à 28 jours respectivement d'éprouvettes cylindriques et cubiques), une teneur minimale en ciment de 315 kg.m⁻³ (D_{max} granulat = 31,5 mm) et l'utilisation d'un ciment Prise Mer (PM). A ces exigences réglementaires viennent s'ajouter les contraintes liées aux contraintes de coulage de ces blocs et leur fonction.

Ces blocs de 10 ou 24 tonnes sont coulés en une fois dans des moules cubiques : un liant à faible chaleur d'hydratation est sélectionné afin d'éviter la fissuration liée aux gradients thermiques générés dans les pièces massives lors de la prise du ciment et de limiter la température à cœur du bloc à 65°C. Le béton doit être fluide pour être pompable et assurer une facilité de mise en œuvre (classe d'affaissement S4 selon la NF EN 206-1, ce qui correspond à un affaissement entre 160 et 210 mm).

D'autre part, pour contrer la force des vagues la masse de ces blocs doit être la plus importante possible. Il a donc été décidé d'établir une formulation respectant le critère de béton lourd au sens de la norme NF EN 206-1, c'est-à-dire une masse volumique supérieure à 2900 kg.m⁻³. Ces blocs seront disposés sur les digues de plages de la côte basque, lieu très touristique. L'aspect esthétique doit donc être soigné au maximum. Ceci implique une qualité du parement qui peut être obtenue en utilisant une quantité importante de fines (projet national CALIBE 2001). Actuellement les digues sont protégées par des blocs d'ophite, pierre de couleur verte. L'incorporation de pigments pour colorer le béton est envisagée afin d'intégrer les blocs de façon la plus harmonieuse possible dans l'enrochement existant.

2.1 Constituants

Le ciment sélectionné est un CEM V/A (S-V) 42,5 N PM ES. Il contient 56% de clinker, 22% de laitiers de haut fourneaux et 22% de cendres volantes, ce qui l'en fait un ciment particulièrement recommandé pour les ambiances maritimes et garantit une bonne durabilité. Sa chaleur d'hydratation est de 281 J.g⁻¹ à 41 heures. Un filler calcaire (1/100 µm dont 95% < 63 µm) est utilisé pour fluidifier la pâte et limiter le risque

de ségrégation des granulats lourds que sont les laitiers ; mais aussi augmenter la résistance mécanique et la durabilité des bétons.

Trois types de sables locaux ont été envisagés : sable 0/1 de dune, sable 0/2 concassé d'ophite et un sable 0/4 roulé siliceux. Plusieurs tests ont permis d'évaluer la pertinence d'utiliser chacun d'entre eux. Le sable retenu est le sable 0/1 C de dune. Celui-ci a également l'avantage d'être, par définition, disponible près de la côte et donc du site de production de blocs d'enrochements. Les granulats sont donc des granulats de laitiers d'aciérie à arc électrique, de coupure 0/31,5 mm et d'une masse volumique de 3580 kg.m⁻³. Les proportions en sable et en granulats ont été établies au moyen de la méthode de Dreux-Gorisse et de simulations sur le logiciel Béton-Lab. Des tests de coloration de ces bétons ont été effectués en incorporant des pigments verts, noirs ou des mélanges, sous forme de poudre, à des teneurs variant entre 0,5 et 3% en masse de ciment.

Des tests d'affaissement sur Mortiers Equivalents aux Bétons (Schwartzentruber et Catherine, 2000) ont été réalisés pour deux types d'adjuvants afin de déterminer le plus efficace pour obtenir une maniabilité importante, et son dosage optimal. Le superplastifiant a été retenu. Différentes compositions ont été testées en faisant varier la quantité de filler et de superplastifiant afin d'obtenir un béton qui ne présente ni ressuage, ni ségrégation.

2.2 Formulations des bétons

La formulation du béton étudié est la suivante (Tableau 1, d'après les quantités réellement introduites) :

Tableau 1 : Formulation du béton d'étude.

Constituant	Unité	Dosage
CEM V/A (S-V) 42,5 N PM-ES	kg/m ³	315,0
Laitiers 0/31,5		2136,4
Sable de dune 0/1		402,1
Filler Calcaire		50,0
Eau efficace		141,8
Superplastifiant	% C	0,6

La masse volumique à l'état frais de ce béton est de 3080 kg.m⁻³ et son rapport $E_{eff}/L_{éq}$ de 0,45.

3. CARACTÉRISATION DES BÉTONS

3.1 Essais sur béton frais

La quantité d'air occlus a été mesurée grâce à un aéromètre à béton conformément à la norme NF EN 12350-7. La valeur moyenne est de 1,0%, les quantités d'air occlus mesurés sont faibles ce qui démontre la facilité du béton à se mettre en place et sa compacité, participant à assurer sa durabilité. Le maintien de la rhéologie et la stabilité de la formulation ont été étudiées. Ces aspects sont particulièrement importants d'un point de vue pratique pour prendre en compte le transport du béton depuis l'usine de fabrication et les écarts qui peuvent survenir lors du dosage des constituants. L'affaissement au cône d'Abrams a été mesuré au cours du temps selon la norme NF EN 12350-2.

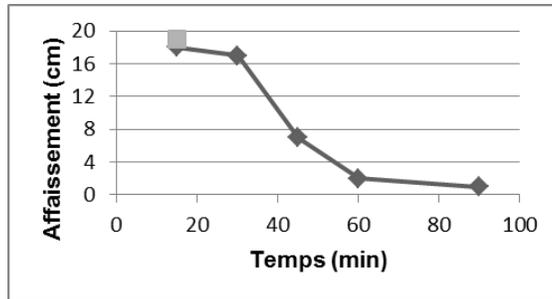


Figure 1. Évolution de l'affaissement dans le temps.

On constate une chute rapide de l'affaissement du béton après 30 minutes. Le superplastifiant a un effet limité dans le temps. Selon la distance entre l'usine et le lieu de coulage, il pourra être remplacé afin d'obtenir un temps de maintien de la rhéologie plus long, compatible avec les délais de transport du béton jusqu'au chantier.

3.2 Essais sur béton durci

3.2.1 Caractérisation d'indicateurs de durabilité

Cette caractérisation a été menée au travers de l'évaluation de trois grandeurs, mesurées sur quatre échantillons âgés de 28 jours ; masse volumique (ρ), porosité accessible à l'eau (ε) et l'absorption capillaire (éprouvettes 10x10x10 cm) selon les protocoles recommandés par l'AFGC-AFREM (AFGC-AFREM, 1997). D'après les résultats obtenus, $\rho_{moyenne} = 2903 \text{ kg.m}^{-3}$ et $\varepsilon_{moyenne} = 12,1 \%$. Lors l'essai d'absorption capillaire, on mesure à différents instants l'évolution de la masse de l'éprouvette étanchée sur 4 faces et plongée dans l'eau sur une des deux faces parallèles non étanchées. On détermine le coefficient d'absorption à chaque instant de mesure en divisant la perte de masse par rapport à la masse initiale par la surface au contact de l'eau (Figure 2).

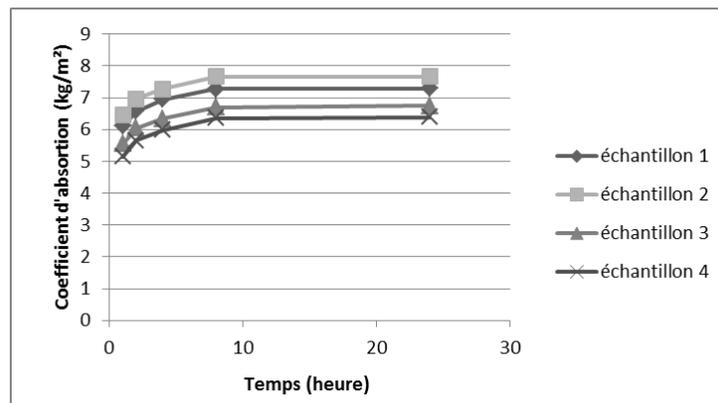


Figure 2. Évolution du coefficient d'absorption dans le temps.

La figure 2 montre que les quatre échantillons présentent une évolution très similaires du coefficient d'absorption. Les valeurs obtenues à 24 heures sont toutes inférieures à 10 kg.m^{-2} , valeur très faible. Cela permet de mettre en évidence la grande compacité du béton testé et donne une certaine garantie sur la durabilité de ce béton en milieu agressif. L'absorption capillaire est un des indicateurs de durabilité des bétons préconisés puisqu'il traduit le principal processus contrôlant la vitesse de pénétration de l'eau dans le béton (contenant éventuellement des ions chlorures, sulfates...) en conditions partiellement saturées. Ceci est tout particulièrement important dans le cas de l'application visée, c'est-à-dire les blocs d'enrochement soumis au marnage et aux sels contenus dans l'eau de mer.

3.2.2 Caractérisation des propriétés mécaniques

La résistance en compression f_c est mesurée à 1 jour, 7 jours, 28 jours et 90 jours sur 3 éprouvettes cylindriques 16x32 cm. Le module d'élasticité est mesuré à 1 jour, 7 jours et 90 jours. La résistance en traction f_t est mesurée par un essai de fendage sur une éprouvette cylindrique de 16x32 cm à 4 échéances : 1, 7, 28 et 90 jours (NF EN 12390-3). Les résultats sont présentés ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2. Propriétés mécaniques à différentes échéances.

Échéances	1 jour	7 jours	28 jours	90 jours
f_c (MPa)	14,2	38,9	68,3	80,8
Module d'élasticité (GPa)	30,5	40,0	--	52,3
f_t (MPa) par fendage	1,3	3,5	3,5	3,8

Les résistances à 28 jours et à 90 jours sont très élevées et bien supérieures aux valeurs minimales exigées dans la norme NF EN 206-1, validant ainsi la formulation du béton pour cette application. L'augmentation de résistance entre 28 et 90 jours est très significative : elle s'explique par la nature du ciment et des granulats. Au-delà de 90 jours, on peut s'attendre à une poursuite de l'augmentation de cette résistance avec le temps.

Étant données la géométrie et la taille des blocs, il est également intéressant de caractériser le retrait du béton. Des essais ont été menés conformément à la norme ASTM C-426 : des éprouvettes 10x10x40 cm sont été soumises 48 heures après le coulage à des cycles de chauffage à 50°C en atmosphère sèche (chlorure de lithium, H.R. = 11 %) pendant 72 h puis de refroidissement pendant 8 heures. A la fin de chaque cycle, les éprouvettes sont pesées et mesurées (Figures 3a et 3b).

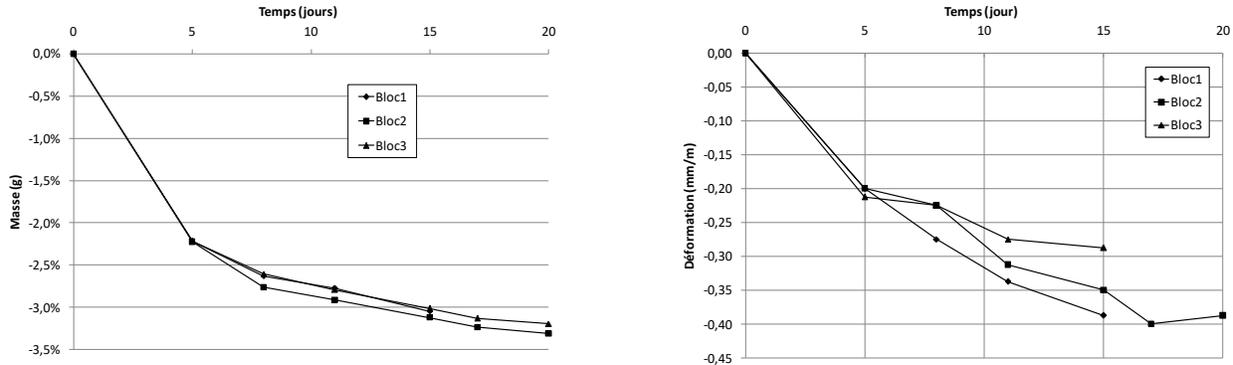


Figure 3. Mesure du retrait. A gauche 3a : évolution de la masse des échantillons dans le temps ; à droite 3b : évolution des déformations des échantillons dans le temps.

Les propriétés mécaniques du béton de laitiers LAFE sont particulièrement élevées compte tenu de la faible teneur en ciment (315 kg.m^{-3}). Les valeurs importantes atteintes après un jour ont permis aux produits d'être démoulés et manipulés. À 28 jours, la résistance en compression était bien supérieure à la classe requise (C35/45) et continue d'augmenter en raison des réactions pouzzolaniques à long terme des laitiers de haut fourneau et des cendres volantes contenus dans le ciment. Ces résultats confirment les résultats des études précédentes: les propriétés mécaniques du béton avec des laitiers d'aciérie sont importantes et voire meilleures que celles du béton avec des agrégats naturels (Etxeberria et al., 2010). Cela s'explique d'une part par la porosité de surface des granulats LAFE qui favorise l'adhérence à la pâte de ciment - comme l'ont confirmé des analyses au microscope électronique à balayage de la zone ITZ (Interfacial Transition Zone) et d'autre part par l'importante résistance des granulats LAFE) (Amaral de Lima, 1999 ; Manso et al., 2011).

Comme attendu, l'utilisation de granulats de grande dimension permet de limiter le retrait du béton. Les éléments fabriqués étant très massifs, il conviendra quand même de rester vigilant en cas de coulage par temps chaud : une température élevée accélère la prise et amplifie le retrait. Des fissurations pourraient alors apparaître au cours du durcissement des éléments.

3.2.3 Sensibilité de la formulation

Pour étudier la sensibilité de la formulation aux variations de dosage en eau, des éprouvettes cubiques 15x15x15 cm ont été fabriquées avec deux formulations dérivées de la formulation choisie : la première utilisant 10 litres d'eau par m³ de béton de moins que la formulation retenue (Tableau 3), et la seconde 10 litres d'eau par m³ de béton de plus. La résistance en compression de ces échantillons a été mesurée à 28 jours.

Comme attendu, la formulation comprenant moins d'eau présente une résistance plus élevée et la formulation présentant plus d'eau a une résistance plus faible. La variation est assez sensible mais, même avec 10 litres d'eau en plus, la résistance en compression du béton reste très élevée.

Tableau 3. Résistance mécaniques mesurées sur les variantes de formulations.

Formulation	R _c (MPa) mesurée sur cube	R _c (MPa) sur cylindre
+ 10	76,6	69,4*
Référence	--	68,3**
- 10	90,8	75,6*

* : calculée ; ** : mesurée

3.2.4 Chantier pilote

Les résultats de caractérisation de ce béton ayant donné satisfaction, pour un essai en grandeur réelle deux blocs de 10 et 24 tonnes ont été coulés, puis après durcissement ils ont été placés sur une digue. Le béton présente bien une fluidité S4 permettant une mise en œuvre aisée, tout en évitant la ségrégation. Le suivi thermique de la prise du béton par le biais de thermocouples noyés dans les blocs à différentes profondeurs confirme que la température à cœur est significativement plus importante qu'à proximité du coffrage, quelle que soit la taille du bloc. La température maximale atteinte se situe aux alentours de 40°C, nettement en dessous de la température limite de 65°C pour laquelle une dégradation du béton peut être observée. L'inspection après décoffrage a permis d'observer que le béton ne présentait pas de ségrégation significative (nids de cailloux en partie basse) ni de fissures de retrait décelables. Certaines zones de parement ont présenté un léger bullage, mais qui reste tout à fait acceptable. Des éprouvettes ont été réalisées avec le béton de cette gâchée pour en mesurer les caractéristiques mécaniques à 28 jours : f_t par fendage = 4,7 MPa, f_c = 71,1 MPa et module d'élasticité = 46,6 MPa. Les valeurs obtenues sont tout à fait en accord avec les mesures réalisées en laboratoire, voire un peu plus élevées. La valeur élevée de résistance en traction mesurée par fendage montre un bon comportement global du béton et est favorable vis-à-vis aux sollicitations auxquelles ces blocs sont soumis, en particulier les chocs liés à l'action de la houle.

Des essais en laboratoire ont permis d'obtenir un béton ayant une couleur très proche de celle de l'ophite. Cependant cette solution ne peut pas être généralisée en raison du coût extrêmement élevé du pigment vert. Cependant l'utilisation du pigment noir est économique acceptable et permet d'obtenir un béton aussi foncé que l'ophite ce qui constitue une amélioration esthétique significative. En effet, les blocs d'ophite et de béton deviennent plus difficiles à distinguer.

4. ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE BLOCS D'ENROCHEMENT

4.1 Méthodologie

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation multi-critères régie par la série de normes ISO 14040, la définissant comme «la compilation et l'évaluation des entrants, des sortants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits tout au long de son cycle de vie ». Les différents indicateurs sont considérés pour discriminer des matériaux, produits, ou processus (Mroueh et al., Habert et al., 2011). Les données d'entrée proviennent de la base de données Ecolnvent (Kellenberger et Althaus, 2003) ou ont été recueillies auprès du fabricant d'acier et des producteurs de matériaux. Une fois collectées, les données environnementales ont été affectées aux impacts selon la méthode CML (CML 2001) (Guinée et al., 2002) et l'ACV a été conduite au moyen du logiciel SimPro d'après une méthode globale élaborée en interne. L'objectif de cette étude ACV était de comparer les charges environnementales de trois blocs d'enrochement de composition différente : ophite massive (référéncé OB), béton de granulats LAFE dont la formulation a été détaillée ci-dessus (référéncé SCB), et béton avec du sable siliceux et des graviers d'ophite (référéncé OCB) qui présente la même formulation que le béton précédent où seuls les granulats LAFE sont substitué par des granulats d'ophite. Cette formulation a aussi fait l'objet d'une étude qui n'est pas présentée ici.

Pour effectuer cette analyse, une unité fonctionnelle intrinsèquement liée aux performances des produits analysés doit être déterminée comme base de comparaison (ISO 14044). La masse est un critère clef pour les blocs d'enrochement, ainsi l'unité fonctionnelle choisie est une tonne de matériau constitutif des blocs. Concernant les limites du système environnemental, seules les étapes de production et de placement dans la structure de ces blocs sont considérées. La vie en œuvre des blocs a été exclue des calculs car aucune émission ou consommation significative n'est générée pendant l'utilisation, ni aucun entretien ou réparation. La fin de vie a également été négligée car les blocs restent sur la digue ou bien sont emportés au large. Pour finir, la durée de vie des différents blocs est prétendue égale.

4.2 Impacts environnementaux

Les résultats du calcul des impacts environnementaux pour la production et la mise en œuvre d'une tonne de chaque type de bloc d'enrochement sont présentés dans le Tableau 4 :

Tableau 4. Impacts environnementaux des cycles de vie des trois blocs (/t de bloc).

Catégorie d'impact	Unité	SCB	OCB	OB
Énergie renouvelable	MJ	34,4	41,9	3,4
Énergie non renouvelable	MJ	419	526	208
Épuisement des ressources	kg Sb éq	0,32	0,25	0,13
Consommation d'eau	litre	2030	508	98
Déchets dangereux	kg	0,012	0,019	9,5 10 ⁻³
Déchets non dangereux	kg	106	107	0,85
Déchets radioactifs	kg	1,00.10 ⁻³	1,75.10 ⁻³	5,75 10 ⁻⁴
Changement climatique	kg CO ₂ éq	35	45	11,5
Acidification atmosphérique	kg SO ₂ eq	0,08	0,12	0,03
Destruction couche d'ozone	kg CFC-11 éq	1,66.10 ⁻³	2,02.10 ⁻³	1,50 10 ⁻³
Formation ozone photochimique	kg C ₂ H ₄	9,69.10 ⁻³	1,00.10 ⁻²	2,23 10 ⁻³

Le bloc béton de laitiers est significativement moins impactant que le bloc de béton d'ophite, sauf sur l'indicateur « consommation d'eau » : ceci est dû au refroidissement par eau abondante des laitiers à la sortie de l'aciérie. Cette consommation a aussi une répercussion négative sur d'autres indicateurs.

On constate que la tonne de bloc d'ophite est moins impactante que la tonne de chaque bloc de béton.

Pour comprendre ces différences, chaque étape du cycle de vie est étudiée séparément pour identifier les sources d'impact. Seule l'étude du bloc de béton aux laitiers est présentée ci-dessous.

4.3 Impacts environnementaux par étape du cycle de vie

Les impacts environnementaux de chaque étape du cycle de vie du bloc de béton aux laitiers est présenté (Figure 4).

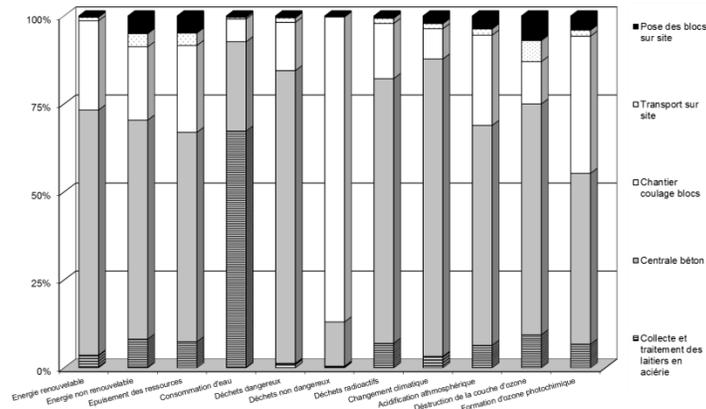


Figure 4. Impacts environnementaux des étapes du cycle de vie du bloc béton aux laitiers (en %).

L'étape la plus impactant est celle de la fabrication du béton en centrale, essentiellement imputable au ciment dont le mode de fabrication est très énergivore, mais aussi consommateur de ressources naturelles et générateur de déchets. Vient ensuite l'étape du chantier de coulage, notamment dû à la production de déchets non dangereux (chutes de béton, plastiques usagés, palettes, ...). Des préconisations sont formulées afin de limiter les charges environnementales : recyclage des bâches, tri et valorisation des déchets de chantier, limitation des restes de béton et réutilisation. Si l'on observe en détail le poste « collecte et traitement des laitiers en aciérie », les consommations d'eau génèrent quasiment l'ensemble des impacts. C'est d'ailleurs cet indicateur qui entachait le bilan environnemental du bloc. Une méthode d'amélioration a été envisagée avec l'industriel pour améliorer ce point en installant des récupérateurs d'eau et un fonctionnement en circuit fermé. L'ACV est utilisée ici comme outil opérationnel pour améliorer le profil environnemental d'un produit.

4.4 Prise en compte de l'économie de la ressource locale

En l'état actuel de la méthode d'ACV, l'indicateur « épuisement des ressources » est un indicateur d'impact global : il est basé sur des ressources qui se raréfient à l'échelle planétaire (charbon, chrome, pétrole, uranium, etc.). L'ophite n'est pas rare à l'échelle mondiale, elle ne rentre donc pas directement dans le calcul de cet indicateur. L'évitement de prélèvement d'ophite, via la valorisation de laitiers d'aciérie, ne s'observe donc pas au travers de cet indicateur. L'épuisement de la ressource en ophite dans le sud-ouest est pourtant une réelle problématique et les efforts faits dans pour trouver des alternatives devraient être mieux évalués et valorisés. En analyse de cycle de vie les données récoltées lors de la phase d'inventaire sont utilisées à travers une méthode dite de caractérisation qui traduit ces données en impacts potentiels sur l'environnement. Cette méthode de caractérisation est constituée de facteurs de caractérisation qui permettent la conversion des données d'inventaire en indicateur d'impact environnemental. Un facteur de caractérisation associé au flux d'ophite a été développé (Équation 1) et intégré dans la méthode précédemment utilisée (CML 2000) afin de tenir compte du flux d'ophite utilisé :

$$ADP_{ophite} = \frac{DR_{ophite}}{R_{ophite}^2} \times \frac{R_{ref}^2}{DR_{ref}}$$

- Avec :
- ADP_{ophite} : facteur de caractérisation associé à l'ophite (kg Sb / kg ophite)
 - DR_{ophite} : taux d'extraction de la réserve d'ophite (kg ophite / an)
 - R_{ophite} : réserve ultime de la ressource d'ophite (kg ophite)
 - DR_{ref} : taux d'extraction de la réserve de référence, antimoine (kg Sb / an)
 - R_{ref} : réserve ultime de la ressource de référence, antimoine (kg Sb)

La prise en compte du flux d'ophite dans le calcul de l'indicateur épuisement des ressources a entraîné une augmentation de 72% de l'impact pour le bloc d'ophite et de 15% pour le béton de granulats d'ophite. Cette augmentation est plus marquée pour le bloc d'ophite car il utilise une quantité d'ophite plus importante. D'autre part, la comparaison des impacts entre les différents types de blocs aboutit aux mêmes conclusions, bien que moins tranchées, que l'on prenne en compte ou non un facteur de caractérisation local pour l'ophite : dans les deux cas, le bloc d'ophite pur est le moins impactant.

Considérant la réserve en ophite de la carrière locale et les besoins annuels, le gisement restant ne permet que deux ans d'exploitation. Il faudrait ensuite faire venir des blocs de carrières plus éloignées. Les calculs précédents ne tiennent pas compte de l'impact à long terme lié à l'utilisation de l'ophite à partir de carrières éloignées, une fois les ressources considérées dans cette étude épuisées. Pour considérer ce dernier aspect, les impacts environnementaux des blocs ophites ont été calculés en intégrant des charges supplémentaires liées au transport, et ce pour différentes distances entre 0 et 500 kilomètres. Tous les indicateurs - en dehors de «la consommation d'eau» - sont multipliés par des facteurs allant de 3 à 10, confirmant le rôle impactant du transport. Les trois indicateurs les plus modifiés par ce transport sont discutés en fonction de la distance: énergie fossile, réchauffement climatique et acidification stratosphérique (Figure 5).

D'après ces calculs, l'indicateur de consommation «énergie non renouvelable» montre que le transport d'ophite n'est avantageux que pour de courtes distances (jusqu'à 100 km). En ce qui concerne l'indicateur changement climatique, le transport d'ophite s'avère intéressant pour des distances inférieures à 150 km. En termes d'acidification atmosphérique, la distance limite est d'environ 350 km. Doit être ajouté à ces considérations le critère économique : le transport d'ophite n'est pas avantageux au-delà de 50 km.

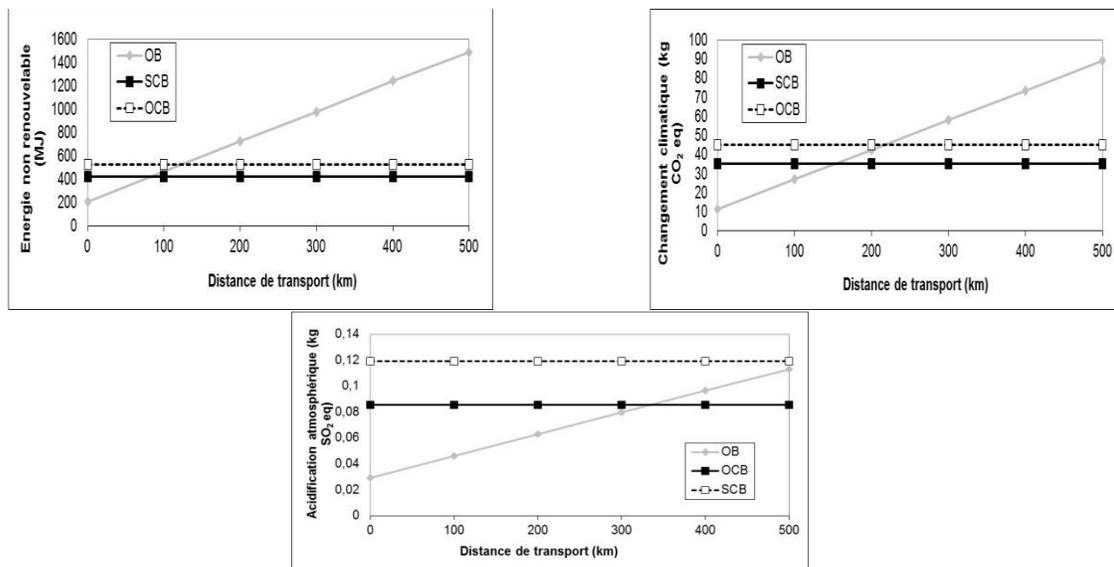


Figure 5. Évolution d'impacts environnementaux avec la distance de transport d'ophite.

En conclusion, on peut considérer que l'utilisation de blocs d'ophite n'est avantageuse que pour une distance de transport inférieure à 100 km. Au-delà, l'utilisation de laitiers LAFE dans des blocs de béton se d'un point de vue économique et environnemental. Une fois le gisement local épuisé, il faudra avoir recours à l'exploitation d'une autre carrière, la plus proche se situant à plus de 200 km : l'utilisation du bloc de laitiers est alors justifiée.

6. CONCLUSIONS

Cette étude s'est intéressée à deux problématiques : la valorisation de sous-produits d'aciérie à arc électrique (les laitiers) et la recherche d'une technique de remplacement acceptable sur le plan environnemental des blocs d'ophite utilisés comme blocs d'enrochement. Ainsi un béton lourd de granulats

de laitier a été développé. Les laitiers sont utilisés comme graviers ce qui évite presque totalement le concassage en sortie de l'aciérie. Le béton lourd développé présente de très bonnes propriétés : grande fluidité, hautes résistances mécaniques, respect des critères de durabilité, faible chaleur d'hydratation. De plus, l'analyse de cycle de vie a montré qu'au-delà d'une distance de 100 km de la carrière d'ophite, le bilan environnemental des blocs de béton est favorable.

7. REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée en collaboration avec le centre de ressources technologiques Nobatek et la société TSV, grâce au soutien financier de la Région Aquitaine et l'aide du Port de Bayonne.

8. RÉFÉRENCES

- Abu-Eishah SI, El-Dieb AS, Bedir MS (2012) Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region, *Construction and Building Materials*, 34:249–256.
- Akinmusuru JO (1991) Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes, *Resources Conservation & Recycling*, 5:73–80.
- AFPC-AFREM (1997) Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. Symposium Proc : Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Toulouse, France.
- Amaral de Lima L (1999) Hormigones con escorias de horno electric como aridos: propiedades durabilidad y comportamiento ambiental (thèse de doctorat), Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Espagne.
- ASTM C-426, Standard Test Method for Linear Drying Shrinkage of Concrete Masonry Units, 2010. ASTM International.
- Barišić I, Dimter S, Rukavina T. (2014) Strength properties of steel slag stabilized mixes, *Composites Part B: Engineering*, 58:386-391.
- Etxeberria M, Pacheco C, Meneses JM, Berridi I (2010) Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates, *Construction and Building Materials*, 24:1594–600.
- Frias Rojas M, Sanchez de Rojas MI (2004) Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: expansive compounds, *Cement and Concrete Research*, 34:1881–1888.
- González-Ortega M.A, Segura I, Cavalaro S.H.P, Toralles-Carbonari B, Aguadoa A, Andreello A.C (2013) Radiological protection and mechanical properties of concretes with EAF steel slags, *Construction and Building Materials* 51:432-438.
- Guinée J.B, Gorrée M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, Van Oers L, Wegener Sleeswijk A, Suh S, Udo de Haes H.A, De Bruijn H, Van Duin R, Huijbregts M.A. J (2002) Life Cycle Assess: An Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL.
- Habert G, d'Espinose de Lacaillerie J-B, Roussel N (2011) An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends, *Journal of Cleaner Production*, 19:1229-1238.
- ISO 14040. Environmental management – life cycle assessment – principles and framework, 2006. International Standard Organization.
- ISO 14044. Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines, 2006. International Standard Organization.
- Kellenberger D, Althaus H.J (2003) Life Cycle Inventories of Building Products. Final Report Ecoinvent. EMPA, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2003.
- Manso J.M (2001) Fabricacion de hormigon hidraulico con escorias de horno electrico de arco (thèse de doctorat), University of Burgos, Espagne.
- Manso J.M, Gonzalez J.J, Polanco J.A (2004) Electric arc furnace slag in concrete, *Journal of Material in Civil Engineering*, 6(6):639–645.
- Manso J.M, Hernández D, Milagros Losáñez M, González JJ (2011) Design and elaboration on concrete mixtures using steelmaking slags. *ACI Material Journal*, 108-M72:673–81.

- Maslehuddin M, Sharif A.M, Shameen M, Ibrahim M, Barry M.S (2003) Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 17:105-112.
- Mroueh U.M, Eskola P, Laine-Ylijoki (2001) Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction, *Waste Management*, 21:271-277.
- Netingera I, Rukavinab M.J, Mladenovič A (2013) Improvement of Post-fire Properties of Concrete with Steel Slag Aggregate, *Procedia Engineering*, 63:745-753.
- NF EN 206-1 (2004) Béton Partie 1 : Spécification, performances, fabrication et conformité, AFNOR.
- NF EN 12350 (2012) - Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement, Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité AFNOR.
- NF EN 12390-3 (2012) Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes, AFNOR.
- NF EN 12390-6 (2012), Essais pour béton durci - Partie 6 : détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes, AFNOR.
- Pellegrino C, Gaddo V (2009) Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate, *Cement and Concrete Composites*, 31:663-671.
- Pellegrino C, Cavagnis P, Faleschini F, Brunelli K (2012) Properties of concretes with black/oxidizing electric arc furnace slag aggregate, *Cement and Concrete Composites* 37:232-240.
- Polanco JA, Manso JM, Setién J, González JJ (2011) Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag, *ACI Material Journal*, 108-M22:196–203.
- Qasrawi H (2014) The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment, *Construction and Building Materials*, 54:298-304.
- Schwartzentruber A, Catherine C (2000) Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - A new tool to design concrete containing admixture, *Materials and Structures*, 33:475-482.

MERCI À NOS PRÉCIEUX COMMANDITAIRES



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des sciences et de génie
Département de génie civil
et de génie des eaux



CRIB
Centre de recherche sur les
infrastructures en béton

Québec 



Association
Béton
Québec
LA référence



Association
Canadienne
du Ciment



MISSION CONCRÈTE INSTITUTE
QUEBEC &
E. ONTARIO



@ BEKAERT
MACCAFERRI
UNDERGROUND SOLUTIONS
www.bm-underground.com



Ciment Québec



EUCLID CANADA



INTERNATIONAL
CONCRETE REPAIR
INSTITUTE

SECTION
Québec



LAFARGE