

**DIRECTEUR DE LA PUBLICATION**

Serge KEBABTCHIEFF

**RÉDACTION**

**Rédacteur en chef**

François BUYLE-BODIN,  
université de Lille

**Représentant l'Union  
des Associations Françaises  
de Génie Civil**



Jean-Marc TANIS (EGIS), Président

**Représentant**

**l'Association Française**

**de Génie Civil AFGC**



Bruno GODART (IFSTTAR),  
Président du CA

Patrick GUIRAUD (Cimbéton),  
Président du Comité des Affaires Générales

Thierry KRETZ (IFSTTAR),  
Président du Comité Scientifique et Technique

**Représentant l'Association**

**Universitaire de Génie**

**Civil AUGC**



Olivier PLÉ,  
Président du CA

Sofiane AMZIANE (Université de Clermont-  
Ferrand), Président du Conseil Scientifique

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

chercheurs René Houpert

**Représentant l'Ifsttar**

Jean-Luc CLÉMENT, direction scientifique

**Représentant l'Union des Ingénieurs et**

**Scientifiques Francophones UISF**

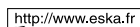
Élie ABSI, président

**Relations internationales**

Zoubeir LAFHAJ, École Centrale de Lille

**ABONNEMENT :**

Editions ESKA



12, rue du Quatre-Septembre - 75002 PARIS

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

**FABRICATION :** AGPA EDITIONS

4, rue Camélinat - 42000 Saint-Etienne

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

E-mail : agpaedit@wanadoo.fr

**PUBLICITÉ - À la rédaction**

**IMPRESSION :**

Imprimé en France

# sommaire

**éditorial**

**GC'2017**

**Le Génie Civil et l'Aménagement des Grandes Métropoles  
15 et 16 mars 2017 à l'ESTP Paris, Cachan**

- Influence de la porosité des granulats sur les propriétés de durabilité des bétons. Investigations menées dans le cadre de la construction de la nouvelle route du littoral sur l'île de la Réunion ..... 7  
*Influence of aggregates porosity on concrete overall durability. Outcomes of investigations carried out for the New Coastal Road on La Reunion Island major project*  
*Lionel LINGER, Pierre Edouard DENIS, Myriam CARCASSES, Franck CASSAGNABERE, François CUSSIGH, Jonathan MAI-NHU, Patrick ROUGEAU*
- Revêtements modulaires en béton pour l'infiltration des eaux pluviales : référentiel technique, performances environnementales et perspectives en matière de maquette numérique ..... 14  
*Concrete block pavements for surface water infiltration: technical specifications, environmental performances and BIM-oriented prospective*  
*Jennifer FALEYEUX, Sophie JACOB, Félicien THIOU*
- Évaluation des paramètres intervenant sur le ressuage lors de la mise en œuvre des bétons de parois moulées. Application à un chantier du Grand Paris ..... 20  
*Evaluation of the parameters involved in penetrant testing during the application of molded wall concrete. Application to construction site of the Large Paris*  
*Amin AZZI, Yannick VANHOVE, Chafika DJELAL, Olivier MADEC, Philippe GOTTELAND*
- Le lavage des Sables de Beauchamp excavés : une opportunité de valorisation des déblais ..... 30  
*The challenge of Beauchamp Sands' recovery: opportunity offered by washing stage*  
*Isabelle MOULIN, Thomas MILLAN, Julian MARLINGE, Grégoire PRIOL, Stéphane GAFFIÉ*
- Influence de la composition cimentaire sur le dégagement de chaleur et les montées en résistances mécaniques ..... 39  
*Effect of the cement composition on the temperature and strength rising at early age*  
*Agathe BOURCHY, Laury BARNES DAVIN, Laetitia BESSETTE, Jean Michel TORRENTI*

<b>abstracts — résumés</b> .....	4
<b>communiqués et colloques</b> .....	47
<b>bulletin d'abonnement</b> .....	2
<b>recommandations aux auteurs</b> .....	54



Les 15 et 16 mars 2017, l'Association Française de Génie Civil organisait ses journées techniques biennuelles GC'2017 dans le grand amphithéâtre de l'ESTP à Cachan. Le thème de ces rencontres portait sur **le génie civil et l'aménagement des grandes métropoles**.

Une tendance lourde d'exode rural et de mouvement des populations des campagnes vers les villes est constatée dans le monde entier. Plus de la moitié de la population mondiale vit en ville, et environ deux-tiers des français habitent en milieu urbain. L'aménagement des grandes métropoles et plus globalement des villes pose donc des défis économiques, sociaux, environnementaux, sanitaires et de mobilité pour accueillir toujours plus de personnes, tout en offrant aux habitants un cadre de vie agréable. Cela nécessite de créer des schémas de déplacements vertueux fondés sur la multimodalité et l'accessibilité, de développer la place de la nature dans les villes, de maîtriser voire réduire les dépenses énergétiques de la ville, de rendre les métropoles plus économes et plus sobres en ressources.

La croissance démographique et urbaine, la transformation des modes de vie, la raréfaction des ressources, les menaces environnementales, les tensions économiques et sociales rendent la mutation de la ville plus prégnante. Elle doit apprendre à mieux gérer sa capacité à épurer les eaux et maîtriser les inondations, à éliminer ses déchets, à lutter contre les îlots de chaleur et s'adapter au réchauffement climatique. En parallèle, la ville doit présenter une résilience certaine vis-à-vis de risques naturels (séismes, sécheresses,...), technologiques (accidents industriels, pannes des systèmes techniques,...), environnementaux (pollutions de l'air, de l'eau, des sols, nuisances sonores,...) et de malveillance (dégradations, terrorisme,...). La ville doit donc se réinventer, se reconstruire sur elle-même tout en préservant son patrimoine le plus emblématique.

Les structures de génie civil constituent un patrimoine essentiel de notre société et sont le support indispensable de la majeure partie de nos activités. A ce titre elles représentent un élément indispensable pour l'aménagement des villes et des grandes métropoles. Elles doivent répondre à de nouvelles attentes, en termes d'usage, de performances, et de permanence d'exploitation. En outre, ce patrimoine vieillit et des problématiques majeures apparaissent pour maintenir les ouvrages en bon état de service et prolonger leur durée de vie dans ce contexte de ville pérenne.

Les journées techniques de l'AFGC ont donc abordé cette problématique sous la forme de six sessions qui ont respectivement traité de la durabilité des bétons, de la valorisation des matériaux, de la mobilité et de l'urbanisme durable, des immeubles de grande hauteur, gares et stades, du Grand Paris et des espaces souterrains, et enfin des solutions innovantes pour des villes durables.

Le présent numéro des Annales du BTP reprend et publie une partie des communications qui ont été présentées lors des deux premières sessions de ces journées et qui intéressent particulièrement le lectorat de cette revue. Nous allons maintenant présenter très brièvement les articles retenus.

Le premier article traite de l'influence de la porosité des granulats sur les propriétés de durabilité des bétons en se fondant sur les investigations menées dans le cadre de la construction de la nouvelle route du littoral sur l'île de la Réunion. Le second article présente le référentiel technique, les performances environnementales et les perspectives en matière de maquette numériques pour les revêtements modulaires en béton destinés à favoriser l'infiltration des eaux pluviales dans les sols. Le troisième article traite de l'évaluation des paramètres intervenant sur le ressuage lors de la mise en œuvre des bétons de parois moulées, avec une application à un chantier du grand Paris. Le quatrième article est consacré au lavage des sables de Beauchamp excavés qui peut constituer une opportunité de valorisation des déblais de creusement des tunnels du grand Paris. Quant au cinquième article, il traite de l'influence de la composition cimentaire sur le dégagement de chaleur et les montées en résistances mécaniques, problème important notamment vis-à-vis de la prévention de la réaction sulfatique interne.

Pour conclure cet éditorial, je souhaiterais remercier l'éditeur des Annales du BTP et son rédacteur en chef pour l'occasion qu'ils nous donnent de diffuser à un public plus large certaines communications présentées lors des journées d'étude GC'2017 de l'AFGC.

**Bruno GODART**  
*Président de l'AFGC*

### **INFLUENCE DE LA POROSITÉ DES GRANULATS SUR LES PROPRIÉTÉS DE DURABILITÉ DES BÉTONS. INVESTIGATIONS MENÉES DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL SUR L'ÎLE DE LA RÉUNION**

LIONEL LINGER, PIERRE EDOUARD DENIS, MYRIAM CARCASSES, FRANCK CASSAGNABERE, FRANÇOIS CUSSIGH, JONATHAN MAI-NHU, PATRICK ROUGEAU

Les projets de construction de grande ampleur s'appuient de plus en plus sur des exigences de performance et de durabilité pour une durée de vie donnée plutôt que sur les seules exigences basées sur la résistance mécanique à la compression et la composition du béton. Les spécifications reposent donc sur des exigences de durabilité à travers les indicateurs permettant d'estimer les propriétés de transfert (porosité, perméabilité, coefficients de diffusion) pour prévenir les principaux risques physico-chimiques de dégradation et la pénétration d'espèces agressives à travers le béton d'enrobage (ions chlorure et sulfate, dioxyde de carbone, oxygène, eau). C'est notamment le cas dans le projet de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion, composée du plus long viaduc en mer de France (5,4 km) et de quatre tronçons de digues (3,6 km).

Pour ce projet, les granulats disponibles localement (qui présentent une porosité interconnectée importante) contribuent à augmenter de manière significative la porosité des bétons durcis malgré de faibles rapports Eeff/L. L'importation de plus d'un million de tonnes de granulats ne paraissait pas envisageable pour la réalisation d'un tel projet. L'utilisation des granulats locaux a donc nécessité des études approfondies sur l'influence des propriétés intrinsèques des granulats sur toutes les propriétés de transfert des bétons. L'objectif de cette démarche a été de proposer des valeurs seuils adaptés permettant de réaliser le projet et de satisfaire aux exigences de durabilité pour la durée vie escomptée. Il s'agit en particulier de préciser l'influence de la porosité des bétons, induite en partie par celle des granulats locaux, sur leur comportement vis-à-vis des risques de corrosion liés à la carbonatation et à la migration des chlorures. L'étude s'est appuyée sur une large bibliographie mais surtout sur des simulations comparatives afin de déterminer l'influence des principales caractéristiques des bétons en intégrant les paramètres liés aux matériaux, les conditions de mise en œuvre (cure) et les caractéristiques liées à l'environnement des ouvrages (température, hygrométrie, pluie...) sur la durée de vie. Les résultats de l'étude ont permis de définir des valeurs seuils pour les propriétés de durabilité en considérant les performances réelles des couples « béton/enrobage ». Enfin, les résultats mettent en évidence la nécessité d'approfondir les recherches sur l'influence de la porosité des granulats sur les propriétés de durabilité des bétons. Cet aspect

est intégré au projet national [PERFDUB, 2016] et au projet ANR associé [MODEVIE] dont les objectifs finaux consistent à déployer l'approche performantielle dans le contexte normatif et à mettre au point un modèle prédictif unique de durabilité utilisable dans une démarche performantielle.

### **INFLUENCE OF AGGREGATES POROSITY ON CONCRETE OVERALL DURABILITY. OUTCOMES OF INVESTIGATIONS CARRIED OUT FOR THE NEW COASTAL ROAD ON LA REUNION ISLAND MAJOR PROJECT**

*Recent projects specifications are definitively much more focused on the fact that concrete mix designs must be designed to achieve the expected structures durability rather than typical compressive strength classes. Major worldwide Project's concrete specifications are more and more often setting up threshold values regarding durability indicators aiming to assess concrete transfer properties (porosity, permeability, diffusivity) to prevent aggressive matters (chlorides and sulfate ions, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) to migrate through steel rebar cover. This is the case of a currently ongoing major project in La Réunion Island in the Indian Ocean dealing with the construction of a New Coastal Road consisting in France's longest offshore viaduct (5.4 km), a dike (3.6 km) and two interchanges.*

*At the starting up of concrete mixes design process, it has been realized that the intrinsic quality of locally available aggregates (which are exhibiting a high vacuolar interconnected porosity) will definitively be subject to concern to achieve the specified hardened concrete porosity. On the other hand, it was definitively not worth considering the importation of more than one million tons of aggregates for concrete production. It was, then, a major issue to globally investigate the influence of the aggregates intrinsic properties on all the transfer properties in order to propose alternative durability threshold values allowing the achievement of the expected durability of the concrete structures. Considering that concrete overall porosity results from a coupling of cementitious material matrix porosity (where liquid and gas species are migrating) and aggregates intrinsic porosity, it has been investigated if an increased porosity measured on a given concrete mix design was systematically associated with lower transfer properties which would jeopardize concrete overall durability. This study is based on bibliographic study and, associated with the selection of adequate steel rebar covers determined by implementing numerical simulation in modeling tools, allowed to agree on alternative durability indicators threshold values to those initially envisaged for the project. It also leads to the conclusion that it would be worth to carry on further research to better understand the influence of aggregates porosity on concrete overall durability in the course of a starting French national project [PERFDUB, 2016] aiming to optimize and rationalize methods of the performance-based approach coupled with the research program MODEVIE (French acronym of Concrete structures ageing modeling) [Modevie, 2016].*

## **REVÊTEMENTS MODULAIRES EN BÉTON POUR L'INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES : RÉFÉRENTIEL TECHNIQUE, PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES ET PERSPECTIVES EN MATIÈRE DE MAQUETTE NUMÉRIQUE**

JENNIFER FALEYEUX, SOPHIE JACOB, FÉLICIEN THIOU

Les eaux pluviales sont un élément majeur à maîtriser dans la planification et l'aménagement des territoires, de par les enjeux de limitation des risques d'inondation, de préservation des ressources en eau et des milieux naturels, et d'aménagement des espaces.

Les revêtements modulaires en béton sont de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable et d'une gestion intégrée des eaux pluviales pour « désimperméabiliser » la ville. Il n'existe pas à ce jour de norme ou de recommandation française spécifique sur ces produits, ni de spécifications partagées au niveau européen.

Le CERIB a donc défini les exigences techniques qui pourraient être appliquées en France sur ces produits, dans le cadre d'un référentiel professionnel.

Ce référentiel prend en compte les produits les plus répandus sur le marché français, à savoir les pavés et dalles en béton poreux, les pavés à joints larges, et les dalles drainantes. Il donne les exigences sur ces produits, principalement en termes de résistance mécanique et de perméabilité, de manière à assurer un degré de performance suffisant. L'étude qui a conduit à ce référentiel a permis, entre autres, de définir un protocole de mesure de la perméabilité applicable à tous les produits, ainsi qu'une méthode de dimensionnement mécanique des dalles drainantes.

La prise en compte de la qualité environnementale, initialement appliquée essentiellement aux bâtiments, est intégrée progressivement à l'aménagement urbain.

Pour compléter les données d'ores et déjà disponibles sur les pavés et dalles en béton préfabriqué, l'Industrie du Béton a évalué les impacts environnementaux des pavés modulaires en béton permettant l'infiltration des eaux de ruissellement. Cette évaluation permet de répondre aux attentes des donneurs d'ordre intégrant les performances environnementales dans leurs critères de décision.

L'ensemble de ces résultats constitue également une étape dans les travaux engagés par la profession en termes de maquette numérique et de construction des bases de données qui seront utilisés dans le cadre de la démarche « BIM ».

### **CONCRETE BLOCK PAVEMENTS FOR SURFACE WATER INFILTRATION: TECHNICAL SPECIFICATIONS, ENVIRONMENTAL PERFORMANCE AND BIM-ORIENTED PROSPECTIVE**

*Concrete permeable pavements are more and more used in stormwater management, however there is neither European nor French standard or specification about these products. The CERIB, Study and Research Centre for the French Concrete Industry, aimed to define technical requirements applicable in France, mainly in terms of permeability and mechanical resistance, to ensure a relevant performance level.*

*It was decided to focus on most commonly used products: porous concrete pavement, widened joints concrete pavements, and concrete grass grids. This paper focuses on two excerpts of the study: permeability measurements and mechanical resistance of the products. It introduces a permeability test protocol and the required mechanical tests to assess the resistance of concrete grass grids which have been developed by CERIB.*

*To complete the current environmental data on concrete block pavements, the environmental impacts of permeable concrete pavements were assessed, to be available for contractors wanting to consider environmental performance into their decision-making criteria.*

*All those results are part of the main works of the precast industry regarding BIM approach and the construction of generic databases for the virtual information models.*

## **ÉVALUATION DES PARAMÈTRES INTERVENANT SUR LE RESSUAGE LORS DE LA MISE EN ŒUVRE DES BÉTONS DE PAROIS MOULÉES. APPLICATION À UN CHANTIER DU GRAND PARIS**

AMIN AZZI, YANNICK VANHOVE, CHAFIKA DJELAL, OLIVIER MADEC, PHILIPPE GOTTELAND

Les parois moulées sont des ouvrages de fondations en béton armé utilisées comme structure définitive pour la réalisation de nombreux ouvrages. Les observations effectuées après le terrassement et le rabotage des parois montrent que les parois moulées présentent des défauts qui peuvent être reliés au ressuage du béton lors de sa mise en place. La formulation du béton ainsi que les constituants du mélange sont souvent mis en cause. Il s'avère que plusieurs paramètres de formulation du béton jouent des rôles plus ou moins importants sur la stabilité de ce béton. Leur influence et les interactions entre chacun de ces paramètres sont encore mal connues pour une paroi moulée dont le ressuage du béton est accentué par la grande hauteur mise en œuvre et par conséquent, par les pressions élevées en profondeur de fouille. Une étude a été menée afin de comprendre l'influence des divers paramètres affectant le ressuage du béton des parois moulées. Quatre formulations de béton issues de chantier ont été caractérisées en laboratoire. Une formule a montré sur chantier sa robustesse vis à vis du ressuage, tandis que les trois autres formulations ont abouti à des pathologies plus ou moins sévères de cheminées de remontées d'eau. Des recommandations ont pu être proposées afin de limiter le seuil admissible adopté et remédier aux problèmes des cheminées de remontées d'eau. Les formulations du béton de fondation de plusieurs parois moulées du grand Paris ont été modifiées en conséquence.

### **DEVELOPMENT OF AN ANALOGUE MODEL TO STUDY THE MECHANISMS OCCURRING AT THE CONCRETE / FORMWORK INTERFACE**

*Diaphragm walls are reinforced concrete foundation elements used as a definitive support for executing many types of structures. The observations recorded after earthworks and wall planning demonstrate that diaphragm walls exhibit defects due to the release of bleed water. The concrete mix design and components are often the culprit. The influence and interactions*

between each of these parameters remain relatively unknown for a diaphragm wall, whose rate of concrete bleeding rises by virtue of the high wall poured. A study was conducted to determine the influence of the parameters affecting the concrete bleeding. Four distinct concrete mix designs stemming from project sites have been characterized in the laboratory. A series of recommendations have been issued for the purpose of limiting the allowable threshold set in addition to correcting problems associated with the release of bleed water. Based on these findings, the foundation concrete mixes of several diaphragm walls across the Paris Metropolitan Area have been modified.

### **LE LAVAGE DES SABLES DE BEAUCHAMP EXCAVÉS : UNE OPPORTUNITÉ DE VALORISATION DES DÉBLAIS**

ISABELLE MOULIN, THOMAS MILLAN, JULIAN MARLINGE, GRÉGOIRE PRIOL, STÉPHANE GAFFIÉ

La construction du Grand Paris Express est susceptible de générer près de 43 millions de tonnes de matériaux excavés. Parmi les formations géologiques rencontrées, la formation des Sables de Beauchamp représente une part notable des matériaux exploités avec plusieurs millions de tonnes, provenant en grande partie d'excavations au tunnelier. La réutilisation de ces matériaux devient ainsi un formidable enjeu environnemental pour la Société du Grand Paris, qui dans le cadre de la COP 21 a pris l'engagement de développer une économie circulaire de la gestion des déblais et ainsi favoriser la valorisation des matériaux excavés.

La valorisation des Sables de Beauchamp excavés dans les filières traditionnelles de type remblais ou couche de forme apparaissant limitée en regard des volumes générés et des caractéristiques attendues des matériaux en sortie de tunnelier, la Société du Grand Paris a engagé une étude des opportunités de valorisation qu'apporterait un traitement par lavage desdits sables. S'appuyant sur des essais en laboratoire, l'étude vise à estimer la part de la fraction sableuse valorisable et sa qualité en fonction de la variabilité des Sables de Beauchamp rencontrés. Les caractéristiques physiques, minéralogiques et environnementales des fractions après lavage ont été déterminées afin d'étudier l'impact du lavage sur les filières de valorisation envisageables et sur le potentiel polluant des matériaux excavés. Afin de poursuivre l'évaluation technico-économique, la réalisation d'essais pilotes est en cours.

### **THE CHALLENGE OF BEAUCHAMP SANDS' RECOVERY: OPPORTUNITY OFFERED BY WASHING STAGE**

*It is estimated that 43 millions of tons of excavated materials may be generated during the Grand Paris Express construction. Among the geological formations, Beauchamp sands represent a significant portion with several millions of tons mainly coming from Tunnel Boring Machine (TBM). In the framework of the COP 21, Société du Grand Paris, has committed to recover excavated materials into a circular economy which is a huge environmental challenge.*

*The characteristics (quality and volumes) make the Beauchamp sands hardly suited for classical sectors (road building, backfil-*

*ling...). Société du Grand Paris decided to explore the opportunities of a washing stage to enhance these sands characteristics. It relies on laboratory tests dedicated to estimate the valuable sand fraction and its quality taking into account their inherent variability. The physical, mineralogical and environmental characteristics of the washed fractions have been determined in order to study environmental and economic impact of such a washing stage for the possible various future uses. Pilot scale tests are in progress to continue the evaluation.*

### **INFLUENCE DE LA COMPOSITION CIMENTAIRE SUR LE DÉGAGEMENT DE CHALEUR ET LES MONTÉES EN RÉSISTANCES MÉCANIQUES**

AGATHE BOURCHY, LAURY BARNES DAVIN, LAETITIA BESSETTE, JEAN MICHEL TORRENTI

L'exothermie du phénomène d'hydratation conduit à une augmentation de la température dans les pièces massives en béton. Les élévations de température créent, lorsque les déformations sont gênées, des contraintes mécaniques qui, lors du refroidissement peuvent donner lieu à la formation de fissures. Ces fissures favorisent ainsi la pénétration d'éléments agressifs venant de l'extérieur tels que les chlorures, les sulfates et les sels. Par ailleurs, ce phénomène peut également provoquer le développement de Réaction Sulfatique Interne (RSI).

La mesure de la chaleur d'hydratation des ciments dans des conditions normées ne permet pas de prendre en compte tous les paramètres de la formule béton qui peuvent conduire à une dissipation ou au contraire à une accentuation de ces phénomènes thermiques.

Il est donc intéressant d'essayer de comprendre quels paramètres du ciment influencent le plus la production d'une quantité de chaleur maximale. La dilution est un facteur d'ordre un, souvent évoqué dans la littérature.

La présente étude s'attache à chercher quels sont les autres facteurs influençant le dégagement de chaleur par la méthode des plans d'expériences. Elle s'attache en particulier à vérifier l'impact de la chimie, de la minéralogie et de la finesse des ciments.

### **EFFECT OF THE CEMENT COMPOSITION ON THE TEMPERATURE AND STRENGTH RISING AT EARLY AGE**

*The exothermic of cement hydration causes a temperature increase and development of temperature gradients in large concrete structures. Those temperature gradients create mechanical stresses which can induce the development of cracks. These cracks facilitate the penetration of corrosive elements from the outside, such as chlorides, sulfates and salts. A temperature higher than 65°C can also induce the development of Delayed Ettringite formation (DEF). Understanding which parameters in cement influence the most the release of heat is interesting. It is interesting to understand which parameters influence the production of heat during hydration. In this study, screenings of constituents and characteristics of cement are performed so to determine which ones have the most influence on the thermal activity and heat released in massive concrete structures. Effects of chemical and mineralogical composition and finesse of cement are studied.*

**INFLUENCE DE LA POROSITÉ  
DES GRANULATS SUR LES PROPRIÉTÉS  
DE DURABILITÉ DES BÉTONS.  
INVESTIGATIONS MENÉES DANS  
LE CADRE DE LA CONSTRUCTION  
DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL  
SUR L'ÎLE DE LA RÉUNION**

***INFLUENCE OF AGGREGATES POROSITY  
ON CONCRETE OVERALL DURABILITY.  
OUTCOMES OF INVESTIGATIONS CARRIED  
OUT FOR THE NEW COASTAL ROAD ON  
LA REUNION ISLAND MAJOR PROJECT***

---

**Lionel LINGER<sup>(1)</sup>, Pierre Edouard DENIS<sup>(1)</sup>,  
Myriam CARCASSES<sup>(2)</sup>, Franck CASSAGNABERE<sup>(2)</sup>, François CUSSIGH<sup>(3)</sup>  
Jonathan MAI-NHU<sup>(4)</sup>, Patrick ROUGEAU<sup>(4)</sup>**

<sup>(1)</sup>VINCI Construction Grands Projets, Rueil, France

<sup>(2)</sup>LMDC, Toulouse, France

<sup>(3)</sup>VINCI Construction France, Nanterre, France

<sup>(4)</sup>CERIB, Epernon, France

---

# 1. INTRODUCTION

Sur l'île de La Réunion, la RN 1 entre Saint Denis et La Possession dite Route du Littoral est soumise à de forts aléas naturels, géologiques et maritimes, des chutes de pierres et des grands éboulements malgré les opérations de sécurisation en falaise. Une Nouvelle Route du Littoral est en construction, plus éloignée de la falaise et redimensionnée pour résister à des houles cycloniques centennales (maitre d'ouvrage : Région Réunion ; Maitre d'œuvre : Egis). Longue d'environ 12 km, la Nouvelle Route du Littoral est notamment composée du plus long viaduc en mer de France (5,4 km) et de quatre tronçons de digues (3,6 km) dont la hauteur atteint une vingtaine de mètres. Ces digues sont protégées par 39 000 accropodes. Le volume total de béton nécessaire à la construction des digues est de l'ordre de 550 000 m<sup>3</sup>.

Concernant le viaduc, la solution technique retenue par le Groupement de Constructeurs consiste à réaliser 95% de l'ouvrage à l'aide d'éléments préfabriqués (≈330 000 m<sup>3</sup> de béton), pour la plupart acheminés par voie maritime.

La pénétration des ions chlorure est un des principaux phénomènes responsable de la corrosion des armatures et de la dégradation des structures en béton armé. L'action des ions

chlorure est particulière à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton, comme les ouvrages situés en site maritime. En présence de chlorures, la dépassivation des aciers est initiée lorsque le front de pénétration des chlorures a traversé le béton d'enrobage et atteint le premier lit d'armatures en quantité suffisante pour détruire la couche passive protectrice qui se forme naturellement sur l'acier dans un béton sain. Lorsque l'armature est dépassivée, la corrosion peut s'initier et se propager en présence d'eau et d'oxygène.

Pour les projets de grande envergure, tel que la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion, les spécifications des bétons reposent de plus en plus sur le fait que les bétons doivent être dimensionnés pour satisfaire les exigences de durée de vie exigées dans le cahier des charges, et non uniquement sur des exigences basées sur des résistances mécaniques. La norme NF EN 206/CN autorise l'utilisation d'une approche performantielle de la durabilité pour la formulation de béton durable même si le déploiement de l'approche nécessite d'être davantage détaillé. En France, le fascicule 65 propose une méthodologie pour utiliser l'approche performantielle basée sur des essais de performance ou des indicateurs de durabilité associés à des valeurs seuils en fonction de la classe d'exposition considérée.



**Figure 1a : Vue aérienne Préfa Appuis**  
(Crédits photos : Viaduc Littoral / Sébastien Marchal)



**Figure 1b : Vue aérienne Préfa Voussoirs**  
(Crédits photos : Viaduc Littoral / Sébastien Marchal)



**Figure 1c : Méga-barge « Zourite » utilisée pour l'installation des piles de pont** (Crédits photos : Viaduc Littoral / Sébastien Marchal)



**Tableau 1 : Spécifications requises initialement pour les bétons de la NRL**

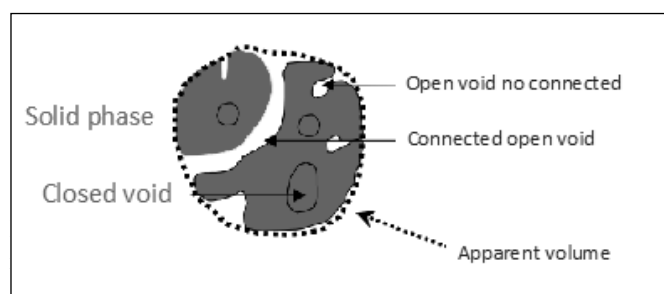
	<b>Porosité accessible à l'eau (%)</b>	<b>Coefficient de diffusion apparent des ions chlorure (<math>\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}</math>)</b>	<b>Perméabilité au gaz (<math>\times 10^{-18} \text{ m}^2</math>)</b>	<b>Perméabilité à l'eau liquide (<math>\times 10^{-18} \text{ m}^2</math>)</b>
Zones immergées en permanence	$\leq 12$	$\leq 5$	N.A	N.A
Zones de marnage	$\leq 10$	$\leq 2$	$\leq 100$	$\leq 0.05$
Zones soumises aux éclaboussures	$\leq 10$	$\leq 2$	$\leq 100$	$\leq 0.05$
Zones exposées aux sels marins	$\leq 11$	$\leq 3$	$\leq 100$	$\leq 0.05$

Les spécifications requises initialement pour les bétons de la NRL étaient dérivées du guide [AFGC, 2014] et sont synthétisées dans le tableau 1. Ces spécifications ont été revues suite à des études expérimentales et de modélisation approfondies concernant la durabilité des bétons réalisés avec les granulats disponibles sur l'île de La Réunion [Mai-Nhu *et al.*, 2015, Linger *et al.*, 2017].

Dès les premières fabrications et même pendant la phase de réponse à l'appel d'offres, la problématique de la qualité intrinsèque des granulats a été abordée. L'utilisation de ces granulats n'est pas compatible avec les exigences de porosité accessible à l'eau à respecter sur béton durci. D'un autre côté, il était inenvisageable de considérer l'option qui consiste à importer plus d'un million de tonnes de granulats. Un des enjeux majeurs de ce projet repose donc sur l'utilisation des granulats localement disponibles, présentant une porosité vacuolaire importante, pour dimensionner des bétons durables (de rapport  $E_{\text{eff}}/C < 0,45$ ) et dont les performances à longs termes sont compatibles avec les exigences de durée d'utilisation du projet dans des conditions environnementales sévères en termes d'humidité relative et de température.

## 2. POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU ET PROTOCOLES D'ESSAIS ASSOCIÉS

La porosité du béton est définie par le rapport entre le volume des vides et le volume apparent du matériau : on parle alors de porosité totale. On peut également distinguer les vides en fonction de leur accessibilité. On définit alors une porosité accessible ou non : la porosité totale est donc la somme de la porosité accessible (ou ouverte) et de la porosité non accessible, ou fermée (figure 2). La porosité ouverte intrinsèque



**Figure 2 : Schématisation du réseau poreux (2D)**

des granulats et l'absorption d'eau sont des grandeurs qui sont liées et qui appréhendent les mêmes caractéristiques.

La mesure décrite dans la norme NF P 18-459 consiste à saturer l'échantillon en le disposant dans un dessiccateur et à faire le vide (typiquement  $\leq 25$  mbars). Ce vide est maintenu pendant 4 heures. On introduit alors progressivement l'eau jusqu'à recouvrir l'échantillon d'environ 20 mm d'eau. Le vide est alors maintenu pendant 44 heures supplémentaires. On peut alors déconnecter la pompe et sortir l'échantillon du dessiccateur.

On détermine la masse de l'échantillon dans l'eau en le déposant dans une nacelle immergée elle-même suspendue à une balance : on obtient  $M_{\text{eau}}$ .

On pèse ensuite dans l'air ce même échantillon saturé en eau après l'avoir essuyé à l'aide d'un linge humide pour le débarrasser du film superficiel d'eau sans retirer l'eau des pores : on obtient  $M_{\text{air}}$ .

On mesure enfin la masse sèche de l'échantillon qui a été séché à l'étuve à  $(105 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  jusqu'à masse constante, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives séparées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0,05 % : on obtient  $M_{\text{sec}}$ .

La porosité accessible à l'eau est calculée à partir de l'équation suivante :

$$p = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \cdot 100$$

L'obtention de la masse sèche constante peut conduire à un séchage très long en étuve dans le cas des bétons très compacts et réalisés à base de granulats poreux. Ce temps de séchage à  $(105 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  peut augmenter le risque de développement de microfissuration. Les mêmes observations peuvent être réalisées dans le cas de l'essai de perméabilité au gaz. En effet la stabilisation de la perte de masse lors du séchage à  $(105 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  est difficile à obtenir pour les bétons fabriqués sur l'île de La Réunion comparativement aux bétons réalisés avec des granulats plus traditionnels disponibles en métropole. Cela conduit à augmenter fortement la dispersion des résultats d'essais. Dans certains cas, et pour l'ensemble des laboratoires participants aux étapes de qualification et de suivi de production, il arrive que le résultat d'essai mesuré à 90 jours soit supérieur à celui obtenu à 28 jours ce qui ne paraît pas réaliste. Ces résultats aberrants sont probablement dus à la phase de séchage trop longue qui conduit au développement de microfissures dans la matrice cimentaire.

### 3. INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES DES GRANULATS SUR LES PRINCIPAUX INDICATEURS DE DURABILITÉ

#### 3.1. Sur la porosité accessible à l'eau

La plupart des granulats naturels utilisés dans la formulation des bétons présente des porosités faibles et sont donc considérés à juste titre comme des inclusions imperméables au sein du matériau. Ils ne participent donc pas ou très peu à la porosité du béton et a fortiori aux transferts. En revanche lorsqu'on utilise des granulats qui présentent des porosités importantes, comme ceux utilisés sur l'île de La Réunion (coefficient d'absorption d'eau supérieur à 2 %) ou des granulats recyclés ( $WA_{24} > 5 \%$ ), la porosité apparente du béton augmente de manière non négligeable. Même si la porosité des granulats est estimée à partir du coefficient d'absorption d'eau, ce paramètre n'est pas représentatif de la porosité totale interconnectée car ce coefficient est mesuré expérimentalement à 24 heures.

De nombreux résultats issus de la littérature ont mis en évidence que la porosité des granulats a une influence importante sur la porosité des bétons. Dans les études [Cassagnabère, 2013, Nguyen, 2013, 2014], les résultats montrent que l'utilisation de granulats recyclés ( $WA_{24} > 5 \%$  pour les gravillons recyclés et  $WA_{24} > 8 \%$  pour le sable) présentant une porosité intrinsèque plus élevée que celle des granulats traditionnels ( $WA_{24} < 1 \%$ ) augmente la porosité du béton (Table 2).

Les granulats ne peuvent pas être considérés comme des inclusions solides sans vide : leur porosité intrinsèque impacte celle des bétons et cela quel que soit le type de granulats considérés.

Prendre en compte la porosité de ces granulats est primordiale lorsqu'on cherche à estimer la porosité des bétons.

En première approximation, il est possible d'estimer la porosité de la pâte cimentaire en fonction du rapport  $E_{eff}/C$  selon le modèle de Powers [Powers, 1958, Taylor, 2004].

$$P_{pâte} = \frac{\frac{E_{eff}}{C}}{\frac{E_{eff}}{C} + 0,32} - 0,53 \cdot \alpha \left( 1 - \frac{\frac{E_{eff}}{C}}{\frac{E_{eff}}{C} + 0,32} \right)$$

Où  $\alpha$  représente le degré d'hydratation théorique maximal calculé par la formule de Waller [Waller, 1999].

Cette relation permet d'aboutir par exemple à une porosité de la pâte cimentaire de l'ordre de 39 % pour un béton dont le rapport  $E_{eff}/C$  est égal à 0,42.

La porosité apportée par les granulats pourrait être estimée à partir des valeurs de coefficient d'absorption d'eau et de leur masse volumique. En considérant une masse volumique de l'ordre de 2 700 kg/m<sup>3</sup> et un coefficient d'absorption d'eau mesuré à 24 h de l'ordre de 2,5 %, la porosité des granulats peut être évaluée à environ 6,8 %. En considérant le béton comme étant constitué d'un volume de pâte de l'ordre de 30 % et d'une fraction volumique des granulats de l'ordre de 70 %, la porosité globale du matériau peut être évaluée à environ 16,5 %.

Considérons le même béton mais réalisé à partir de granulats « traditionnels » utilisés en métropole présentant un coefficient d'absorption d'eau de l'ordre de 1 % et de masse volumique moyenne de 2 700 kg/m<sup>3</sup>. La porosité des granulats peut être évaluée à environ 2,7 %. En considérant les mêmes volumes de pâte (30 %) et de granulats (70 %), la porosité globale du matériau peut être évaluée à environ 13,7 %, soit presque 3 % de moins en valeur absolue.

Tableau 2 : Porosité accessible à l'eau mesurée sur des bétons recyclés

Taux de substitution	Dimensions des granulats (mm)	Absorption d'eau (%)	R <sub>c</sub> (MPa)	Porosité accessible à l'eau (%)
<b>[Nguyen, 2013]</b>				
0 % (Ref)	0/10		41,2	12,3 ± 0,2
10 % de granulats secs	0/8		38,1	14,5 ± 0,8
10 % granulats imbibés	0/8		43,2	15,0 ± 0,3
<b>[Nguyen, 2014]</b>				
0 % (Ref)	0/ 4 & 4/10		66,7	15,6 ± 0,4
10 % (65 % GR + 35 % SR)	0/4 & 4/10		64,6	15,9 ± 0,1
<b>[Cassagnabère, 2013]</b>				
0 % (Ref)	0/4	0,2 %	61,6	17,2 ± 0,4
5 %	0/4	8,5 %	58,1	17,5 ± 0,3
10 %	0/4	8,5 %	56,9	17,6 ± 0,5
15 %	0/4	8,5 %	56,2	18,1 ± 0,3
30 %	0/4	8,5 %	54,4	19,5 ± 0,2

GR : Gravillon recyclé, SR : Sable recyclé

Ce modèle simplifié a été testé avec succès dans le cadre du projet national Recybéton pour estimer la porosité des bétons confectionnés avec des granulats recyclés présentant des valeurs de porosité importantes. La comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations montre que ce modèle fonctionne aussi bien pour les bétons traditionnels que pour les bétons recyclés.

Appliqué aux bétons de la NRL, ce modèle démontre qu'il n'est pas possible d'envisager une porosité accessible à l'eau de l'ordre de 13 % lorsqu'on introduit des granulats naturels disponibles sur l'île de La Réunion, même en considérant un faible rapport  $E_{eff}/C$ .

### 3.2. Sur les autres indicateurs

A l'échelle des mortiers [Cassagnabère, 2013], à l'échelle d'un béton de prédalle [Nguyen, 2014], à l'échelle d'un béton de structure [Nguyen, 2013], ces trois études ont montré que malgré l'augmentation de la porosité du matériau engendrée par une croissance de la porosité de la phase granulaire, les propriétés de transfert traditionnellement associées à la durabilité ne semblent pas affectées.

Le rôle des granulats poreux sur le coefficient de diffusion des ions chlorure peut être mis en évidence en étudiant l'évolution du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction de l'eau absorbée par les granulats (figure 3). On voit apparaître très distinctement deux familles de bétons : l'une correspondant à une faible absorption d'eau des granulats (environ  $20 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ ) et l'autre pour une gamme plus élevée d'absorption des granulats qui correspond à une forte porosité (environ  $40 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ ). Dans les deux cas, on observe une variation importante du coefficient de diffusion à quantité d'eau égale. Cela montre bien que l'on peut obtenir des bétons performants et résistants vis-à-vis de la diffusion des espèces agressives pour les deux familles de granulats considérées à savoir « classique » et « très poreux ». Outre évidemment la nature du liant et le rapport « Eau efficace / Liant », la géométrie et la répartition spatiale de la porosité jouent très certainement un rôle dans les transferts.

Lorsqu'on s'intéresse à l'évolution de la perméabilité en fonction de l'eau absorbée par les granulats, on retrouve la même répartition en deux familles que pour le coefficient

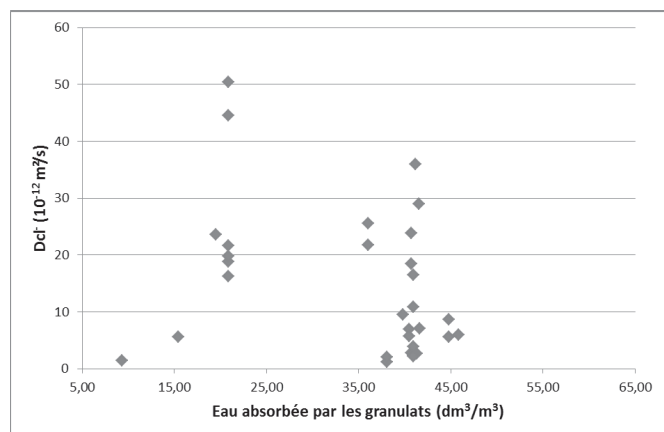


Figure 3 : Evolution du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure en fonction de l'eau absorbée par les granulats

de diffusion (figure 4). Cependant, pour la première famille la perméabilité varie peu alors que dans le second cas, on observe une large gamme de perméabilité. Ces résultats montrent là aussi que l'on peut obtenir des bétons performants (dans une gamme de  $100$  à  $200 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ) du point de vue du transfert malgré une porosité importante liée aux granulats, mais que la perméabilité au gaz d'un béton formulé avec des granulats présentant une forte absorption restera globalement supérieure à celle d'un béton utilisant des granulats peu poreux.

## 4. LIENS ENTRE LA POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU ET LES AUTRES INDICATEURS DE DURABILITÉ

### 4.1. Coefficient de diffusion des ions chlorure

De nombreuses études dans la littérature, dont [Chlortest, 2006], ont montré que le coefficient de diffusion des ions chlorure peut évoluer pour des bétons présentant pourtant des porosités accessibles à l'eau identiques. Dans la plupart des cas, la nature du liant est le paramètre qui influe le plus sur le coefficient de diffusion des ions chlorure.

Quelques résultats de [Chlortest, 2006] sont présentés sur la figure 5. On constate que les deux familles de liants conduisent à des comportements différents : à même porosité, les bétons à base de ciment composé présentent des coefficients de diffusion significativement plus faibles que ceux des bétons à base de CEM I. De même, l'observation des pentes des courbes montrent qu'une faible variation de la porosité d'un béton formulé avec un CEM I conduit à une relative forte variation du coefficient de diffusion (x2 lorsque la porosité passe de 11 à 13 %) tandis que ce dernier montre la même augmentation relative pour une gamme de porosité s'étalant de 12 à 16 %. En effet, comme on l'a vu précédemment l'utilisation d'additions de type pouzzolaniques ou laitiers conduit à raffiner la porosité de la pâte de ciment hydratée, ralentissant le transfert des ions chlorure.

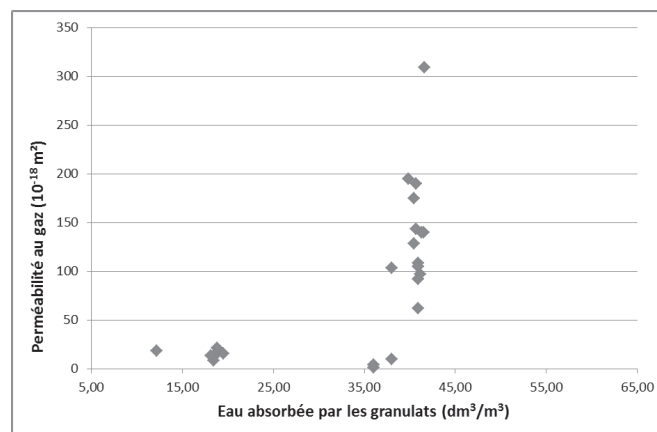


Figure 4 : Evolution de la perméabilité au gaz en fonction de l'eau absorbée par les granulats

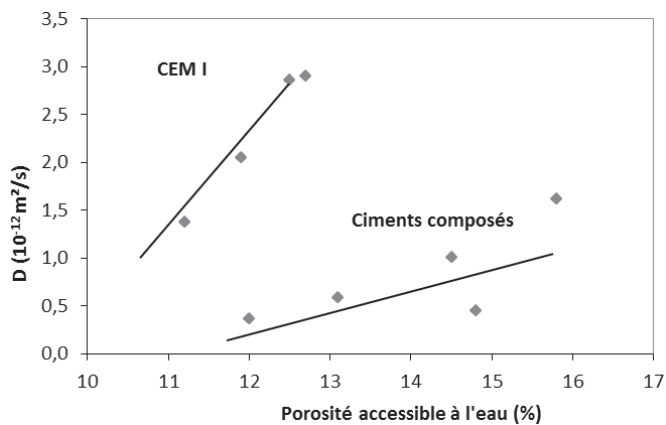


Figure 5 : Evolution du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction de la porosité accessible à l'eau [Chloritest, 2006]

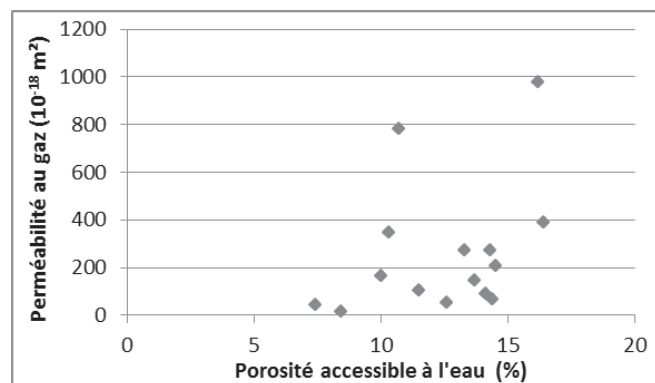


Figure 6 : Evolution de la perméabilité au gaz en fonction de la porosité accessible à l'eau [BHP2000, 2003]

#### 4.2. Perméabilité au gaz

Comme pour la diffusion, il n'est pas toujours évident de corréler la perméabilité à l'air des bétons à leur porosité accessible à l'eau. De nombreux résultats issus de la littérature [Abbas, 1998, BHP2000, 2003] ont montré que la perméabilité dépend plus de la part de porosité connectée et communicante que de l'ensemble de la porosité accessible à l'eau d'un béton (figure 6).

#### 5. IMPACT DE LA SATURATION EN EAU DES GRANULATS SUR L'ENSEMBLE DES PERFORMANCES DES BÉTONS

Il a été constaté pendant la phase d'essais de convenances sur les trois centrales à béton installées par le Groupement de

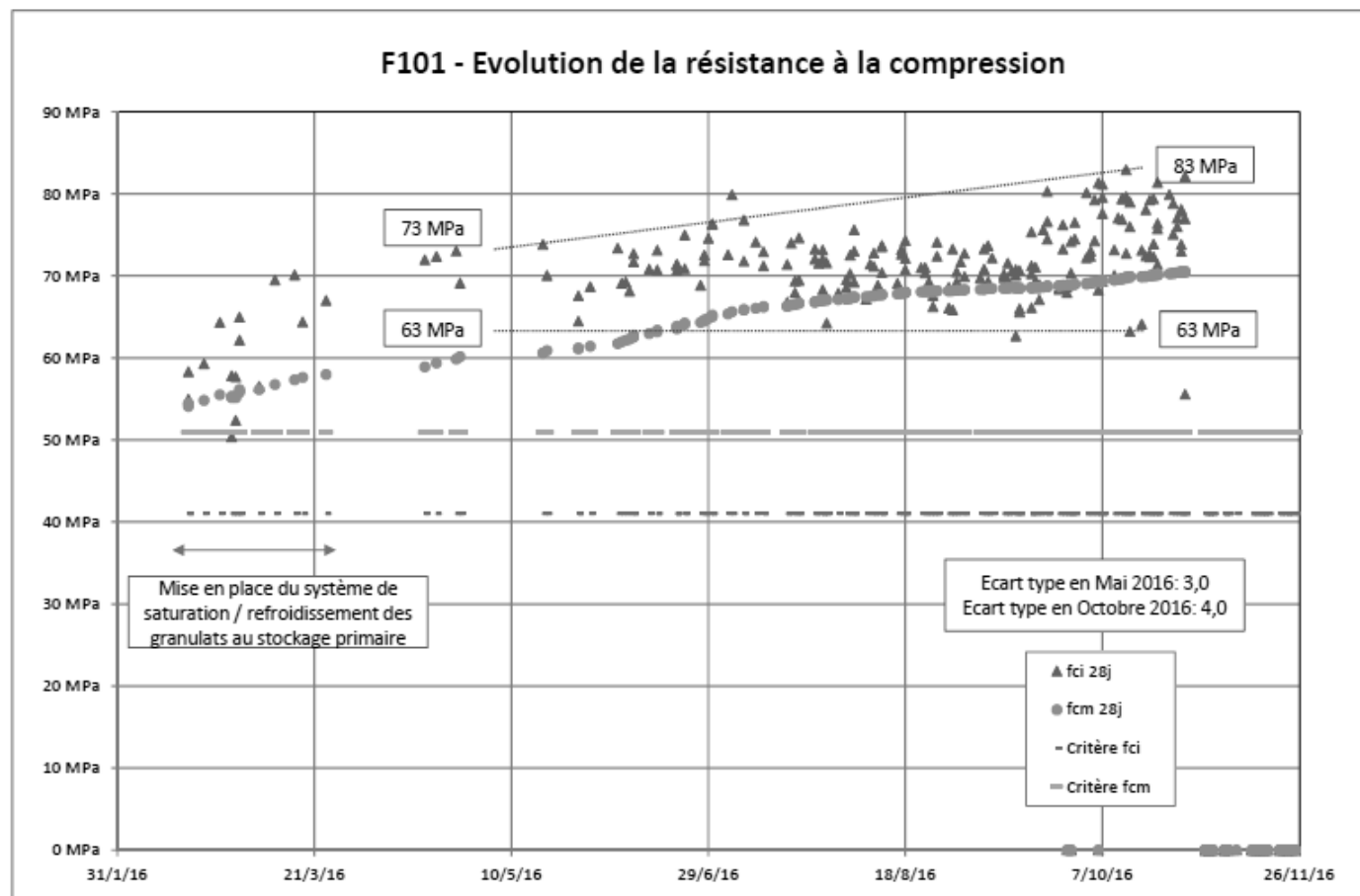


Figure 7 : Evolution de la résistance mécanique à la compression des bétons réalisés pour la NRL

Constructeurs du viaduc que le maintien de rhéologie du béton obtenu en phase d'études en laboratoire n'était pas satisfaisant. Des investigations réalisées tant en laboratoire qu'en centrale à béton, incluant parmi d'autres paramètres le facteur saturation/inbibition des granulats, ont mis en évidence qu'une phase d'inbibition conduisant à une complète saturation des granulats était (comme illustré sur la figure 7) un facteur prépondérant tant sur le maintien d'ouvrabilité du béton frais que sur les performances mécaniques à la compression du béton durci mais influençant moins les tendances mesurées sur les indicateurs de durabilité.

## 6. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

La porosité accessible à l'eau est un indicateur de durabilité utile en première approche et dans le cadre d'un contrôle de la régularité des bétons durant la construction. Il n'apparaît cependant pas pertinent à lui seul pour appréhender correctement les risques de corrosion. Lorsqu'une analyse plus approfondie des risques de corrosion est nécessaire, c'est le cas pour la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de la Réunion, il est plus rigoureux de considérer le coefficient de diffusion des chlorures. Le recours à cet indicateur de durabilité est particulièrement pertinent : d'une part parce qu'il intègre de manière plus globale l'ensemble des caractéristiques du béton, dont sa porosité, et d'autre part parce que les modèles de durabilité les plus complets en vue d'une utilisation opérationnelle sur un projet fonctionnent avec ce paramètre. Certains modèles de durabilité utilisent comme paramètre d'entrée à la fois le coefficient de diffusion des ions chlorure et la porosité. Dans ces modèles, il est possible d'utiliser ces indicateurs globaux en ayant recours à des facteurs correctifs qui prennent en compte la contribution de la porosité apportée par la matrice cimentaire et celle apportée par les granulats. Parmi ces modèles, SDReaM-CRETE, le modèle développé par le CERIB, a déjà été utilisé en ce sens afin d'estimer les performances de bétons réalisés avec des granulats recyclés au regard des risques de carbonatation. Ces modélisations ont été réalisées dans le cadre du projet national Recybéton.

Dans le cas du projet NRL, une étude de sensibilité comparative a été réalisée en considérant deux modèles de durabilité : le modèle code de la *fib* et SDReaM-CRETE. Cette étude de sensibilité a permis de dégager des pistes d'optimisation du couple « béton/enrobage » au regard des durées de vie visées et des conditions environnementales.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- [AFGC, 2007] CONCRETE DESIGN FOR A GIVEN STRUCTURE SERVICE LIFE - Durability management with regard to reinforcement corrosion and alkali-silica reaction - State of the art and Guide for the implementation of a predictive performance approach based upon durability indicators, AFGC, 20007.
- [Abbas, 1998] Abbas A, Influence de l'état de saturation du matériau sur la mesure de la perméabilité au gaz et sur la nature des écoulements, doctorat de l'INSA de Toulouse, LMDC, 1998.
- [BHP2000, 2003] Final report National project "BHP2000", 1995-2003.
- [Cassagnabère *et al.*, 2013] Cassagnabère F, Mouret M, Lachemi M, Escadeillas G, Rakotoarimanga A, Bertrand A, Impact du taux de substitution de sable recyclé sur les propriétés d'un mortier étuvé, NOMAD 2012, Toulouse, France.
- [Chlortest, 2006] European Project, "Resistance of concrete to chloride ingress – from laboratory tests to in-field performance", 2003-2006.
- [Linger *et al.*, 2017] Linger L, Rougeau P, Mai-Nhu J, Torrenti J,M, Outteryck, Denis, Magné, Dupuy Implementation of a global durability approach in close cooperation between Owner/Engineer, Durability Consultants, Designers and Contractor's Joint-venture for the New Coastal Road on Reunion Island (France), fib Maastricht 2017.
- [Mai-Nhu *et al.*, 2015] Mai-Nhu J, Rougeau P, Linger L, Denis, Magné, The New Coastal Road on Reunion Island (France): Application of durability model to a real case, fib Copenhagen 2015.
- [Nguyen, 2014] Nguyen VN, Rapport d'activité sur une étude SEAC, Document interne LMDC, 2014.
- [Nguyen *et al.*, 2013] Nguyen VN, Mouret M, Cassagnabère F, Lachemi M, Bertrand A, Performantial approach of recycled aggregate incorporation in steam-cured SCC design for precast use, NOCMAT 2013, Brazil.
- [Powers, 1958] TC, Powers, Structure and physical properties of hardened Portland cement paste, Journal of American Ceramic Society 41-1, pp1-6, 1958.
- [Taylor, 2004] Taylor HFW, Cement chemistry, Thomas Telford Edition, 2004, Aberdeen, Scotland.
- [Waller, 1999] Waller V, Relations entre la composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.

# **REVÊTEMENTS MODULAIRES EN BÉTON POUR L'INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES : RÉFÉRENTIEL TECHNIQUE, PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES ET PERSPECTIVES EN MATIÈRE DE MAQUETTE NUMÉRIQUE**

## **CONCRETE BLOCK PAVEMENTS FOR SURFACE WATER INFILTRATION: TECHNICAL SPECIFICATIONS, ENVIRONMENTAL PERFORMANCES AND BIM-ORIENTED PROSPECTIVE**



**Jennifer FALEYEUX, Sophie JACOB, Félicien THIOU**

: Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton, 1, rue des Longs Réages,  
CS10010, 28233 Epernon Cedex, France

Contact : j.faleyieux@cerib.com

### **1. INTRODUCTION**

Les eaux pluviales sont un élément majeur à maîtriser dans la planification et l'aménagement des territoires, de par les enjeux de limitation des risques d'inondation, de préservation des ressources en eau et des milieux naturels, et d'aménagement des espaces.

Dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/EC) [8], des orientations de gestion équilibrée et durable de la ressource en eau, ainsi que des objectifs de qualité et de quantité des eaux sont définis sur les grands bassins hydrographiques. Les collectivités, poussées par la loi ALUR (loi pour l'Accès au Logement et un Urbanisme Rénové)[9], définissent dans leurs plans locaux d'urbanisme des zonages pluviaux, accom-

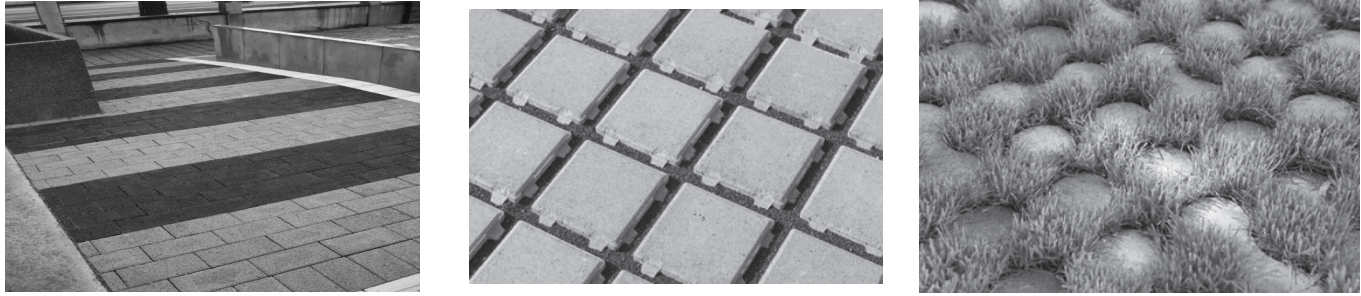


Figure 1 – Pavés en béton poreux, pavés à joints larges, dalles drainantes

pagés de prescriptions de limitation de l'imperméabilisation et du ruissellement.

Ainsi il est de plus en plus fait usage de revêtements perméables, qui permettent une gestion intégrée des eaux pluviales à la parcelle, au plus proche de leur point de chute. Les revêtements perméables infiltrent à la fois les eaux qui tombent directement sur la surface des produits, mais aussi, selon leur capacité d'infiltration et la conception globale de l'aménagement, les eaux de ruissellement des surfaces imperméables proches.

La présente communication fait le point sur les caractéristiques des produits modulaires en béton permettant de répondre à ces problématiques.

## 2. RÉFÉRENTIEL TECHNIQUE

Les normes européennes existantes (NF EN 1338 [3] pour les pavés en béton et NF EN 1339 [4] pour les dalles en béton) ne couvrent pas complètement les revêtements perméables. Des pays comme la Belgique ou l'Allemagne disposent déjà de normes et de recommandations sur ces produits drainants en béton, mais il n'existe pas en France de recommandations similaires.

Le CERIB, Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, a donc défini les exigences techniques applicables en France sur les familles de produits en béton les plus répandues, à savoir les pavés et dalles en béton poreux, les pavés à joints larges, et les dalles drainantes (voir Figure 1).

Ces exigences (caractéristiques géométriques, résistance à l'abrasion, résistance mécanique, perméabilité...) visent à assurer un degré de performance suffisant.

Dans le cadre de ces travaux, le CERIB a par ailleurs défini un protocole de mesure de la perméabilité applicable à tous les produits, ainsi qu'une méthode de dimensionnement mécanique des dalles drainantes.

L'ensemble de ces points fait l'objet d'un référentiel technique professionnel français, librement disponible sur le site du CERIB [1].

### 2.1. Perméabilité

Le coefficient de perméabilité d'un revêtement constitue un élément de dimensionnement nécessaire pour les concepteurs d'ouvrages d'infiltration.

L'essai de perméabilité développé par le CERIB [1] permet de mesurer le coefficient de perméabilité de l'ensemble « produits et matériaux de jointoiment ou de remplissage des vides ». Il ne prend pas en compte l'influence du lit de pose et des couches de fondations.

Cet essai est réalisé sur une surface représentative de revêtement de un mètre carré plutôt que sur produit isolé. Cela permet :

- de s'affranchir d'une éventuelle dispersion entre produits ;
- de prendre en compte la contribution des joints, afin d'être représentatif des conditions de service ;
- d'assurer une infiltration verticale, ce qui ne pourrait pas être réalisé avec un essai à échelle réduite d'un tube à essai placé sur un produit seulement.

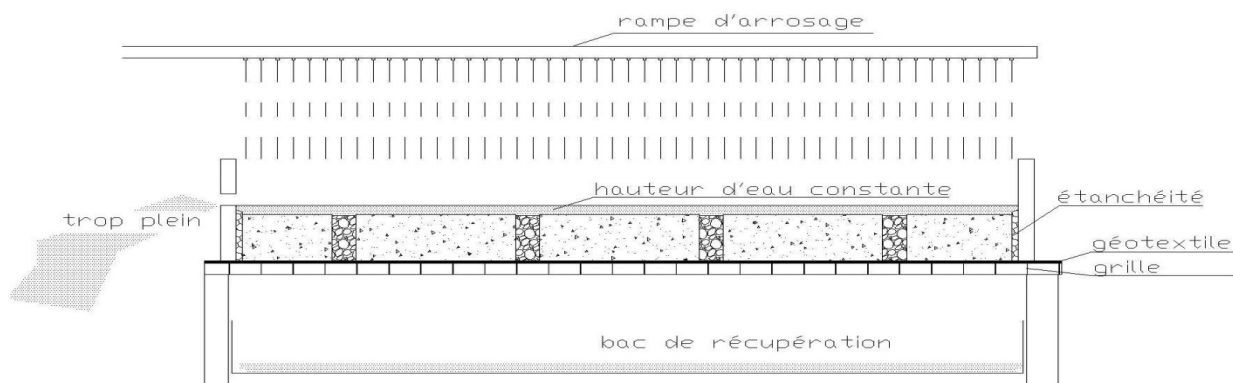


Figure 2 – Schéma du dispositif d'essai de perméabilité

Sur une surface de 1 m<sup>2</sup> de revêtement perméable constitué des produits en béton et de leur matériau de jointoiement ou de remplissage des vides, sous une charge constante de 1 cm d'eau, l'essai consiste à mesurer la quantité d'eau qui s'infiltré en un temps donné. Le schéma de principe est présenté en Figure 2.

Le coefficient de perméabilité verticale K (ou conductivité hydraulique) est calculé avec la formule :

$$K = \frac{m}{\rho S t} \frac{h}{h+h_w} \text{ [m/s]}$$

Avec :

- $m$  : masse d'eau =  $m(\text{bac} + \text{eau}) - m(\text{bac vide})$  [kg]
- $\rho$  : masse volumique de l'eau [kg/m<sup>3</sup>] :  $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$
- $S$  : surface d'essai [m<sup>2</sup>]
- $t$  : durée totale de l'essai [s]
- $h$  : hauteur d'infiltration (épaisseur du produit) [m]
- $h_w$  : hauteur d'eau (constante réglée par la hauteur du trop-plein) [m]

Il est ensuite possible de déterminer son adéquation avec le coefficient de perméabilité requis pour le revêtement de l'ouvrage d'infiltration en fonction :

- de la pluie type à infiltrer définie par le maître d'ouvrage : durée de la pluie, période de retour, coefficients de Montana applicables sur le lieu du projet...
- des caractéristiques du projet : surfaces dont on veut récupérer les eaux pluviales, coefficients de ruissellement...
- d'un coefficient de colmatage ou d'un coefficient de sécurité.

## 2.2. Résistance mécanique

Compte tenu de leur géométrie et de leurs conditions de pose, les dalles drainantes ne peuvent être dimensionnées en suivant

la même approche que pour les dalles pleines couvertes par la norme NF EN 1339 [4]. Les comportements en service de ces deux familles étant différents, l'approche « dalle pleine » appliquée à des dalles drainantes pourrait conduire à des dimensionnements erronés.

Une démarche pour le dimensionnement spécifique aux dalles drainantes, intégrant leurs conditions d'utilisation, a été développée par le CERIB. Elle permet de prendre en compte :

- la nécessaire corrélation entre les résultats d'essais en laboratoire et les performances en conditions de service ;
- la caractérisation des produits eux-mêmes et non du seul matériau béton ;
- la volonté d'appliquer des méthodes d'essais en laboratoire connues pour le suivi de production en usine (essai de flexion trois points défini dans la norme NF EN 1339-Annexe F [4]).

L'essai défini pour valider le domaine d'utilisation des dalles drainantes est réalisé en conditions de service (voir Figure 3), et permet :

- d'être représentatif de conditions réelles de pose des dalles drainantes ;
- de simuler la continuité d'un revêtement dallé et de s'affranchir des éventuels effets de bords ;
- d'appliquer une charge suffisante pour atteindre la rupture d'une dalle drainante.

L'essai est conduit sur une surface d'au moins 1,5 m par 1,5 m. Les produits sont mis en œuvre selon les préconisations de pose du fabricant, ou à défaut de préconisations, selon les recommandations de pose professionnelles, soit pour une circulation de véhicules lourds sur terrain porteur :

- une fondation de 15 cm en tout-venant ;
- un lit de pose en sable d'épaisseur 3 cm ;
- les dalles drainantes remplies d'un mélange terre-sable (dont la proportion volumique courante est de un tiers de sable pour deux tiers de terre végétale).

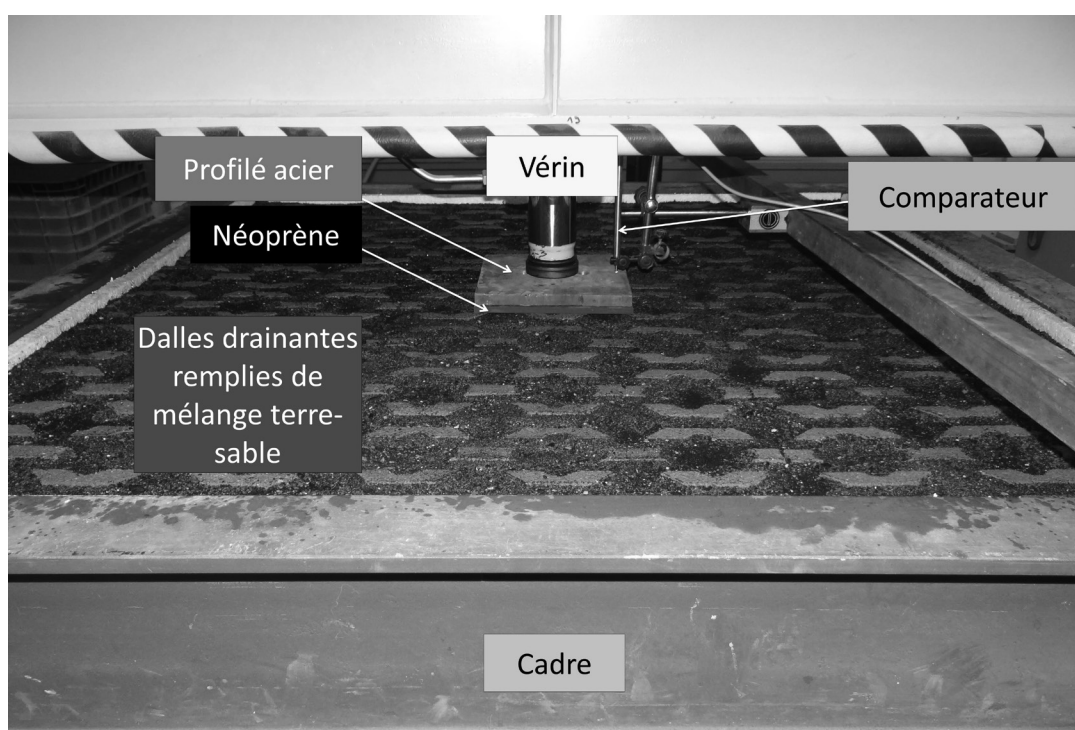


Figure 3 – Schéma du dispositif d'essai en conditions de pose sur dalles drainantes

La charge est appliquée à la position la plus défavorable en service, selon la géométrie de la dalle drainante, sur une taille d’empreinte représentative du domaine d’application visé. La charge est augmentée progressivement jusqu’à la rupture, qui est alors notée  $P_c$ .

La charge équivalente de rupture en service  $P_s$ , qui permet de vérifier la compatibilité de la dalle drainante avec le domaine d’utilisation visé est déterminée comme suit :

$$P_s = \frac{a}{b} * \frac{P_c}{\lambda}$$

Où :

- $P_c$  est la charge de rupture obtenue à l’essai en conditions de pose (kN) ;
- $P_s$  est la charge de rupture équivalente en conditions réelles (kN) ;
- $\lambda$  est le coefficient de majoration dynamique ;
- $a$  et  $b$  sont des coefficients de sécurité prenant en compte le cas de charge le plus défavorable.

Le suivi de production en usine peut ensuite être réalisé selon le protocole d’essai de flexion décrit dans la norme NF EN 1339 [4], en prenant en compte la géométrie spécifique des produits et des sections de rupture observées.

### 3. PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES

La prise en compte de la qualité environnementale des ouvrages, initialement appliquée essentiellement aux bâtiments, est intégrée progressivement aux travaux publics et à l’aménagement urbain.

De nombreuses données sont d’ores et déjà disponibles pour les différents produits en béton pour l’aménagement urbain : En effet, ont été établies des FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire) collectives, représentatives de la production française des différents produits.

- FDES Pavé de Voirie en béton (CERIB, 2011) [5] ;
- FDES Dalle de Voirie en béton (CERIB, 2011) [6] ;
- FDES Bordure et Caniveau en béton (CERIB, 2010) [7].

Ces FDES servent de base à une certification complémentaire à la marque NF.

Pour compléter ces données, l’Industrie du Béton a évalué les impacts environnementaux des solutions modulaires en béton permettant l’infiltration des eaux de ruissellement, sur l’ensemble de leur cycle de vie, selon les indicateurs de la norme NF EN 15804+A1 et de son complément national NF EN 15804/CN [10]. Les différentes étapes du cycle de vie considérées sont les suivantes :

- extraction des matières premières ;
- transport ;
- production des éléments préfabriqués ;
- transports des éléments sur le site ;
- mise en œuvre ;
- vie en œuvre (entretien éventuel et ouvertures) ;
- fin de vie.

L’unité fonctionnelle choisie est « Assurer la circulation d’un trafic caractéristique du milieu urbain en France sur un mètre carré, pendant une durée de service de 30 ans ». Les produits sont destinés à des circulation réduites, type trafic T5 (II) (très faible : 2 à 10 PL/jour/sens) ou T5 (faible : 5 à 25 PL/jour/sens), ou trottoirs, posés sur assise en grave non traitée (GNT) et lit de pose en sable. Les résultats sont affichés uniquement pour la couche de roulement.

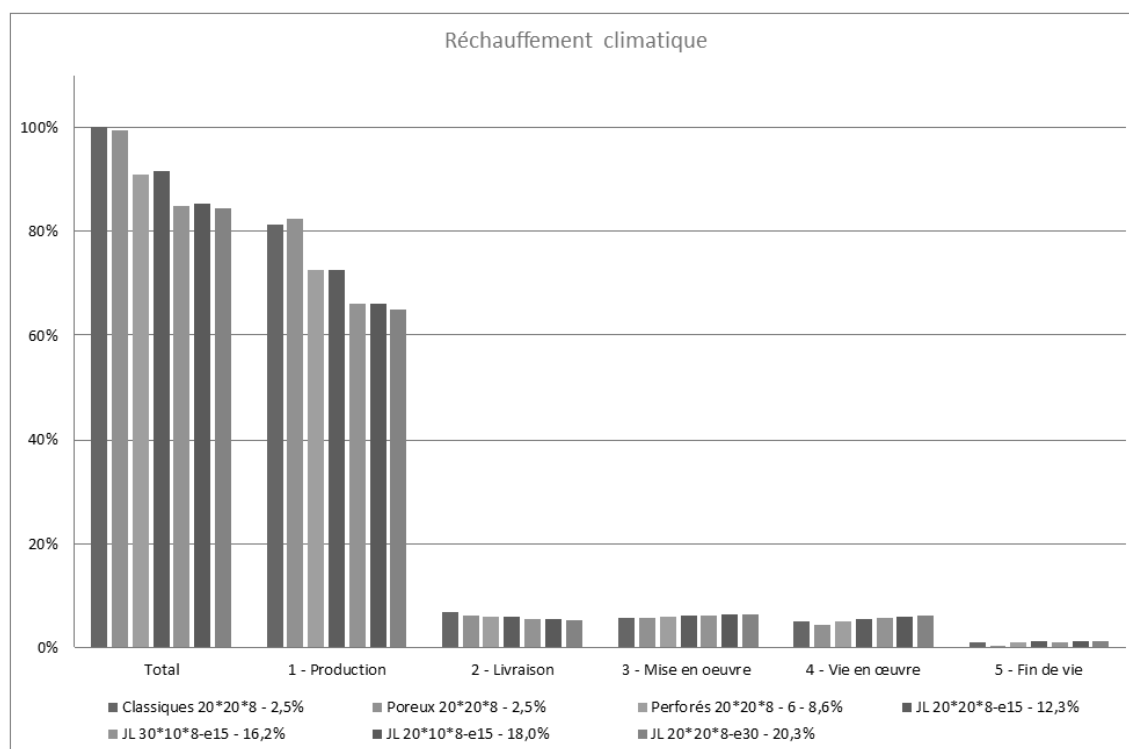
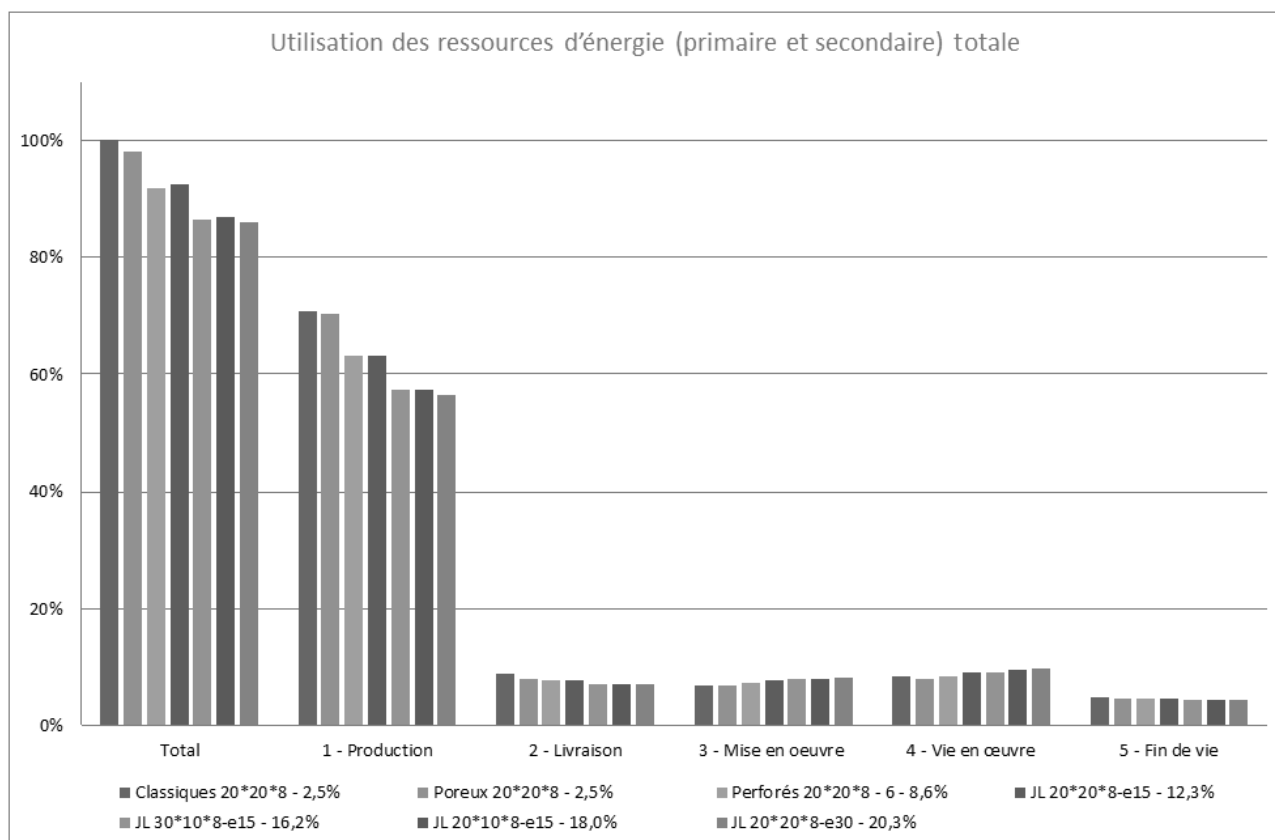


Figure 4 – Comparatif des performances environnementales des produits pour l’infiltration des eaux pluviales – indicateur « réchauffement climatique »



**Figure 5 – Comparatif des performances environnementales des produits pour l’infiltration des eaux pluviales – indicateur « Utilisation des ressources d’énergie primaire et secondaire totale »**

Les résultats ci-après sont obtenus sur différents revêtements pour l’infiltration des eaux pluviales :

- pavés poreux en béton ;
- pavés perforés en béton ;
- pavés à joints larges en béton : joints de largeur 15 mm et 30 mm.

Ils sont comparés aux résultats obtenus sur pavés classiques.

Les histogrammes en Figures 4 et 5 présentent les résultats pour deux indicateurs d’impact : le réchauffement climatique et la consommation d’énergie primaire et secondaire totale.

Les revêtements sont classés en fonction de leurs dimensions longueur totale\*largeur totale\*épaisseur (L\*I\*t) en centimètres, de la largeur de leurs écarteurs éventuels (e) et de leur pourcentage de vides calculé, pour les pavés classiques, poreux, à joints larges (JL) ou perforés.

Note : les impacts calculés sont « normés » à ceux des pavés classiques.

Les ordres de grandeur des impacts environnementaux des pavés perforés et à joints larges sont donnés en fonction du pourcentage de vides créé par les joints.

Pour les indicateurs considérés dans cette étude, les valeurs de la FDES « Pavés de Voirie en Béton » [5] peuvent être utilisées pour estimer l’impact environnemental des pavés poreux, puisque les pavés poreux et classiques présentent des impacts environnementaux comparables.

Cette évaluation permet de répondre aux attentes des donneurs d’ordre intégrant le développement durable dans leurs critères de décision.

#### 4. PERSPECTIVES EN MATIÈRE DE MAQUETTE NUMÉRIQUE

L’ensemble de ces travaux constitue également une étape dans les travaux engagés par la profession en termes de maquette numérique et de construction des bases de données qui seront utilisées dans le cadre de la démarche « BIM ».

En effet, une base de données générique des produits en béton est en cours d’élaboration, et les éléments disponibles pour les revêtements perméables vont permettre de travailler à l’élaboration des propriétés et attributs des produits correspondants.

#### 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Devant l’absence de recommandation spécifique sur les produits en béton pour revêtements perméables en France et de dispositions partagées en Europe, les travaux réalisés ont permis de définir les exigences techniques qui pourraient être appliquées en France sur les revêtements perméables en éléments modulaires en béton.

Le référentiel technique spécifique aux produits en béton pour l’infiltration des eaux pluviales contient les caractéristiques fonctionnelles des pavés et dalles en béton qui permettent de réaliser des revêtements perméables à l’eau, et les exigences auxquelles ces produits doivent satisfaire : caractéristiques géométriques, résistance à l’abrasion, résistance mécanique, perméabilité...

Un essai a été développé afin de pouvoir mesurer le coefficient de perméabilité de revêtements perméables Le coefficient de perméabilité de l'ensemble « produits et matériaux de jointoiement ou de remplissage des vides » déterminé par cet essai constitue alors un élément de dimensionnement nécessaire pour les concepteurs d'ouvrages d'infiltration. Le protocole d'essai pourrait être introduit dans un futur référentiel de certification.

Un essai de type initial représentatif des conditions de pose permet également de déterminer le domaine d'utilisation des dalles drainantes.

Les revêtements pour l'infiltration des eaux pluviales réalisés en pavés présentent des impacts environnementaux globalement équivalents à ceux réalisés en pavés classiques ; les données de la FDES Pavé de Voirie en Béton [5] peuvent donc être utilisées dans le cadre de l'évaluation environnementale rapide d'un projet. Ces résultats permettent de répondre aux attentes des donneurs d'ordre intégrant les données environnementales dans leurs critères de décision.

Les aménageurs disposent donc de l'ensemble des données sur ces produits, à savoir les données techniques incluses dans le référentiel professionnel français, mais aussi leurs impacts environnementaux.

L'ensemble de ces travaux permettra également d'alimenter les bases de données nécessaires à la maquette numérique.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Rapport 353.E v2  
Éléments modulaires en béton pour revêtement des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales : référentiel technique  
CERIB, Jennifer Faleyieux, Février 2017
- [2] Rapport 402.P  
Impacts environnementaux des revêtements modulaires perméables  
CERIB, Jennifer Faleyieux et Félicien Thiou, Juillet 2017
- [3] NF EN 1338  
Pavés en béton, prescriptions et méthodes d'essai  
AFNOR, Février 2004
- [4] NF EN 1339  
Dalles en béton, prescriptions et méthodes d'essai  
AFNOR, Février 2004
- [5] 104.E v2  
FDES Pavé de voirie en béton (relevant de la norme NF EN 1338) – Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire conforme à la norme NF P 01-010  
CERIB, Octobre 2011
- [6] 247.E  
FDES Dalle de voirie en béton (relevant de la norme NF EN 1339) – Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire conforme à la norme NF P 01-010  
CERIB, Décembre 2011
- [7] 237.E  
FDES Dalle de voirie en béton (relevant de la norme NF EN 1339) – Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire conforme à la norme NF P 01-010  
CERIB, Octobre 2010
- [8] 2000/60/EC  
Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (DCE)
- [9] Loi ALUR  
LOI n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové
- [10] NF EN 15804 + A1 et son complément national NF EN 15804/CN  
Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction  
AFNOR, Avril 2014 et Juin 2016

# ÉVALUATION DES PARAMÈTRES INTERVENANT SUR LE RESSUAGE LORS DE LA MISE EN ŒUVRE DES BÉTONS DE PAROIS MOULÉES. APPLICATION À UN CHANTIER DU GRAND PARIS

## *EVALUATION OF THE PARAMETERS INVOLVED IN PENETRANT TESTING DURING THE APPLICATION OF MOLDED WALL CONCRETE. APPLICATION TO CONSTRUCTION SITE OF THE LARGE PARIS*

**Amin AZZI<sup>(1)(2)</sup>, Yannick VANHOVE<sup>(1)</sup>, Chafika DJELAL<sup>(1)</sup>,  
Olivier MADEC<sup>(2)</sup>, Philippe GOTTELAND<sup>(3)</sup>**

<sup>(1)</sup>Univ. Artois, EA 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE),  
Béthune, F-62400, France

<sup>(2)</sup>Botte Fondations, Zac du Petit Le Roy, 5 rue Ernest Flammarion,  
Chevilly-Larue, 94659 Rungis Cedex

<sup>(3)</sup>Fédération Nationale des Travaux Publics, DRT, Paris, France  
Chafika.dantec@univ-artois.fr

### 1. INTRODUCTION

Les parois moulées sont des éléments de structures souterraines en béton armé utilisées principalement comme fondations profondes pour la réalisation de nombreux ouvrages situés dans des sites et des conditions géotechniques très variés. Cette technique permet de réaliser des ouvrages de forme et de dimensions diverses jusqu'à des profondeurs très impor-

tantes : parking souterrain, mur de quai, parois circulaires pour la réalisation de bassin, enceinte cylindrique, etc... Certaines parois moulées sont de véritables ouvrages d'art.

Ancrées dans une couche résistante étanche, elles sont destinées à reprendre les efforts de poussée dus aux actions du terrain se situant en arrière et de la nappe phréatique.

Les parois moulées sont réalisées sous forme d'éléments unitaires jointifs appelés panneaux. Elles ont une épaisseur qui

varie de 0,5 m à 1,5 m et une hauteur maximale pouvant atteindre 80 m. La technique des parois moulées est le seul procédé de fondation qui permet d'atteindre de telles dimensions en profondeur.

Ces parois sont souvent fortement ferrillées pour pouvoir résister au poids de l'ouvrage construit en surface, à la pression de l'eau de la nappe et à la poussée des sols.

Pour des volumes de bétonnage importants, des retardateurs de prise peuvent être incorporés au béton afin que la prise du béton mis en place n'intervienne pas avant la fin du bétonnage de l'ensemble du panneau.

La réalisation des parois moulées dans le sol implique un certain nombre de contraintes :

- Le béton, de très grande fluidité, doit correspondre en ouvrabilité à la classe S4 (la norme EN NF 206/CN [1] préconise un étalement à la table à choc de  $600 \pm 30$  mm à 20°C) pour pouvoir être coulé dans des zones très ferrillées ou des zones de formes complexes difficilement accessibles,
- La mise en œuvre du béton ne doit pas nécessiter de vibration pour éviter tout mélange avec les terres et la nappe et pour ne pas rompre le fragile équilibre des parois de l'excavation tenues par la boue. Il doit pouvoir se compacter sous son propre poids,
- Etant donné le mode de pose spécifique et la durée du coulage du béton nécessaire à la réalisation des fondations spéciales (plusieurs heures), la consistance du béton doit être conservée durant toute la durée du bétonnage. Un maintien de consistance supérieur à la durée du bétonnage (plus aléa) est recommandé (entre 6 et 8 heures pour les gros volumes de bétonnage).

Les parois moulées doivent satisfaire aux exigences de la norme française NF EN 1538 [2] et à la norme européenne NF EN 206/CN. Pour assurer la durabilité du béton, celui-ci doit disposer d'une teneur minimale en ciment qui est fonction du diamètre  $D_{max}$ . La surface de Blaine du ciment doit être supérieure à 3800 cm<sup>2</sup>/g.

L'utilisation de ciments de type CEM II, CEM III ou un CEM I remplacé partiellement par ajout de ciment de type II car leurs effets bénéfiques sur le béton (amélioration de l'ouvrabilité, réduction de chaleur d'hydratation durant la prise et réduction du taux de ressuage...) sont privilégiés. Un remplacement partiel du ciment CEM I ou CEM II par des additions conformes au NA.5.1.6 (norme EN NF 206/CN) est possible. Le squelette granulaire doit être continu afin de réduire le plus possible la ségrégation. La masse totale des particules fines ( $D \leq 0,125$  mm) dans le mélange du béton (intégrant le ciment et les autres fines) doit être comprise entre 400 et 550 kg/m<sup>3</sup>. Le ressuage du béton doit être limité. En cas de ressuage excessif, des canaux de ressuage (appelés également cheminées de remontée d'eau) peuvent apparaître. Les normes NBN EN 480-4 et la norme américaine ASTM C232 ne donnent aucune valeur de volume d'eau perdu par ressuage statique limite ni d'une vitesse limite de ressuage, mais certaines entreprises adoptent 1% pour le volume d'eau perdue par ressuage statique et une vitesse limite de 0,1 m/minute. Venant compléter ces normes, il existe également des recommandations australiennes pour fondations profondes (Recommended Practice Tremie Concrete for Deep Foundations) [3]. Il y est recommandé que la quantité d'eau ressuée mesurée à l'aide de

l'essai Bauer à 5 minutes sous une pression de 5 bars doit être  $\leq 30$  litres/m<sup>3</sup> pour des parois moulées  $\leq 15$  m et 15 litres/m<sup>3</sup> pour des parois  $> 15$  m.

Enfin, il est important d'essayer de garder le béton en mouvement durant toute la phase de bétonnage. Si l'approvisionnement en béton est retardé, il faut faire durer le plus longtemps possible la vidange de chacune des toupies. Le bétonnage doit être effectué en continuité pour la totalité du panneau.

Bien que toutes ces conditions soient respectées, de nombreuses entreprises rencontrent actuellement de nombreux problèmes liés essentiellement au ressuage. En effet, les observations effectuées après le terrassement et le rabotage des parois montrent que le béton à l'extérieur de la cage d'armatures est de plus mauvaise qualité que celui situé à l'intérieur de la cage. L'importance de cette problématique sur le plan européen a conduit à la création d'un groupe de travail en 2015 (Mirror Group FNTP/EFFC) afin de compléter et d'améliorer les critères existants de recevabilité des bétons de fondations sur chantier.

Ces défauts peuvent être attribués à la mise en œuvre liée à une fluidité insuffisante et non maintenue durant la mise en œuvre, une faible cohésion entre les couches due à une prise trop rapide, un enrobage insuffisant des armatures, à la pollution du béton d'enrobage par de la boue ou au manque de laitance du béton résultant d'une perte de sa maniabilité due à un ressuage survenant lors de sa mise en place. La pression hydrostatique du béton frais dans une paroi moulée peut également contribuer à des défauts de parement en raison de la création de canaux longitudinaux le long de la paroi lorsque le terrain est imperméable. Ces canaux ont tendance à cheminer à l'interface paroi/sol dans le béton frais, ce qui favorise des cheminées d'eau au parement de la paroi (ou veines sableuses, Figure 1). Lors de sa migration, l'eau peut entraîner les fines du béton (délavage du béton) entraînant ainsi une ségrégation du squelette granulaire. Dans certains cas, des veines de sable peuvent être présentes. Ces facteurs peuvent affecter la qualité des parois tant au point de vue esthétique que mécanique.



Figure 1. Cheminées de remontées d'eau

Dans la mesure où ces parois remplissent souvent une fonction définitive avec une durée de vie prévue de 50 ans ou plus, il est essentiel qu'elles ne présentent pas d'imperfections importantes. En effet, il ne s'agit pas uniquement de garantir la durée de vie mais également d'éviter des infiltrations de terre et d'eau de la nappe phréatique pendant et/ou avant l'excavation de la fouille. Les cheminées de remontée d'eau représentent 90% des désordres observés sur les chantiers.

Les normes 1538-2010 NF et NF 206/CN ou le fascicule 65 donnent peu d'informations sur ce problème. Afin de comprendre les phénomènes survenant lors de la mise en œuvre du béton et les origines de cette pathologie, une étude détaillée a été effectuée sur quatre chantiers de réalisation de parois moulées de Botte Fondations durant une période de 18 mois.

Parmi ces chantiers, trois d'entre eux (BF2, BF3, BF4) présentent après terrassement et rabotage, de nombreuses traces dues à des cheminées de remontées d'eau. Aucun défaut n'a été constaté pour le chantier BF1, celui-ci sera considéré comme chantier de référence. Les informations relatives à ces chantiers ont été étudiées (rapport sol, CCTP, conditions de bétonnage, formulations des bétons...). Des essais de caracté-

risations (étalement, air occlus) ont été menés en parallèle du coulage du béton dans les excavations. L'analyse des résultats de ces essais a permis de mettre en place la campagne expérimentale en laboratoire.

## 2. ÉTUDE COMPARATIVE SUR 4 CHANTIERS DE PAROIS MOULÉES

### 2.1. Présentation des chantiers

Les Tableaux 1 et 2 présentent les différents chantiers et leur degré de pathologie. Les pathologies relevées sont uniquement des cheminées de remontées d'eau (Figure 2).

Aucune pathologie n'a été observée pour le chantier BF1. Les trois autres chantiers, présentent après terrassement et rabotage, de nombreuses traces dues à des cheminées de remontées d'eau. BF4 est le chantier qui a présenté le plus de problèmes.

Chantier	Type d'ouvrage	Hauteur de la paroi	Epaisseur de la paroi
BF1	Station d'épuration	17 à 19 m	0,8 m
BF2	Bâtiment (bureaux, restaurants...)	24 à 26 m	0,8 m
BF3	Station de pompage / stockage eaux usées	37 à 38 m	1 m
BF4	Ligne de chemin de fer	18 m	0,8 m

Tableau 1. Caractéristiques des différents chantiers

Chantier	Observations sur la paroi	Profondeur des canaux	Degré de pathologie
BF1	Aucune cheminée de remontée d'eau	Aucune	néant
BF2	Quelques cheminées de remontées d'eau	Moins d'un centimètre	+
BF3	Des cheminées de remontées d'eau	Deux centimètres	+++
BF4	Nombreuses cheminées de remontée d'eau	Trois centimètres	++++

Tableau 2. Degrés de pathologies des parois moulées des chantiers

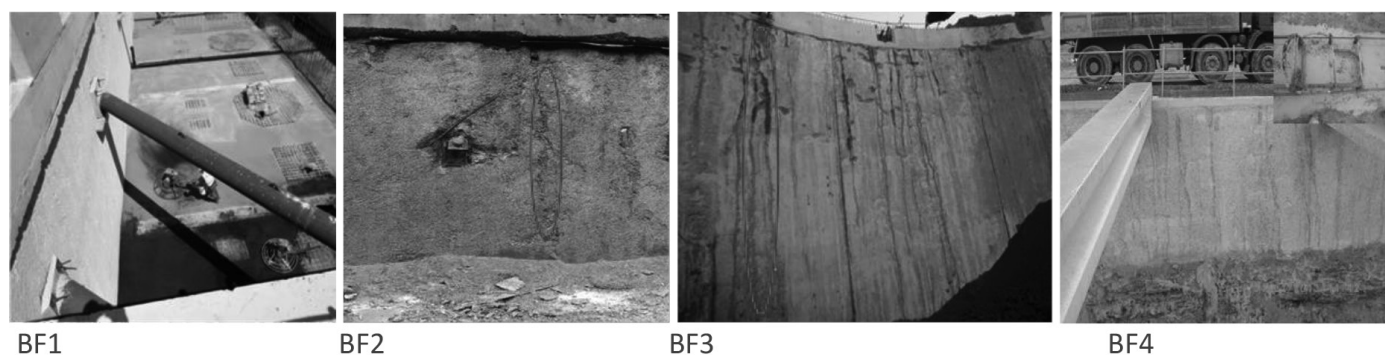


Figure 2. Etat des parois moulées des quatre chantiers après terrassement et rabotage

## 2.2. Formulations et propriétés des bétons

Le Tableau 3 présente les différentes compositions pour 1 m<sup>3</sup> de béton. Le liant exprimé dans ce tableau correspond à l'addition du ciment et des additions (filler, cendres volantes, laitier).

## 2.3. Analyse des paramètres de formulation du béton

L'influence des paramètres de formulation sur les pathologies des parois moulées ainsi que l'interaction entre les différents paramètres ont été analysées. Le tableau 4 regroupe les résultats de cette analyse.

Une étude comparative de tous les paramètres pouvant influencer la stabilité des bétons a été menée. A partir des normes et d'une étude bibliographique sur les bétons, une analyse des paramètres a pu être effectuée :

- La composition des bétons des parois moulées est inspirée de celle des bétons pompables. Le fuseau ACI 304.2R définit un fuseau optimal pour ces bétons. Pour ces chantiers, tous les bétons sont à l'intérieur du fuseau et leurs courbes granulométriques présentent une continuité sauf pour le béton BF3.
- Jossierand [4] a étudié l'influence de la compacité optimale sur la stabilité des bétons. Il a montré que pour une compacité proche de 1, la quantité d'eau ressuée était minimale. Dans

Composition	BF1	BF2	BF3	BF4
Rc 28 (MPa)	52	51	60	46
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	385	385	400	255
Laitier (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	105
Filler calcaire (kg/m <sup>3</sup> )	-	30	-	25
Cendres volantes (kg/m <sup>3</sup> )	25	-	-	-
Sable 0/1 (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	220
Sable 0/4 (kg/m <sup>3</sup> )	820	770	760	660
Gravillon 2/10 (kg/m <sup>3</sup> )	-	350	-	-
Gravillon 6/10 (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	470
Gravillon 4/20 (kg/m <sup>3</sup> )	840	-	-	-
Gravillon 6/20 (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	980	-
Gravillon 11/22 (kg/m <sup>3</sup> )	-	580	-	475
Plastifiant (L)	1,3	-	2	4
Superplastifiant (L)	0,68	3,32	-	2,89
PLASTIRETARD (L)	-	-	-	0,96
Eau efficace (L)	174	190	178	173
Eff/Liant équivalent	0,45	0,49	0,45	0,49
G/S	1,02	1,21	1,29	1,07
Etalement* (mm)	580 ± 40	640 ± 20	650 ± 30	610 ± 40
Température extérieure (°C)	15,4	28,8	29,1	28,3
Température du béton (°C)	14,8	26,7	27,5	27,8
Air occlus (%)	1,6 ± 0,6	1,8 ± 0,3	1,9 ± 0,4	2,1 ± 0,3

\*Etalement à la table à choc

**Tableau 3. Composition et caractéristiques des bétons**

Composition	BF1	BF2	BF3	BF4
Pathologie	Néant	+	+++	++++
Courbe granulométrique	continuité	continuité	discontinuité	continuité
Compacité	0,76	0,70	0,74	0,73
Quantité de fines $\leq 0,125$ mm (kg/m <sup>3</sup> )	446	427	404	400
Type de ciment	CEM III	CEM II	CEM III	CEM II
Quantité Liant (kg/m <sup>3</sup> )	385	385	400	356
Surface de Blaine ciment (cm <sup>2</sup> /g)	4150	3650	4300	3850
Surface spécifique des granulats (m <sup>2</sup> )	4014,2	3748,5	4457,1	3620,1
Volume de pâte (m <sup>3</sup> )	0,33	0,33	0,33	0,31

**Tableau 4. Récapitulatif des paramètres influençant les cheminées de remontées d'eau**

notre cas, les quatre bétons ont une compacité qui varie de 0,70 à 0,76. BF1 ayant une compacité de 0,76 et pas de pathologie, nous pouvons en déduire que ce paramètre influence la stabilité des bétons étudiés.

- Tous les ciments utilisés sont conformes aux recommandations de la norme EN NF 1538.
- Les quantités de fines sont toutes supérieures à 400 kg/m<sup>3</sup> (norme EN NF 206/CN).
- La quantité de liant est conforme aux exigences de la norme EN NF 206/CN à l'exception du béton BF4.
- La surface de Blaine de trois bétons répond aux préconisations de la norme NF EN 1538, ce qui n'est pas le cas du béton BF2 qui a une surface de Blaine légèrement inférieure (3650 au de lieu de 3800 cm<sup>2</sup>/g).

Bien que ces bétons soient conformes aux exigences des normes NF 1538/ EN et NF 206/CN, trois d'entre eux présentent des cheminées de remontée d'eau plus ou moins importantes. On peut supposer que ces désordres sont liés à un ressuage du béton. L'étude du ressuage a été réalisée en laboratoire afin de s'affranchir des aléas des chantiers.

### 3. ÉTUDE DU RESSUAGE DES BÉTONS DE FONDATION

En laboratoire, les mêmes compositions (Tableau 3) ont été confectionnées pour les quatre bétons. Tous les constituants des bétons utilisés en laboratoire sont identiques à ceux du chantier.

#### 3.1. Caractérisation des bétons en laboratoire

Les résultats des essais de caractérisation des bétons à l'état frais sont donnés dans le Tableau 5.

Le béton BF2 présente une valeur d'étalement plus faible en laboratoire (560 mm) que sur le chantier (640 mm), mais dans l'ensemble, les quatre bétons reproduits en laboratoire, sont conformes aux bétons livrés sur les chantiers. Cet écart pour le béton BF2 peut être dû aux aléas des chantiers (ajout d'adjuvant ou d'eau...).

Essais	BF1	BF2	BF3	BF4
Etalement (mm)	570 ± 10	560 ± 10	640 ± 10	610 ± 10
Température extérieure (°C)	22,4	20,6	23,6	21,2
Température du béton (°C)	19,8	17,2	19,5	18,8
Air occlus (%)	1,3 ± 0,3	1,1 ± 0,4	1,4 ± 0,4	1,8 ± 0,2

**Tableau 5. Récapitulatif des résultats de caractérisation des bétons frais en laboratoire**

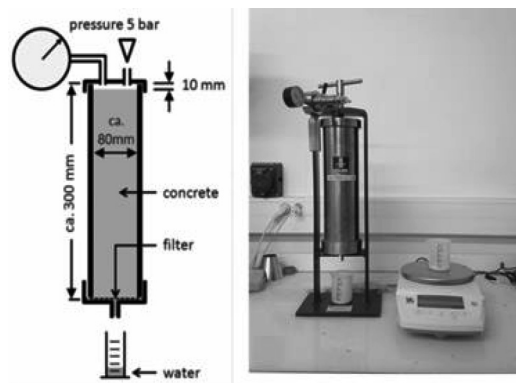


Figure 3. Principe ressueage forcé à l'aide d'un filtre presse BAUER

Bétons	Quantité d'eau ressueée (ml)	Degré de pathologies
BF1	11,8	néant
BF2	20,8	+
BF3	18,9	+++
BF4	19,4	++++

Tableau 6. Quantité d'eau ressueée à pour une pression de 5 bars à 5 minutes

### 3.2. Analyse du ressueage en laboratoire

Pour un béton instable, la pression exercée sur le béton au fond du panneau peut entraîner la migration de l'eau de gâchage vers la surface. Le béton subit un ressueage forcé. Ce ressueage est l'un des problèmes majeurs pour la stabilité des bétons frais. L'étude est réalisée à l'aide d'un filtre presse Bauer comme le stipule les recommandations australiennes [3]. L'appareil est constitué d'un cylindre normalisé (Figure 3) dans lequel a été introduit un filtre sur la base inférieure. Le béton est introduit dans le cylindre en deux couches successives. Chaque couche est piquée 12 fois pour désaérer le béton. Une pression de 5 bars (72.5 psi) est appliquée sur le béton. L'eau migre vers le fond du cylindre et traverse le filtre. Elle est ensuite évacuée à travers l'orifice de sortie vers un récipient où elle est pesée en continu. La quantité d'eau ressueée est mesurée toutes les minutes pendant 45 minutes [3].

Les quantités d'eau ressueée pour une pression de 5 bars à 5 minutes sont données dans le tableau 6 pour les 4 bétons.

Le béton BF1 qui est le béton de référence présente un ressueage moins important (11,8 ml à 5 minutes). Les trois autres bétons ont une quantité d'eau ressueée à 5 minutes proches du seuil recommandé (Recommended Practice, Tremie Concrete for Deep Foundations) qui est de 24,4 ml. Il n'est pas possible de conclure que les degrés de pathologies sont uniquement dus à la quantité d'eau ressueée. En effet, ce sont les parois moulées du béton BF2 qui présente le moins de désordres (+), or la quantité d'eau ressueée est de 20,8 ml. Cependant, c'est le béton BF4 qui a présenté le plus de désordre sur le chantier (++++), la quantité d'eau ressueée est de 19,4 ml. Une étude complémentaire est nécessaire pour établir une corrélation entre le degré de pathologie des parois moulées et les paramètres de formulation du béton. Néanmoins, on peut observer dans le Tableau 6 que pour les bétons BF3 et BF4, plus on s'éloigne de la valeur seuil, moins on a des cheminées de remontée d'eau. C'est pourquoi, une solution est d'abaisser la valeur du seuil admissible de la quantité d'eau ressueée à 15 ml par m<sup>3</sup> de béton pour une paroi moulée d'une hauteur supérieure à 15 mètres (soit 24,4 ml à l'essai filtre presse Bauer).

## 4. INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE FORMULATION SUR LE PHÉNOMÈNE DE RESSUEAGE

De nombreux facteurs peuvent influencer le ressueage des bétons tant au niveau de la formulation que des conditions de mise en œuvre et environnementales. Azzi et al. [5] a étudié l'effet des paramètres prépondérant de formulation tels que la quantité de particules fines, la granulométrie du mélange granulaire, la compacité, le type de ciment et l'utilisation d'un retardateur de prise. Cette étude a été menée à partir de la formulation du béton BF4 qui correspond au chantier qui a présenté les pathologies les plus sévères. Le sable de ce béton a été substitué à celui de de la formule du béton BF1. L'abréviation suivante a été adoptée pour le béton substitué BF4SS.

### 4.1. Caractérisation du béton BF4SS

880 kg de sable et de sablon de nature roulé et siliceuse ont été substitués par 880 kg de sable de la formulation BF1 de nature concassé et calcaire. Les formulations des bétons étudiés répondent aux exigences des normes NF EN 1538 et NF EN 206/CN. Le Tableau 7 présente les différentes compositions pour 1 m<sup>3</sup> de béton. Seuls les paramètres de formulation modifiés sont donnés.

Composition	BF1	BF4	BF4SS
Sable 0/1 (kg/m <sup>3</sup> )	-	220	-
Sable 0/4 (kg/m <sup>3</sup> )	820	660	880
G/S	1,02	1,07	1,07

Tableau 7. Paramètres de formulation modifiés pour BF4SS

Bétons	Quantité de fines (kg/m <sup>3</sup> )	Surfaces spécifiques (m <sup>2</sup> /kg)	Compacité des mélanges
BF1	446	4014,2	0,76
BF4	400	3620,1	0,73
BF4SS	422	4313,9	0,75

Tableau 8. Quantité de fines des bétons, surfaces spécifiques et compacité des mélanges

Essais	BF1	BF4	BF4SS
Slump (mm)	210	220	220
Table à Chocs (mm)	580	610	600
J-ring BJ (mm)	65	51	60
Essai au Tamis (%)	0,71	4,65	2,65
Air occlus (%)	1,2	1,8	1,7

Tableau 9. Résultats des essais de caractérisation à l'état frais des différents bétons

Le mélange granulaire des 3 bétons est représenté Figure 4. Les courbes sont continues. Un enrichissement de grains de dimension inférieure à 600  $\mu\text{m}$  pour la formule BF4SS est observé.

L'augmentation de la teneur en fines du mélange impacte directement la surface spécifique des grains ainsi que la compacité du squelette granulaire. Cette correction en fines du

sable permet de réduire la perméabilité du mélange. En tenant compte de la quantité d'éléments fins apportés par le ciment et les additions, le Tableau 8 résume la quantité totale de fines inférieures à 125  $\mu\text{m}$  selon les mélanges et les surfaces spécifiques calculées. La formulation BF4SS a une surface spécifique supérieure à celle de la formulation BF1 et nettement plus élevée que la formule de base BF4.

Cette augmentation très significative va avoir pour conséquence une mobilisation plus importante de l'eau par les granulats. Cet effet va contribuer à la stabilité du mélange. La compacité granulaire pour le béton BF4SS a une augmentation significative. Les propriétés des bétons sont donnés Tableau 9.

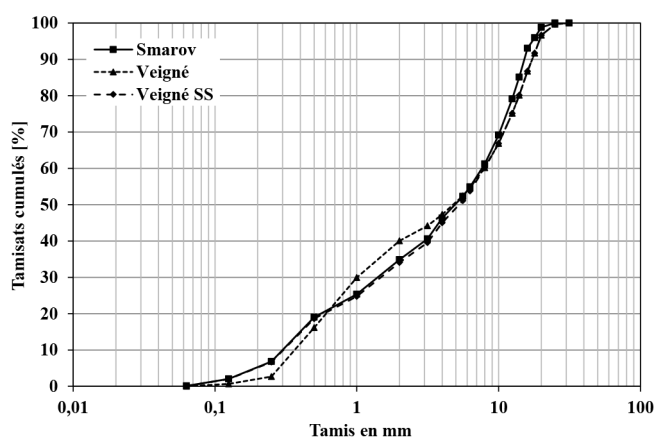


Figure 4. Mélanges granulaires des bétons

Bétons	Quantité d'eau ressuée (ml)
BF1	11,8
BF4	19,4
BF4SS	13,0

Tableau 10. Quantité d'eau ressuée à 5 minutes à 5 bars pour les 3 formulations

## 4.2. Analyse du ressuage en laboratoire

Les essais de ressuage statique ont été réalisés selon la norme ASTM C232. L'évolution de la quantité d'eau ressuée sur une période de 45 minutes est identique pour les 3 formules. La compacité granulaire et l'augmentation du pourcentage de fines contribuent à une meilleure stabilité du béton sous pression. Les valeurs obtenues à 5 minutes sont données Tableau 10. Ces résultats montrent l'importance du choix du sable pour la formulation d'un béton de paroi moulée. Au-delà de la nature du sable, plusieurs critères sont apparus comme étant source d'une réduction significative du ressuage :

- Une compacité granulaire supérieure à 0,75,
- Une surface spécifique des granulats supérieure à 4000 m<sup>2</sup>/kg
- Une quantité totale de fines (diamètres des grains inférieurs à 125  $\mu\text{m}$ ) supérieure à 420 kg/m<sup>3</sup>.

Ces valeurs seuils peuvent constituer une première proposition au niveau des recommandations en vue de limiter les risques d'apparition de cheminées de remontées d'eau.



Figure 5. Paroi moulée de la station de métro

## 5. APPLICATION DE L'ÉTUDE AU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 (GRAND PARIS)

Les prolongements de la ligne 14 du métro (Saint-Lazare-Olympiades) doivent relier le centre de Paris, le pôle d'affaires de Saint-DenisPleyel, au nord et l'aéroport d'Orly, au sud. Ces prolongements seront réalisés en conservant les caractéristiques actuelles de la ligne rapide et performante avec une vitesse de 45 km/h en moyenne contre 25km/h pour un métro classique. Ce prolongement de 14 km est intégralement en

souterrain (Figure 5). Le chantier concerné par cette étude est une station de métro (Clichy Saint Ouen), sous le RER C. Du fait de la présence d'une nappe perchée au sein des marnes, un radier profond et des bâtiments d'une grande hauteur (R+7) adjacents, le type de soutènement retenu est une paroi moulée. Cette solution permet, d'une part de réaliser un ouvrage étanche grâce à son ancrage dans les marnes et caillasses et d'autre part, de servir de mur périphérique à la structure finale de l'ouvrage. La station est composée de 3 étages. La surface de la paroi moulée réalisée est de 13100 m<sup>2</sup>. Les travaux de paroi moulée ont été réalisés de juin 2015 à janvier 2016 par Botte Fondations. Les parois moulées ont une hauteur de 42 et

Composition	Ligne 14	Ligne 14
	Avant modification	Après modification
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	340	340
Classe ciment	CEMIII/A 52,5N LH PMES CP1	CEMIII/A 52,5N LH PMES CP1
Type de ciment	CEM III	CEM III
Classe d'exposition	XA1	XA1
Rc 28	C35/45	C35/45
Cendres volantes (kg/m <sup>3</sup> )	20	50
Sable 0/4 (kg/m <sup>3</sup> )	850	850
Gravillon 4/12 (kg/m <sup>3</sup> )	300	300
Gravillon 4/20 (kg/m <sup>3</sup> )	640	640
Techno 90 (L)	3,71	3,71
CIMAXTARD (L)	0,98	0,98
Eau efficace (L)	170	170
E/C	0,50	0,50
Maintien de l'ouvrabilité (min)	480	480

Tableau 11. Composition du béton

Paramètres	Ligne 14	
	Formule initiale	Formule modifiée
Granulométrie du mélange granulaire	Continue	Continue
G/S	1,08	1,08
Quantité de fines $\leq 125 \mu\text{m}$ (kg/m <sup>3</sup> )	452	485
Quantité d'eau ressuée (mL)	-	12,3

**Tableau 12. La formulation avant et après modification**

44 m et une épaisseur de 1m. La largeur des panneaux varie de 3,07 m à 7,78 m ce qui donne des volumes de 132 à 334 m<sup>3</sup>. La distance entre la centrale à béton et le chantier est d'environ 11 km. Le temps de transport est estimé à 25 minutes environ. Afin de s'adapter aux contraintes du chantier ainsi qu'à la taille des panneaux, les panneaux de 3,07 m ont une cage d'armatures et les panneaux de hauteur supérieure à 7,78 m ont deux cages d'armatures.

La formulation de base proposée par le bétonnier a été modifiée en prenant en compte les résultats de l'étude précédente :

- Une compacité granulaire supérieure à 0,75 avec une distribution granulaire continue.
- Une quantité totale de fines (diamètre des grains inférieurs à 125  $\mu\text{m}$ ) supérieure à 420 kg/m<sup>3</sup>.
- Pour l'essai filtre Bauer : 16,5 ml à 5 minutes comme valeur admissible.
- Pour l'essai ASTM 232 : 4% comme amplitude finale.

La quantité des fines des mélanges a été modifiée pour que cette dernière soit plus élevée. La formulation avant et après modification est donnée dans le Tableau 11. Le béton a été formulé afin de répondre aux exigences du chantier (classe d'exposition, volume des panneaux de la paroi moulée avec pour effet un maintien de la consistance pendant la durée du bétonnage...). Les matériaux utilisés pour la confection de ce béton sont conformes aux normes NF 1538 et NF 206/CN. La formulation initialement proposée par le bétonnier a été modifiée en augmentant le dosage des cendres volantes afin d'assurer la quantité limite 400 kg/m<sup>3</sup>. Pour mieux cerner les

effets des différents paramètres étudiés nous avons pris des valeurs proches de celles de la formule de référence (BF1) (Tableau 11).

Le Tableau 12 donne les paramètres de formulation modifiés ainsi que la quantité d'eau ressuée pour une pression de 5 bars à 5 minutes. La quantité d'eau ressuée est proche mais surtout inférieure à la valeur seuil proposée de 16.5 ml. Bien que le béton coulé ait été formulé en prenant en compte les recommandations proposées, la paroi moulée de ce chantier présente des cheminées de remontées d'eau.

Afin de comprendre la présence de ces défauts, une étude complémentaire a été effectuée. La présence du retardateur de prise CIMASTARD 101 qui a été également utilisé dans la formule du béton BF4 pourrait être la cause de ces défauts. En effet, les paramètres influençant les cheminées de remontée d'eau sont conformes aux recommandations émises. La surface spécifique des granulats est supérieure ou très proche de la formule de référence BF1 (Tableau 13).

La quantité de fines du béton est conforme aux exigences des normes NF 1538 et NF 206/CN (comprise entre 400 kg/m<sup>3</sup> et 550 kg/m<sup>3</sup>). Elle est de l'ordre de grandeur de la formule BF1. La quantité et le type du ciment utilisé pour chaque formule est conforme aux normes NF 1538 et NF 206/CN. La valeur des surfaces Blaine des ciments est différente mais répond aux préconisations de la norme NF 1538 (supérieure à 3800 cm<sup>2</sup>/g). De plus, la quantité de liant est conforme aux exigences de la norme NF 206/CN pour la classe d'exposition donnée. Le volume de pâte des bétons varie de 313 à 350 l/m<sup>3</sup>

Paramètres	Ligne 14	Béton de référence BF1
Compacité	0,76	0,76
G/S	1,08	1,02
Surface spécifique des granulats (m <sup>2</sup> /kg)	6168	4014
Quantité de fines $\leq 125 \mu\text{m}$ (kg/m <sup>3</sup> )	485	446
Quantité Liant (kg/m <sup>3</sup> )	340	385
Surface de Blaine ciment (cm <sup>2</sup> /g)	4050	4150
Volume de pâte (L/m <sup>3</sup> )	340	330

**Tableau 13. Récapitulatif des paramètres de formulation**

Essais	Ligne 14	Béton de référence BF1
Slump (mm)	220	210
J-ring BJ (mm)	43,5	65
Table à chocs (mm)	640	580
Essai au tamis (%)	1,85	0,1
Air occlus (%)	1,7	1,2

Tableau 14. Caractérisation à l'état frais du béton de la ligne 14

ce qui est compris dans l'intervalle de 300 L/m<sup>3</sup> et 350 L/m<sup>3</sup> fixé comme limites pour un béton de paroi moulée. Les essais de caractérisation réalisés sur chantier sont les mêmes que ceux retenus pour la campagne expérimentale exécutée en laboratoire. Le Tableau 14 présente les résultats de ces essais.

L'affaissement au cône d'Abrams donne une classe de consistance S4 (béton très plastique). La valeur de BJ obtenue est de l'ordre de grandeur des bétons de paroi moulée. Le critère d'étalement à la table à choc (compris entre 550 mm et 650 mm) est respecté. Aucune auréole de laitance n'a été observée à la périphérie des galettes de bétons ce qui est un signe de stabilité des mélanges. L'essai au tamis conforte cette observation avec un pourcentage inférieur à la valeur limite préconisée de 15%. Concernant le pourcentage d'air occlus, ce dernier est inférieur à la valeur spécifiée de 4 %.

Les essais de ressuage statique selon la norme ASTM C232 ont été réalisés dans des locaux sur chantier éloignés de toutes vibrations ou autres aléas. Comme pour BF1, une période de 30 minutes sans ressuage a été constatée. Une vitesse de ressuage de 0,54 à 0,64 g/min est observée à 70 minutes après le début du ressuage. Puis, la vitesse de ressuage diminue (0,02 g/min) au bout de 340 minutes. Ce béton comparé aux bétons de l'étude, montre une forte sensibilité au ressuage. Ce phénomène qui avait été observé pour le béton BF4 [5] est lié à la présence du retardateur de prise qui prolonge la période dormante du béton. Des essais de calorimètre isotherme couplé à un conductimètre/résistimètre type CDM210 ont été effectués afin d'établir le temps de début de prise de ce béton. La Figure 6 présente la variation de la conductivité électrique du béton en fonction du temps pour une température de 20 °C. La courbe a une allure ainsi qu'une valeur de la conductivité (4,8 mS/cm) proches des bétons de l'étude. La conductivité augmente dans un premier temps pour décroître brutalement. Le sommet de la courbe correspond au début de prise « pic ». Le temps de début de prise est de 21h30. L'amplitude de ressuage de 4% peut être dépassée en poursuivant l'essai sur une période plus longue.

Les essais de ressuage à l'aide du filtre Bauer indique une quantité d'eau ressuée de 12,3 ml à 5 bars. La présence du retardateur de prise ne différencie pas le béton de la ligne 14 des bétons de l'étude. De plus, cette valeur est inférieure au

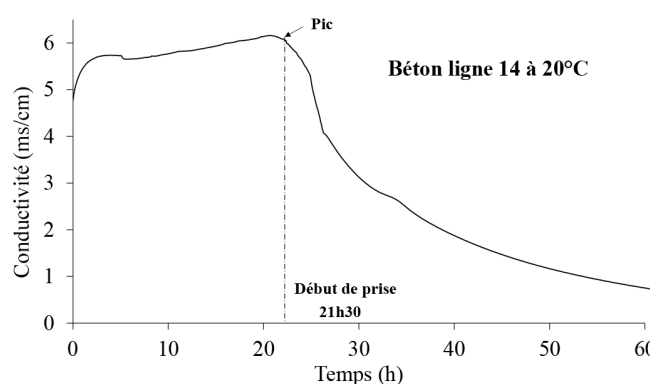


Figure 6. Variation de la conductivité en fonction du temps

seuil préconisé de 16,5 ml. Ce résultat montre la nécessité de modifier l'essai de ressuage au filtre presse Bauer.

## 6. CONCLUSION

Les quatre bétons caractérisés en laboratoire et sur chantier répondent aux exigences de la norme française NF EN 1538, de la norme européenne NF EN 206/CN ainsi que des recommandations australiennes pour fondations profondes (Recommended Practice Tremie Concrete for Deep Foundations). Malgré ces dispositions, cette étude montre que des cheminées de remontée d'eau occasionnant de sérieuses dégradations du parement peuvent exister. La présence d'un retardateur de prise dans un béton ne permet pas d'évaluer, à l'aide de l'essai filtre presse Bauer, les risques d'apparition de cheminées de remontée d'eau. Ce phénomène peut apparaître pour une faible quantité d'eau ressuée pour des temps de prise très long. Toutefois, pour des bétons sans retardateur de prise, la valeur seuil de 15 L d'eau ressuée par m<sup>3</sup> de béton pour une profondeur de paroi supérieure à 15 mètres (soit 24,4 ml à l'essai filtre presse Bauer) doit être abaissée à 10 L par m<sup>3</sup> de béton (16,5 ml). Cette recommandation est actuellement suivie par l'ensemble des entreprises oeuvrant dans ce secteur d'activités.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF EN 206-CN des bétons, décembre 2014
- [2] NF-1538 VERSION 2010- Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Parois moulées
- [3] Recommended Practice, 'Tremie Concrete for deep foundations', Recommendation, Concrete Institute of Australia, 2012, pp. 30-33.
- [4] Jossierand L., 'Ressuage des bétons hydrauliques', Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- [5] Azzi A., Djelal C., Vanhove Y., Kada H., Madec O., 'Relationship between mix designs and bleeding for SF-SCC applied to diaphragm walls' International Concrete Sustainability Conference, SCC-2016, 15-18 may 2016, Washington, United States, pp. 1129-1139.

# LE LAVAGE DES SABLES DE BEAUCHAMP EXCAVÉS : UNE OPPORTUNITÉ DE VALORISATION DES DÉBLAIS

## THE CHALLENGE OF BEAUCHAMP SANDS' RECOVERY: OPPORTUNITY OFFERED BY WASHING STAGE

**Isabelle MOULIN<sup>(1)</sup>, Thomas MILLAN<sup>(1)</sup>, Julian MARLINGE<sup>(2)</sup>,  
Grégoire PRIOL<sup>(3)</sup>, Stéphane GAFFIÉ<sup>(3)</sup>**

<sup>(1)</sup>LERM Groupe SETEC, 42/52 quai de la Rapée – CS 71230, 75583 Paris cedex 12

<sup>(2)</sup>TERRASOL Groupe SETEC, 42/52 quai de la Rapée – CS 71230, 75583 Paris cedex 12

<sup>(3)</sup>Société du Grand Paris, 30 avenue des fruitiers, 93200 Saint-Denis, France

### 1. INTRODUCTION

Le projet de construction du Grand Paris Express représente environ 200 km de lignes de métro et 68 nouvelles gares, qui généreront près de 43 millions de tonnes de matériaux excavés. Sur toute la durée du projet, la quantité de déblais produite chaque année en Île-de-France augmentera de 10 à 20%. La réutilisation de ces matériaux d'excavation est un formidable enjeu environnemental pour la Société du Grand Paris qui, dans le cadre de la COP 21, a pris l'engagement de développer une économie circulaire de la gestion des déblais et ainsi favoriser la valorisation des matériaux excavés.

Parmi les formations géologiques rencontrées, la formation des Sables de Beauchamp représente une part notable des matériaux excavés avec plusieurs millions de tonnes, provenant principalement d'excavation au tunnelier pour les tronçons de tunnels circulaires comme d'excavations traditionnelles pour la construction de gares et d'ouvrages émergents.

La valorisation des Sables de Beauchamp excavés dans les filières traditionnelles de type remblais ou couche de forme apparaissant limitée en regard des volumes générés et des caractéristiques attendues des matériaux en sortie de tunnelier, la Société du Grand Paris a engagé une étude des opportunités de valorisation qu'apporterait un lavage desdits sables. En effet, la présence de fines argileuses mais également leur teneur en sulfates apparaissent comme des freins à leur valorisation dans la filière matériaux hydrauliques (mortier, béton, *etc.*) qui serait susceptible d'offrir des opportunités notamment sur les chantiers du projet eux-mêmes.

Avant de mener une campagne d'essais pilotes nécessitant des quantités de matériaux importantes, une première phase d'essais en laboratoire a été réalisée avec les objectifs :

- d'évaluer les ordres de grandeurs des ratios fraction sableuse/fraction fines ;
- de qualifier les fractions sableuses obtenues vis-à-vis du référentiel granulats pour béton ;
- de qualifier les fractions fines vis-à-vis de filières industrielles.

## 2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

### 2.1. Matériaux d'étude

Les matériaux d'études proviennent notamment de 3 sondages carottés (référéncés A, B et C) spécialement dédiés à la problématique de valorisation des matériaux d'excavation et réalisés sur le tracé de la ligne 16 du Grand Paris Express.

Dans ce secteur, la formation des Sables de Beauchamp, d'en moyenne 10 mètres d'épaisseur, située dans la nappe phréatique, est constituée de sables fins à très fins présentant des passages limono-argileux. Les campagnes de reconnaissance préalable effectuées dans le cadre du projet mettent en évidence des passages latéraux entre les termes sans toutefois identifier de structuration continue en bancs. Les horizons argileux semblent présents de manière diffuse dans l'épaisseur de la couche, s'agglomérant ponctuellement pour former un horizon argileux mieux individualisé mais discontinu à l'échelle du projet. Par ailleurs, cette formation peut contenir des inclusions gypseuses diffuses, plus rarement des bancs,

ainsi que des lentilles gréseuses massives mais d'extensions limitées.

Les Sables de Beauchamp sont encadrés par les Marnes et Caillasses (formation sous-jacente, à dominante marneuse présentant des intercalations calcaires d'épaisseur pluri-centimétrique, localement associées à des faciès de substitution du gypse), et par le Marno-Calcaire de Saint Ouen (formation sur jacente à forte dominante marneuse et à bancs de calcaires tendres).

Afin d'augmenter la représentativité des échantillons, les prélèvements dans les carottes ont été réalisés :

- soit sur environ 3 mètres de hauteur permettant de caractériser la partie supérieure (1/3 sup.), la partie intermédiaire (1/3 int.) et la partie inférieure (1/3 inf.) des Sables de Beauchamp ;
- soit sur environ 10 mètres de hauteur correspondant à la hauteur du tunnel (HT). Dans ce cas, les Sables de Beauchamp (SB) peuvent être en mélange, soit avec la formation du Calcaire de Saint Ouen (SO) lorsque le tracé du tunnel est plus proche de la surface, soit avec les Marnes et Caillasses (MC) quand il est plus profond.

Les échantillons pour essais ont été préparés selon les règles de l'art par phases successives d'homogénéisation et quartage.

	HT (SO + SB) Sondage A	1/3 sup. Sondage A	HT (SO + SB) Sondage B	1/3 int. Sondage B	HT (SB + MC) Sondage C	1/3 int. Sondage C
<b>Paramètres physiques</b>						
Passant à 1 mm (%)	94	94	88	100	90	92
Passant à 315 µm (%)	91	93	82	99	85	89
Passant à 80 µm (%)	48	64	48	76	64	82
Indice de plasticité Ip		8,7		8,2		18,7
Particules < 2 µm (%)		4,9		7,9		
VBS (g/100g)	0,59	0,77	0,39	1,32	0,90	2,01
<b>Paramètres chimiques</b>						
Sulfates totaux (mg/kg)	2600	3100	4600	4300	6200	5100
Soufre total (mg/kg)	3700	5100	3500	6800	6000	7200
<b>Paramètres sur éluat après lixiviation (NF EN 12457-2)</b>						
Sulfates lixiviés (mg/kg)	1490	1160	554	1590	1590	2080
Fluorures lixiviés (mg/kg)	5,4	5,1	6,1	6,6	8,3	7,6
Molybdène lixivié (mg/kg)	0,48	0,40	0,20	0,30	0,50	0,40
Fraction soluble (mg/kg)	2860	2910	1280	3560	4330	5880

**Tableau 1 : Caractéristiques des échantillons utilisés lors des essais de lavage en laboratoire**

En cas de besoin, un concassage modéré des particules supérieures à 4 mm a été réalisé.

Les échantillons ainsi constitués ont subi une caractérisation détaillée comprenant :

- une caractérisation chimique :
  - détermination de la teneur en soufre, sulfates et fluorures totaux par chromatographie ionique après attaque acide ménagée à l'acide chlorhydrique ;
  - détermination de la teneur en soufre total ;
  - détermination de la teneur en molybdène par spectrométrie d'émission atomique par plasma induit (ICP) après attaque à l'eau régale ;
- une détermination du potentiel polluant au moyen de l'essai de lixiviation NF EN 12457-2 et analyse de l'éluat selon la norme NF EN 16192 ;
- une caractérisation minéralogique et microscopique :
  - analyse des phases argileuses par diffraction des rayons X ;
  - analyse cristallographique quantitative par diffraction des rayons X ;
  - examen au microscope électronique à balayage (MEB) couplé à l'analyse qualitative élémentaire par spectrométrie X ;
- une caractérisation physique :
  - détermination des limites d'Atterberg selon la norme NF P 94-048 ;
  - analyse granulométrique selon la norme NF P 94-056 ;
  - détermination de la teneur en particules inférieures à 2  $\mu\text{m}$  par sédimentométrie ;

- détermination de la valeur au bleu de méthylène (VBS) selon la norme NF P 94-068.

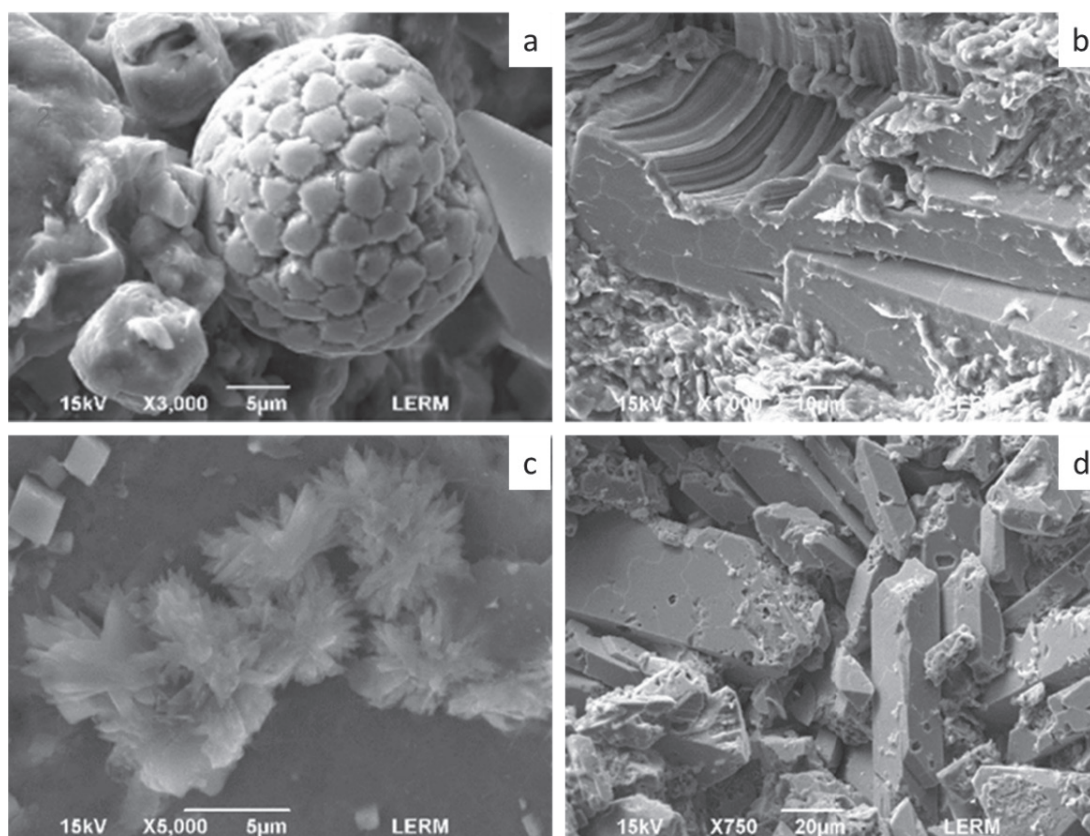
- Une sélection d'échantillons a été réalisée permettant d'évaluer :

- l'impact du caractère plus ou moins argileux des Sables de Beauchamp ;
- l'impact de teneurs plus ou moins importantes en sulfates et fluorures lixiviés ;
- l'impact des mélanges avec d'autres formations géologiques.

Le Tableau 1 présente les six échantillons sélectionnés et leurs différentes caractéristiques physiques, chimiques et environnementales.

La détermination de la teneur en soufre total et en sulfates totaux des différents échantillons a permis de montrer que les Sables de Beauchamp ne contiennent au maximum que 50 % de soufre sous forme de sulfates. Des observations par microscopie électronique à balayage (MEB) des échantillons ont permis de mettre en évidence que le soufre peut prendre quatre spéciations :

- Soufre diffus au sein de la matrice en proportion plus ou moins importante, a priori sous forme sulfates ;
- Cristaux de sulfure de fer de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Les faciès de pyrite framboïdale observés témoignent de l'origine bactérienne de la transformation des sulfates en sulfures (Figure 1 a) ;
- Petits cristaux de sulfates de calcium néoformés de quelques micromètres (Figure 1 c) ;
- Gros cristaux automorphes de sulfates de calcium d'une centaine de micromètres, et dans une moindre mesure de



**Figure 1 : Observations en microscopie électronique à balayage (MEB) des Sables de Beauchamp - a : sondage A, pyrite framboïdale (1) et matrice silicatée (2) ; b : sondage A, détail des gros cristaux de sulfates de calcium ; c : sondage B, détail des petits grains de sulfates de calcium recristallisés en surface d'un grain de quartz ; d : sondage A, détail des cristaux de sulfates de strontium**

strontium (quelques dizaines de micromètres) présents ponctuellement (respectivement Figure 1 b et d).

## 2.2. Méthodes

### 2.2.1. Protocole d'essais

Un essai de lavage en laboratoire ne peut pas reproduire réellement les conditions d'un lavage industriel. Le protocole d'essai mis en place, bien que très simple, s'appuie néanmoins sur des paramètres inspirés des conditions d'un lavage de sable industriel par hydrocyclone :

- des rapports liquide / solide (L/S) de même ordre de grandeur ;
- des temps de contact de même ordre de grandeur ;
- un seuil de coupure atteignable par ce type d'installation industrielle ;
- la création d'un vortex par une vitesse d'agitation élevée.

Les essais de lavage ont été menés de la manière suivante :

- Reconstitution d'un matériau pâteux par ajout d'eau (teneur en eau de 50%) 24h avant la réalisation de l'essai ;
- Mise en pulpe du matériau par un ajout d'eau au rapport Liquide / Solide (L/S) souhaité ;
- Agitation par un malaxeur à hélice à une vitesse de 1500 tours/minute pendant 3 minutes permettant de créer un vortex ;
- A l'arrêt du malaxage, reprise de la pulpe sur une colonne de tamis de manière à séparer la fraction fine ( $< 63 \mu\text{m}$ ) du sablon ( $> 63 \mu\text{m}$ ) ;
- Filtration du mélange eau + fines à  $0,45 \mu\text{m}$  directement après le lavage ;
- Les fractions fines et sableuses sont ensuite homogénéisées et préparées conformément aux référentiels des essais de caractérisation prévus. L'eau de lavage est conservée pour analyses.

La Figure 2 résume le protocole adopté pour les essais de lavage en laboratoire et détaille les essais de caractérisation réalisés sur chaque sous-produit.

### 2.2.2. Caractérisation des produits de lavage

Comme indiqué sur le schéma de la Figure 2, les produits de lavage ont été caractérisés de manière à évaluer l'impact du lavage sur leur potentiel polluant, d'une part, et sur leur potentiel de valorisation, d'autre part.

Le potentiel polluant a été caractérisé par l'intermédiaire de l'essai de lixiviation NF EN 12457-2 et l'analyse des éluats obtenus (teneurs en sulfates et fluorures lixiviés, fraction soluble) selon la norme NF EN 16192 et conformément aux critères de mise en centre de stockage des déchets inerte (arrêté du 12 décembre 2014).

La caractérisation chimique et minéralogique est identique à celle pratiquée sur les matériaux avant lavage. Les fractions sableuses ont été caractérisées selon les exigences de la norme granulats NF P 18-545.

## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1. Répartition fraction sableuse / fraction fine

La Figure 3 présente, pour les essais de lavage réalisés avec un rapport Liquide/Solide de 4, la répartition des fractions sableuses et fines obtenues. La proportion de fraction sableuse varie entre 20 et 75% selon les essais, et entre 55 et 75% pour les échantillons moyennés sur une hauteur de tunnel.

L'essai conduisant à la proportion de fraction sableuse la plus faible (tiers intermédiaire des Sables de Beauchamp du son-

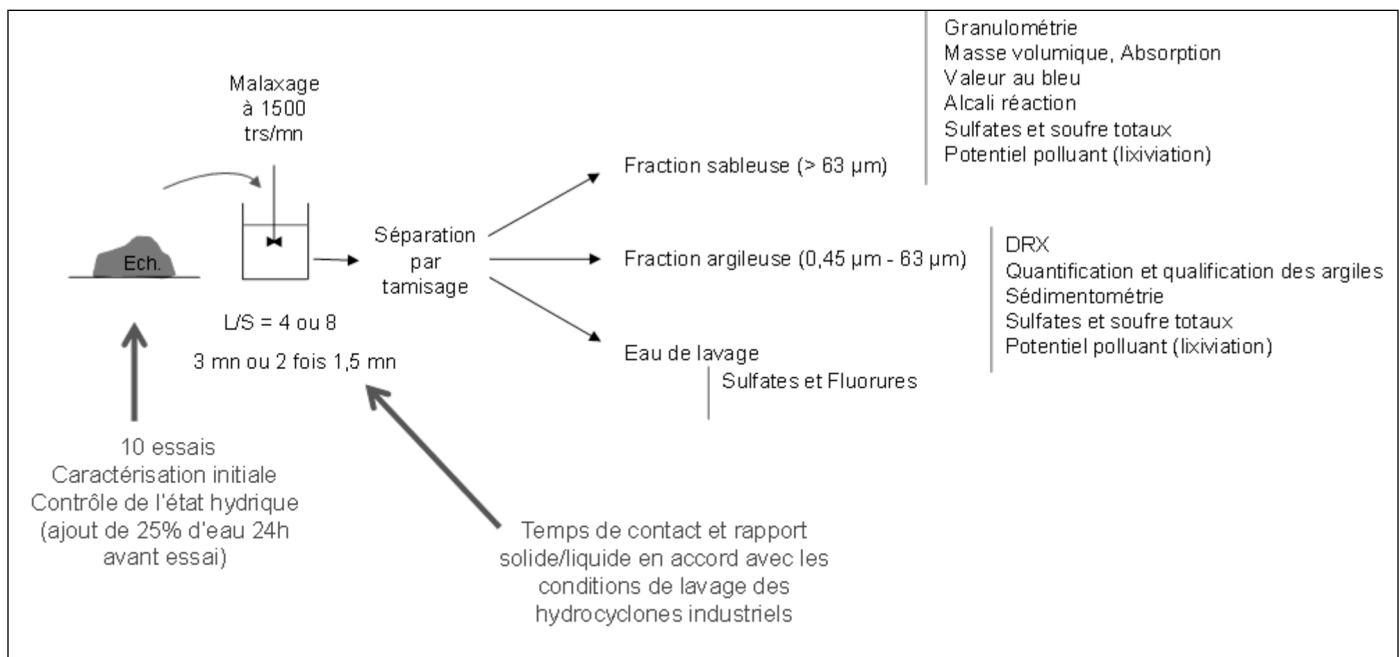


Figure 2 : Description du protocole d'essais de lavage des Sables de Beauchamp en laboratoire

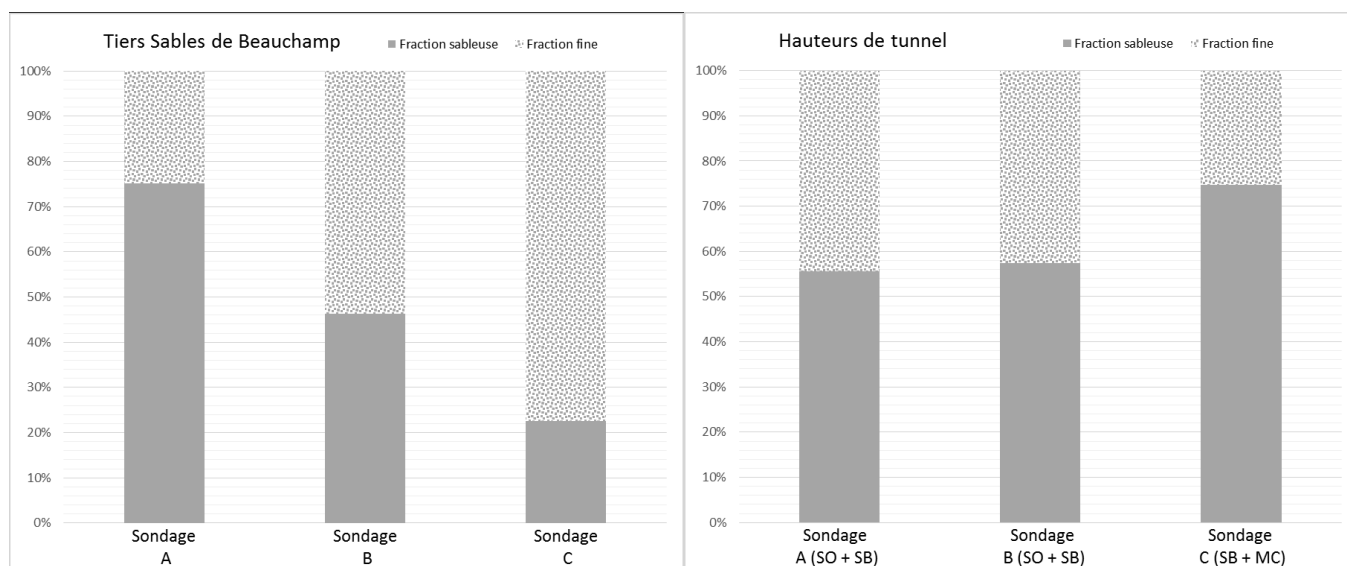


Figure 3 : Répartition entre la fraction sableuse et la fraction fine suite aux essais de lavage réalisés avec un rapport Liquide/Solide de 4.

dage C) correspond à un échantillon relativement argileux (VBS de 2 g/100g).

Le protocole d'essais de lavage ne reproduisant pas réellement une séparation industrielle sur hydrocyclone, ces proportions seront à préciser par des essais sur installation pilote, puis industrielle.

### 3.2. Impact du lavage sur le potentiel polluant des matériaux

Certains matériaux étudiés montrent des teneurs en sulfates lixiviables et une fraction soluble (après lixiviation NF EN 12437-2) dépassant les critères de mise en centre de stockage pour déchets inertes soit 1 000 mg/kg de masse sèche (MS) pour les sulfates et 4 000 mg/kg MS pour la fraction soluble (Tableau 1). Les Figures 4 et 5 présentent l'évolution de ces paramètres pour les fractions sableuses et les fractions fines issues de l'essai de lavage. On notera que la teneur en sulfates lixiviables est systématiquement plus faible dans les produits de lavage que dans l'échantillon initial. La Figure 5 montre que la fraction soluble évolue de la même manière sauf pour l'échantillon moyenné sur la hauteur du tunnel du sondage A (fraction soluble dans la fraction argileuse légèrement plus élevée que dans l'échantillon avant lavage). Ainsi, toutes les fractions sableuses et les fractions fines respectent les seuils d'acceptation en installation de stockage de déchets inertes (ISDI). Par ailleurs, on notera que la concentration en sulfates de l'eau après lavage est comprise entre 150 et 600 mg/l dépassant le seuil de potabilité (250 mg/l) dans 6 cas sur 10 et dépassant 300 mg/l dans 3 cas seulement.

Il est intéressant de noter que la répartition des sulfates entre les fractions fines et sableuses n'est pas toujours identique d'un échantillon à l'autre. Ce phénomène s'explique vraisemblablement par des différences de spéciation du soufre dans les matériaux avant lavage et notamment la taille des cristaux de sulfates de calcium (présence, dans certains échantillons, de cristaux de sulfates de calcium de taille supérieure au seuil de coupure, 63  $\mu\text{m}$ ).

La Figure 6 présente les résultats relatifs aux fluorures lixiviables pour deux matériaux, le tiers supérieur des Sables de Beauchamp du sondage A et le tiers intermédiaire des Sables de Beauchamp du sondage B et ceci pour des conditions de lavage différentes (évolution du temps de contact et du rapport L/S). L'intensité du lavage aurait un impact sur le comportement des fluorures, un lavage modéré semblant provoquer une augmentation de la solubilisation des fluorures. En revanche, l'intensification du lavage par une augmentation du rapport L/S conduirait à une diminution des teneurs en fluorures lixiviables dans les fractions sableuses et les fractions fines. On soulignera néanmoins que les écarts entre les différentes teneurs sont relativement faibles et que ce phénomène reste à confirmer par de nouveaux essais sur des matériaux plus riches en fluorures. La teneur en fluorures de l'eau issue du lavage des Sables de Beauchamp est comprise entre 0,5 et 1,2 mg/l et ne dépasse jamais le seuil de potabilité (1,5 mg/l).

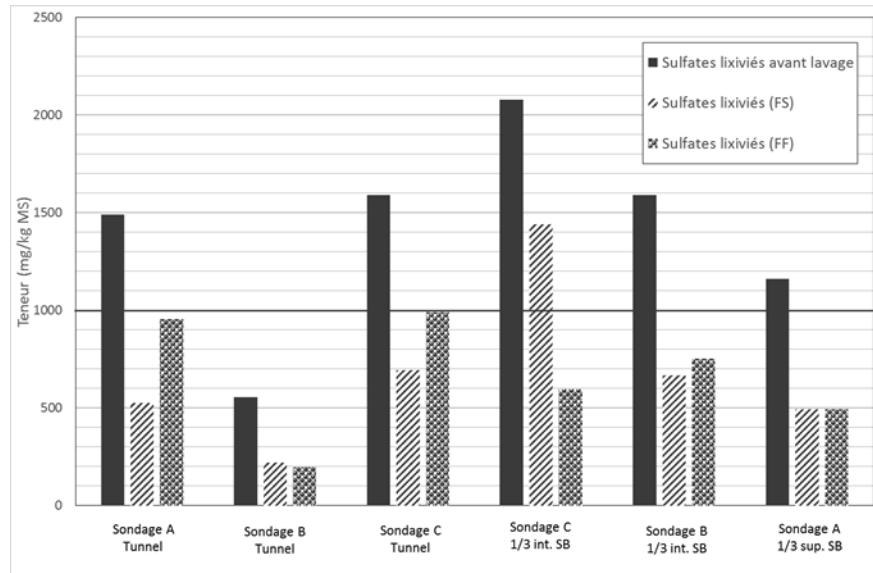
### 3.3. Potentiel de valorisation des produits de lavage

#### 3.3.1. Valorisation des fractions sableuses

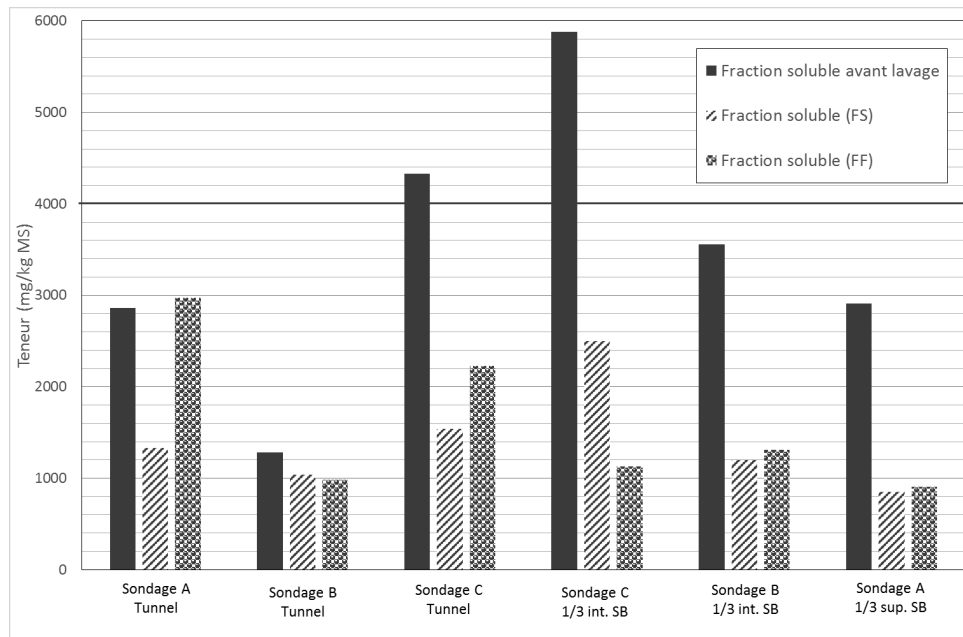
À l'issue des essais de lavage, les fractions sableuses ont été caractérisées selon les spécifications de la norme NF P 18-545 relatives aux granulats pour matériaux hydrauliques (bétons et mortiers). La répartition granulométrique des fractions sableuses obtenues après lavage est représentée en Figure 7.

Le Tableau 2 synthétise l'ensemble des résultats obtenus sur les fractions sableuses issues des échantillons moyennés sur une hauteur de tunnel. La norme associée à chaque essai est indiquée dans le Tableau 2. Il en ressort que :

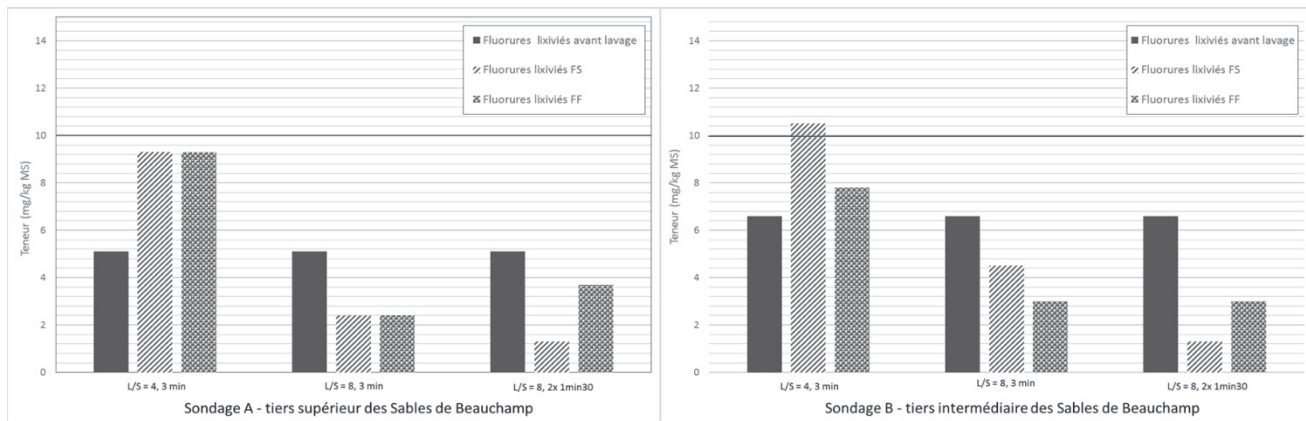
- la masse volumique réelle des fractions sableuses est comprise entre 2,6 et 2,8  $\text{t/m}^3$ , ce qui correspond à des granulats courants. Leurs coefficients d'absorption d'eau sont inférieurs à 2,5% classant les fractions sableuses dans la catégorie A de la norme NF P 18-545 ;



**Figure 4 : Impact du lavage des Sables de Beauchamp sur la teneur sulfates lixiviés des produits de lavage (en plein, échantillon avant lavage, FS : fraction sableuse après lavage, FF : faction fine après lavage)**



**Figure 5 : Impact du lavage des Sables de Beauchamp sur la fraction soluble des produits de lavage (en plein, échantillon avant lavage, FS : fraction sableuse après lavage, FF : faction fine après lavage)**



**Figure 6 : Impact du rapport Liquide / Solide sur la teneur en fluorures lixiviés des produits de lavage (en plein, échantillon avant lavage, FS : fraction sableuse après lavage, FF : faction fine après lavage)**

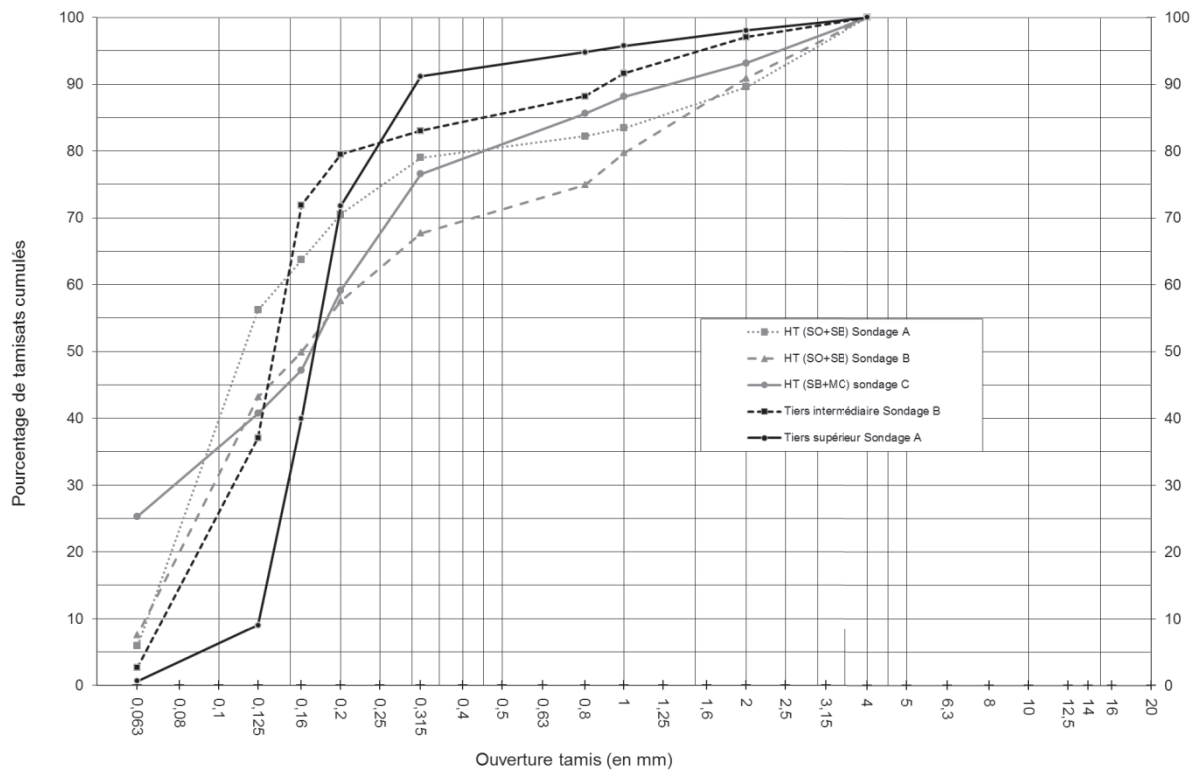


Figure 7 : Répartition granulométrique de fractions sableuses après lavage

Caractéristiques	HT (SO + SB) Sondage A	HT (SO + SB) Sondage B	HT (SB + MC) Sondage C	Spécifications NF P 18-545
				Béton hydraulique et mortiers Article 10
Masse volumique réelle (t/m <sup>3</sup> ) (NF EN 1097-6)	2,63	2,55	2,66	-
Coefficient d'absorption d'eau (%) (NF EN 1097-6)	0,4	1,6	1,1	< 2,5 % Catégorie A
Soufre total (S en %) (NF EN 1744-1)	0,20	0,20	0,29	< 0,4 % Catégorie A
Sulfates solubles dans l'acide (SO <sub>3</sub> en %) (NF EN 1744-1)	0,27	0,37	0,42	< 0,2 % (si S > 0,08 %) Catégorie A, B et C
Masse de Bleu (g/kg) (NF EN 933-9)	1,5	1,8	2	si D > 1 mm < 1,5 ( ) si D < ou = 1 mm) < 1 Catégorie A < 2 Catégorie B et C > 2, Catégorie D
Réactivité aux alcalis (essai « microbar ») (XP P 18-594)	NR	NR	NR	Essai négatif (NR)

Tableau 2 : Caractéristiques des fractions sableuses après l'essai de lavage

- les trois fractions sableuses sont non réactives au sens du fascicule FD P 18-542 ;
- les fractions sableuses respectent le référentiel de la norme concernant les teneurs en soufre total. Leur teneur en soufre total est inférieure à 0,4%. Les teneurs en sulfates solubles dans l'acide sont toutes inférieures à 0,8% (catégorie D) ;
- les masses de bleu (MB) selon la norme NF EN 933-9 sont inférieures à 2 g/kg classant les fractions sableuses dans les catégories B ou C de la norme NF P 18-545.

On notera que certains paramètres comme la masse de bleu sont dépendants du mode de séparation mis en œuvre lors du lavage. Les résultats obtenus seront donc à confirmer lors d'essais pilotes avec un hydrocyclone industriel.

### 3.3.2. Valorisation des fractions argileuses dans les filières industrielles

Les fractions fines ont subi une caractérisation chimique et minéralogique afin de les positionner vis-à-vis d'éventuelles filières de valorisation industrielle. Les Tableau 3, Tableau 4 Tableau 5 détaillent ces résultats :

- teneurs en sulfates totaux et soufre total et pourcentage des particules inférieures à 2  $\mu\text{m}$  par sédimentométrie (Tableau 3) ;
- analyse cristallographique des fractions argileuses préparées selon le principe de la norme NF X31-107 sur lames orientés (sans traitement, traitement thermique et traitement au glycol) (Tableau 4) ;
- analyse cristallographique quantitative par diffraction des rayons X (Tableau 5).

Les argiles ne représentent que 15 à 25% des fractions fines (particules inférieures à 2  $\mu\text{m}$  quantifiées par sédimentométrie) et sont majoritairement constituées de Sépiolite, Palygorskite et Illite. Les fractions fines se composent en fait principalement de carbonate calcique et magnésien (Calcite et Ankérite) et d'un reliquat de minéraux siliceux (Quartz et Microcline). La présence de Pyrite est également mise en évidence. On notera que la Sépiolite et la Palygorskite sont des argiles fibreuses à capacité d'échange relativement faible mais à très forte surface spécifique, très utilisées dans l'industrie pour leur pouvoir absorbant.

	HT (SO + SB) Sondage A	HT (SO + SB) Sondage B	HT (SB + MC) Sondage C	1/3 int. Sondage C	1/3 int. Sondage B	1/3 sup. Sondage A
Sulfates totaux (%)	0,34	0,44	0,55	0,34	0,34	0,27
Soufre total (%)	0,64	0,31	0,41	0,65	0,32	0,70
Particules < 2 $\mu\text{m}$ (%)	16,1	9,4	15,3	19,5	19,8	13,4

**Tableau 3 : Teneurs en soufre et sulfates totaux et résultats de sédimentométrie relatifs aux fractions fines obtenues lors des essais de lavage.**

Echantillon	Illite	Sépiolite	Palygorskite	Interstratifié Vermiculite-Smectite
HT (SO + SB) Sondage A	30%		50%	20%
HT (SO + SB) Sondage B	5%	80%	15%	
HT (SB + MC) Sondage C	40%		60%	

**Tableau 4 : Composition de la phase argileuse des fractions fines obtenues suite au lavage des Sables de Beauchamp en mélange avec les Calcaires de Saint-Ouen ou les Marnes et Caillasses.**

Echantillon	Ankérite	Quartz	Calcite	Aragonite	Microcline	Pyrite	Phases amorphes ou mal cristallisées et phyllosilicates
HT (SO + SB) Sondage A	52	8	3		11	1	25
HT (SO + SB) Sondage B	28	4	47	4			17
HT (SB + MC) Sondage C	70	5	1		8	2	14

**Tableau 5 : Composition minéralogique des fractions fines issues du lavage des Sables de Beauchamp en mélange avec les Calcaires de Saint-Ouen ou les Marnes et Caillasses.**

La faible présence d'argiles ainsi que leur nature ne permettent pas d'envisager une valorisation en filière industrielle de type terres cuites, ni un usage comme d'étanchéité. La présence de magnésium sous la forme d'Ankérinite en quantité trop importante pourrait être un frein à une valorisation en cimenterie.

#### **4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Dans le cadre des travaux du Grand Paris Express, 43 millions de tonnes de matériaux d'excavation seront à gérer. La formation des Sables de Beauchamp représente à elle seule plusieurs millions de tonnes provenant pour une grande part d'excavation au tunnelier.

Les essais en laboratoire de lavage des Sables de Beauchamp ont permis d'obtenir une fraction sableuse dont les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques apparaissent

compatibles avec un usage en matériaux hydrauliques sous la forme d'un sablon 0/1. Certains aspects comme la répartition granulométrique sont à travailler sur une installation pilote permettant de reproduire plus fidèlement un procédé industriel.

En revanche, de par leurs caractéristiques chimiques et minéralogiques, la valorisation des fractions fines apparaît plus difficile mais une élimination en installation de stockage pour déchets inertes semble envisageable pour la grande majorité des cas étudiés.

Des études complémentaires sont à mener sur des mélanges présentant des teneurs naturelles en sulfates, et fluorures plus élevées pour évaluer plus en détail l'efficacité du lavage sur le potentiel de valorisation des matériaux excavés.

L'ensemble de ces résultats est à confirmer et à préciser par la réalisation d'essais pilote qui permettront d'étudier la faisabilité technico-économique d'un tel traitement associé à une valorisation en filière mortier ou béton de la fraction sableuse.

# INFLUENCE DE LA COMPOSITION CIMENTAIRE SUR LE DÉGAGEMENT DE CHALEUR ET LES MONTÉES EN RÉSISTANCES MÉCANIQUES

## *EFFECT OF THE CEMENT COMPOSITION ON THE TEMPERATURE AND STRENGTH RISING AT EARLY AGE*

**Agathe BOURCHY<sup>(1)\*</sup>, Laury BARNES DAVIN<sup>(2)</sup>, Laetitia BESSETTE<sup>(2)</sup>,  
Jean Michel TORRENTI<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>IFSTTAR, Département Matériaux et Structures, 14-20 boulevard Newton,  
77420 Champ-sur-Marne, France

<sup>(2)</sup>Vicat, 4 rue Aristide Bergès, 38001 L'Isle d'Abeau Cedex, France

\*Auteur correspondant : [agathe.bourchy@ifsttar.fr](mailto:agathe.bourchy@ifsttar.fr)

### 1. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Un certain nombre d'auteurs se sont déjà penchés sur la question de l'effet d'ajouts minéraux dans le ciment et sont d'accord pour dire que leur présence modifie les processus d'hydratation [1, 2].

Husson a montré que la présence d'additions minérales accélère les réactions d'hydratation au jeune âge, par effets physicochimiques, mais qu'à long terme, ces additions peuvent avoir un effet retardateur [3]. De manière générale, la présence d'additions minérales dans le ciment diminue la chaleur d'hydratation émise au jeune âge [4] et augmente les résistances en compression pour de faibles pourcentages quel que soit le type d'addition [5].

Boudchicha affirme que le laitier, de par son irrégularité de surface a un effet défavorable sur l'empilement granulaire, ce qui a deux effets : une augmentation de la demande en eau, et une diminution des résistances en compression au jeune âge. Cet effet ne sera compensé qu'à plus long terme, lorsque l'activité pouzzolanique du laitier entrera en action (effet chimique) [6]. En effet, Demirboga, montre que le laitier diminue les résistances en compression à 28j mais les augmente à 120j [7]. La présence de filler calcaire quant à lui, engendrerait une augmentation des résistances mécaniques à 7j mais deviendrait négligeable à 28j [8], expliqué par la réaction du filler calcaire avec le C3A et C4AF présents dans le clinker et conduisant à la formation d'aluminates et de carboaluminates (effet physicochimique) ainsi que son effet favorable sur l'empilement

granulaire (effet filler) [6, 9] et sur l'hydratation de par son rôle de sites de nucléation [2, 10, 11].

Quant aux compositions chimiques et minéralogiques, les phases silicates et aluminates avec principalement le C3S et le C3A sont très réactives. La présence d'un régulateur de prise est nécessaire pour limiter l'hydratation du C3A et la formation d'hydroaluminates de calcium [12]. Cela permet à la fois d'éviter le durcissement du matériau sans obtention de résistances mécaniques après le mélange avec l'eau mais aussi de diminuer la quantité de chaleur émise lors de l'hydratation [13].

Enfin, concernant l'effet de la finesse des anhydres, Costoya et Bentz *et al.* s'accordent sur le fait que l'augmentation de la finesse accélère les vitesses d'hydratation, ce qui raccourci le temps de prise, augmente la demande en eau, les résistances en compression au jeune âge ainsi que la quantité de chaleur d'hydratation dégagée sur un temps court [14, 15].

Cependant, peu de résultats existent sur l'interaction ciment-additions-finesse et sur la primauté de l'effet de l'un sur l'autre.

## 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Suite au manque de connaissances mis en évidence dans le paragraphe précédent, il est décidé d'orienter cette étude vers l'influence de la finesse du ciment, la quantité de sulfates sous forme d'anhydrite et de la nature et du pourcentage d'ajout sur la thermomécanique du ciment au jeune âge. Pour cela, dans un même clinker, un ajout de type filler calcaire et un ajout pouzzolanique de type laitier seront utilisés afin de comparer

leurs effets sur la chaleur dégagée ainsi que les propriétés mécaniques obtenues. Par ailleurs, afin d'étudier l'influence du C3A, deux clinkers avec différents pourcentages de C3A seront utilisés avec les ajouts. Une caractérisation de chaque ciment anhydre sera réalisée, ainsi qu'à l'état frais et à l'état durci.

### 2.1. Matériaux utilisés

Les clinkers ont été sélectionnés selon leur concentration en C3A et  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ . Il s'agit de clinkers fabriqués en cimenterie par un procédé habituel. Un plan d'expérience est réalisé pour chaque type de clinker.

Le premier clinker sélectionné contient un pourcentage de C3A relativement élevé d'environ 7 % et des teneurs modérées en alcalins et sulfates (0,7 %  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  et 0,7 %  $\text{SO}_3$ ). Il est noté C3A-7. Le deuxième clinker sélectionné ne contient pas de C3A. Ce clinker atypique, est donc intéressant de par sa composition et son comportement au jeune âge mais aussi pour mieux comprendre l'hydratation du C4AF. Il est noté C3A-0. Sa teneur en alcalins s'élève à 0,5 %  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  et 1,5 %  $\text{SO}_3$ .

L'influence de deux ajouts différents dans le ciment est étudiée : un laitier granulé de haut fourneau broyé dans un broyeur à boulets à un Blaine à  $4170 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , et un filler calcaire provenant de Saint Hilaire avec un Blaine à  $8360 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . En effet, il est reconnu dans la littérature que la présence d'ajout dans le ciment réduit la quantité de chaleur dégagée au jeune âge du ciment par effet de dilution.

Les bornes des ajouts sont délimitées par celles contenues dans la norme NF EN 197-1 sur les ciments Portland CEM I, ciments Portland au laitier CEM II/A ou B-S, ciments Portland

Phase	Clinker C3A-7	Clinker C3A-0	Filler calcaire	Laitier	Anhydrite
C3S	64	60	-	5	-
C2S	14	22	-	2	-
C3A	7	-	-	-	-
C4AF	12	18	-	1	-
Anhydrite + Gypse	-	-	-	1	90
Akermanite + Merwinite + Yeelemite	-	-	-	2	-
Chaux + Portlandite	1	<1	-	-	-
Arcanite + Aphthitalite	1	<1	-	-	-
Magnésite + Dolomite	-	-	-	-	9
Calcite	-	-	99	-	-
Périclase + Quartz + Mayenite	1	-	<1	-	1
Amorphes	-	-	-	89	-

Tableau 2-1 : Compositions minéralogiques des matériaux utilisés (déterminées par DRX).

Oxyde	Clinker C3A-7	Clinker C3A-0	Filler calcaire	Laitier	Anhydrite
SiO <sub>2</sub>	21,0	21,1	0,5	34,4	1,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,7	3,5	0,1	10,2	0,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,3	6,8	0,3	1,1	0,2
CaO	65,1	64,4	55,5	45,0	38,0
MgO	1,7	0,8	0,4	6,0	2,9
SO <sub>3</sub>	0,7	1,9	0,1	0,7	52,0
K <sub>2</sub> O	0,7	0,6	< 0,1	0,3	0,1
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
SrO	0,1	0,1	< 0,1	0,1	0,2
TiO <sub>2</sub>	0,3	0,2	< 0,1	0,6	< 0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,4	0,2	< 0,1	0,1	< 0,1
MnO	0,1	0,1	< 0,1	0,2	< 0,1
Cl	< 0,01	-	-	< 0,1	-
Perte au feu	0,6	0,4	43,4	-0,17	4,9
Sulfures	-	-	-	0,6	-

**Tableau 2-2 : Compositions chimiques des matériaux utilisés (déterminées par FX).**

	D <sub>10</sub> (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	D <sub>90</sub> (μm)	Blaine (cm <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	Masse volumique (g.cm <sup>-3</sup> )
Filler calcaire	1,1	6,1	70,7	8360	2,71
Laitier	2,1	12,2	46,6	4170	2,95

**Tableau 2-3 : Caractéristiques physiques du filler calcaire et du laitier.**

au calcaire CEM II/A ou B-L ou LL et ciments de haut fourneau CEM III/A ou B [16]. Ainsi, les valeurs de laitier varient entre 5 et 80 % et celles du filler entre 5 et 35 %. A noter que le laitier sera ajouté dans les deux types de clinker alors que le filler ne sera ajouté que dans le clinker C3A-7 pour des raisons de temps de réalisation.

Par ailleurs, la concentration en sulfates dans le ciment semble modifier la cinétique de prise du ciment [17]. De ce fait, il est décidé de faire varier la quantité de sulfates présents sous forme d'anhydrite, entre 3,85 % et 7,85 %, par ajout d'anhydrite naturelle contenant 3 % de gypse et 86 % d'anhydrite.

Les ciments sont obtenus par co-broyage du clinker et de l'anhydrite dans un broyeur dit pilote, à boulets de débit moyen (500 kg.h<sup>-1</sup>) avec séparateur dynamique et qui correspond à la copie d'un broyeur industriel. Puis les pré-mélanges clinker-anhydrite sont mélangés avec l'ajout (laitier ou filler calcaire) à l'aide d'un mélangeur industriel de 400 kg.

Les caractéristiques minéralogiques, chimiques et physiques des matériaux sont détaillées dans les tableaux 2-1, 2-2 et 2-3.

## 2.2. Nomenclature

Afin de faciliter la lecture, une nomenclature est adoptée. Elle reprend les trois paramètres sélectionnés dans les plans d'expérience et le type de clinker utilisé. Chaque échantillon portera un nom comme suit :

CK\_%ajout\_%A\_finesse

Cette nomenclature se divise comme suit :

- CK correspond au type de clinker utilisé et sera donc remplacé par C3A-7 pour le clinker fort C3A ou C3A-0 pour le clinker sans C3A
- %ajout correspond au pourcentage de l'ajout et sera donc remplacé par le pourcentage ajouté suivi de la lettre S pour laitier ou LL pour filler calcaire
- %A correspond au pourcentage d'anhydrite et sera donc remplacé par le pourcentage d'anhydrite ajouté
- finesse correspond au D<sub>50</sub> cible du clinker-anhydrite (μm)

De manière générale les familles de ciments sont notées C3A-7\_LL ; C3A-7\_S et C3A-0\_S.

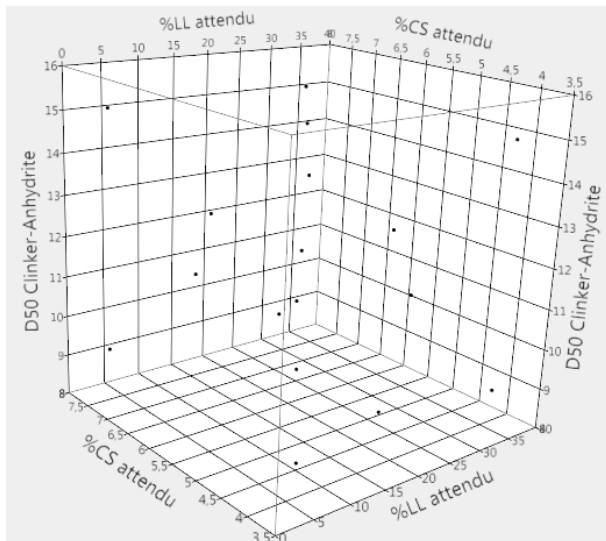


Figure 2-1 : Disposition des essais dans l'espace pour une matrice composite.

### 2.3. Méthodologie des plans d'expérience

Afin de limiter le nombre d'expériences à réaliser tout en permettant une étude du système assez détaillée, il est choisi de faire varier 3 paramètres sur 3 niveaux. Pour chacun des deux clinkers, les paramètres sont la quantité d'ajout, la quantité d'anhydrite et la finesse du pré-mélange clinker-anhydrite. L'utilisation de plans d'expérience composites semble la méthode la plus appropriée. En effet, ce type de plan confère une bonne qualité de prévision, et ce même aux sommets du cube (variance inférieure à un) et permet d'estimer dix coefficients pour seulement 15 essais. La matrice composite est également plus robuste aux points susceptibles d'être aberrants.

Ainsi, les gammes de variation des facteurs seront les suivantes :

- 5 ; 20 ou 35 % de filler calcaire
- 5 ; 42,5 ou 80 % de laitier
- 3,85 ; 5,85 et 7,85 % d'anhydrite soit une variation de 2,00 ; 3,04 et 4,08 % de SO<sub>3</sub>
- 9 ; 12 ou 15  $\mu\text{m}$  pour le D50 du co-broyage clinker-anhydrite

Suite à la sélection des bornes de travail pour les différents matériaux utilisés et au logiciel d'analyse des plans d'expérience JMP, les compositions obtenues sont référencées dans le tableau ci-dessous. Les bornes de travail de l'anhydrite sont fixées à 3,85 ; 5,85 et 7,85 % pour éviter toutes valeurs zéro dans les réponses des plans d'expérience.

La figure 2-1 donne un exemple de la localisation des compositions de ciment obtenues dans l'espace Filler-Anhydrite-D50 Clinker-Anhydrite avec leurs compositions détaillées dans le tableau 2-4.

### 2.4. Techniques d'analyse

Les ciments sont caractérisés :

- minéralogiquement par Diffraction des rayons X (DRX) avec la raie  $K\alpha_1$  du cuivre de longueur d'onde  $\lambda = 1,54059 \text{ \AA}$  pour  $2\theta$  compris entre  $5^\circ$  et  $65^\circ$ ,

Nom de l'échantillon	D <sub>50</sub> Clinker + CaSO <sub>4</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Filler (%)	CaSO <sub>4</sub> (%)	Clinker (%)
C3A-7_5LL_3,85A_15	15,00	5,00	3,85	91,15
C3A-7_5LL_3,85A_9	9,00	5,00	3,85	91,15
C3A-7_20LL_3,85A_12	12,00	20,00	3,85	76,15
C3A-7_35LL_3,85A_15	15,00	35,00	3,85	61,15
C3A-7_35LL_3,85A_9	9,00	35,00	3,85	61,15
C3A-7_5LL_5,85A_12	12,00	5,00	5,85	89,15
C3A-7_20LL_5,85A_15	15,00	20,00	5,85	74,15
C3A-7_20LL_5,85A_12	12,00	20,00	5,85	74,15
C3A-7_20LL_5,85A_9	9,00	20,00	5,85	74,15
C3A-7_35LL_5,85A_12	12,00	35,00	5,85	59,15
C3A-7_5LL_7,85A_9	9,00	5,00	7,85	87,15
C3A-7_5LL_7,85A_15	15,00	5,00	7,85	87,15
C3A-7_20LL_7,85A_12	12,00	20,00	7,85	72,15
C3A-7_35LL_7,85A_9	9,00	35,00	7,85	57,15
C3A-7_35LL_7,85A_15	15,00	35,00	7,85	57,15

Tableau 2-4 : Composition des mélanges à réaliser pour le plan d'expérience avec le filler calcaire comme ajout et le clinker C3A-7.

- chimiquement par Fluorescence X (FX) et perte au feu à  $900^\circ\text{C}$ ,
- physiquement par mesure de la masse volumique et surface Blaine et de la finesse par granulométrie laser afin de déterminer la distribution granulométrique : le degré de distribution  $n$  Rosin Rammler qui correspond à l'uniformité du matériau c'est-à-dire à l'étendue de la gaussienne représentant la distribution granulométrique [18]. La courbe granulométrique est d'autant plus resserrée que le paramètre  $n$  est grand,
- thermiquement par mesure de chaleurs d'hydratation par microcalorimétrie isotherme et Langavant selon la norme NF EN 196-9 [19],
- mécaniquement par mesure de temps de prise selon la NF EN 196-3 [20] et par mesure de résistances mécaniques en compression sur des éprouvettes  $4*4*16 \text{ cm}$  selon la norme NF EN 196-1 [21].

## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, les résultats obtenus à la suite des plans d'expérience ciments (C3A-7\_LL ; C3A-7\_S et C3A-0\_S) sont présentés puis discutés, en s'attachant particulièrement à l'état frais et à l'évolution des chaleurs d'hydratation au cours du temps.

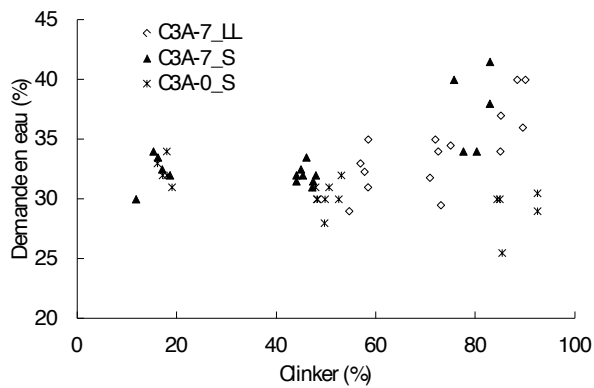


Figure 3-1 : Evolution de la demande en eau en fonction du pourcentage de clinker dans le ciment.

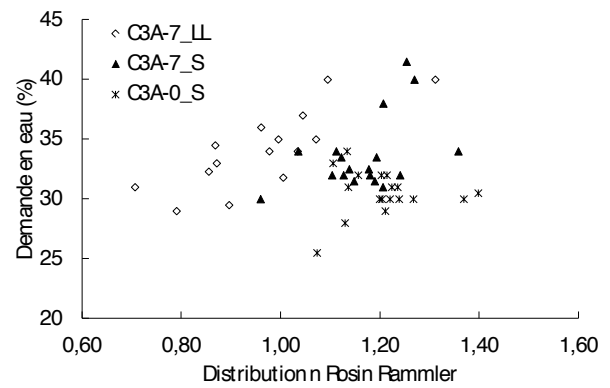


Figure 3-2 : Evolution de la demande en eau en fonction de la distribution n Rosin Rammler.

### 3.1. Influence des facteurs sur l'état frais

La connaissance des caractéristiques du ciment à l'état frais, et particulièrement la demande en eau et le temps de fin de prise sont importants pour déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre des mortiers et des bétons.

Les figures 3-1 et 3-2 représentent respectivement l'évolution de la demande en eau selon le pourcentage de clinker présent dans le ciment et selon la distribution n Rosin Rammler, et ce pour les trois plans d'expériences, et met en évidence la tendance suivante : la demande en eau des ciments avec clinker C3A-7 et filler calcaire ou laitier, augmente avec la quantité de clinker et le paramètre n. Ce comportement n'est pas mis en évidence dans le cas des ciments avec clinker C3A-0. Les ciments ayant les plus grandes demandes en eau sont soit ceux avec le clinker C3A-7 peu additionnés de filler calcaire ou de laitier et le diamètre médian le plus petit, soit ceux avec le clinker C3A-0 fortement additionnés en laitier, peu importe la finesse.

Trois éléments peuvent expliquer ces résultats : l'effet de l'addition (filler calcaire ou laitier), l'effet du type de clinker utilisés et la distribution granulométrique du ciment.

Tout d'abord, contrairement au filler calcaire, le laitier possède une surface non sphérique et granuleuse ce qui a pour effet d'augmenter l'adsorption d'eau puis la réaction des particules et donc augmenter ainsi la demande en eau [6]. Le filler calcaire quant à lui, de par sa présence, favorise l'optimisa-

tion du squelette granulaire et a donc un effet bénéfique sur la demande en eau des ciments [22].

Il existe aussi une différence de composition des clinkers. En effet, il y a du C3A dans l'un et pas dans l'autre. Or, il est reconnu que le C3A, s'hydrate rapidement pour former des cristaux d'ettringite. Ce sont ces réactions d'hydratation rapides, en plus de l'adsorption d'eau sur les grains qui augmentent la demande en eau [12, 23].

Enfin, en plus de l'effet de la finesse de par l'augmentation de la surface spécifique avec la diminution du diamètre médian sur la demande en eau [14, 15], Sprung *et al.* indique que plus la distribution granulométrique est resserrée, plus l'empilement granulaire sera mauvais et donc plus il y aura de vides dans lesquels l'eau peut être bloquée lors du gâchage et ainsi augmenter la demande en eau du ciment [24].

A la vue des résultats, il résulte que la distribution granulométrique et l'effet du C3A, de par la composition du clinker, prime sur l'effet de l'addition sur la demande en eau du ciment et que plus le pourcentage de C3A est élevé, plus la demande en eau est forte.

Les figures 3-3 et 3-4 représentent respectivement l'évolution du temps de début de prise selon le pourcentage de clinker et selon la distribution n Rosin Rammler. Comme pour les mesures de demande en eau, il est possible de voir deux tendances pour les temps de début de prise. Les mesures correspondant aux ciments avec clinker C3A-7 et filler calcaire, montrent une évolution croissante des temps de début

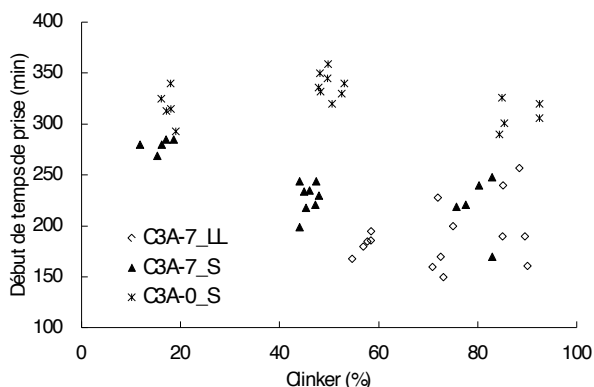


Figure 3-3 : Evolution du début de prise en fonction du pourcentage de clinker dans le ciment.

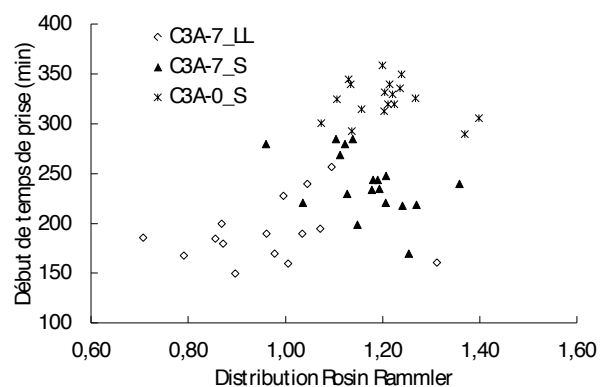


Figure 3-4 : Evolution du début de prise en fonction de la distribution n Rosin Rammler.

de prise avec la quantité de clinker ainsi qu'avec le degré de distribution  $n$  Rosin Rammler alors que ceux avec clinker C3A-7 ou C3A-0 et laitier présentent une évolution stable ou décroissante des temps de début de prise avec la quantité de clinker.

Pour les ciments C3A-7\_LL, les temps de prise les plus longs sont ceux où il y a peu de filler calcaire, avec un diamètre médian faible et de manière indépendante de la quantité d'anhydrite.

Pour les ciments C3A-7\_S, les temps de prise les plus longs correspondent aux compositions avec le plus de laitier, et ce sans effet de l'anhydrite ni de la finesse.

Enfin, pour les ciment C3A-0\_S, les plus grands temps de prise sont ceux pour les ciments avec beaucoup de laitier et une quantité d'anhydrite faible, étant donné que les sulfates permettent l'activation du laitier. Cet effet d'activation est plus visible pour ces ciments sans C3A. A noter que tous les temps de prise mesurés pour ces ciments sont plus longs que ceux pour C3A-7\_S, ce qui est expliqué par la présence de C4AF seul qui est plus lent à réagir que le C3A.

Ces résultats peuvent être expliqués par plusieurs phénomènes : l'effet de l'addition, l'effet du type de clinker utilisé, l'effet du retardateur de prise et l'effet de la finesse.

Tout d'abord, le filler calcaire joue un rôle important au jeune âge, à la fois grâce à ses sites de nucléation et à sa réactivité avec les aluminates de calcium présents dans le clinker [2, 11]. Au contraire, le laitier ne réagit que tardivement suite à son activation par la portlandite formée au cours de l'hydratation et par les sulfates apportés par l'anhydrite [25]. L'effet d'activation du laitier par les sulfates est principalement visible pour les ciments C3A-0\_S, ce qui s'explique par l'absence de C3A qui consomme habituellement les sulfates.

Ensuite, l'hydratation plus rapide du C3A par rapport au C4AF explique la prise plus rapide des ciments avec le clinker C3A-7. A noter, que l'effet de la finesse n'est visible que pour les ciments C3A-7\_LL, contenant peu de filler calcaire où la finesse influe sur la réactivité du clinker et accélère la prise. En effet, contrairement aux résultats obtenus avec les ciments au filler calcaire, où les temps de début de prise augmentent avec le degré de distribution  $n$ , les temps de début de prise les plus importants sont ceux avec les plus faibles degrés de distribution  $n$  pour les ciments avec laitier. Ainsi lorsque les ciments sont au filler calcaire, le mauvais empilement granulaire dû à la faible étendue de la distribution granulaire a un effet plus important

que lorsque les ciments sont au laitier de par son effet retard sur les réactions d'hydratation par rapport à l'effet de la finesse. A la vue des résultats, il résulte que le type et la quantité d'addition et l'effet du C3A, de par la composition du clinker, prime sur l'effet de la finesse sur le temps de prise et que l'effet des sulfates sur le laitier est visible lorsqu'il n'y a pas de C3A.

### 3.2. Effet des facteurs sur l'évolution vers un état durci

En plus de l'étude de l'état frais, il est important de connaître la quantité de chaleur afin d'évaluer le temps de coffrage nécessaire et le risque de réaction sulfatique interne. L'analyse des résultats obtenus par mesure de chaleur Langavant permet d'avoir la chaleur totale dégagée lors de l'hydratation sur une semaine, le flux thermique ou puissance qui correspond à la dérivée de la chaleur au cours du temps et le retard qui correspond au moment où le flux de chaleur atteint son maximum. Celui-ci peut être soit obtenu directement par la mesure soit corrigé en prenant en compte la thermoactivation du matériau.

La figure 3-5 représente l'évolution de la chaleur d'hydratation à 168h mesurée par calorimètre de Langavant en fonction du pourcentage de clinker dans le ciment. Comme attendu, la quantité de chaleur dégagée augmente avec le pourcentage de clinker.

Les ciments C3A-0\_S dégagent des chaleurs moins importantes que les ciments C3A-7\_S, ce qui peut être expliqué par l'absence de C3A et la présence de C4AF, phase minéralogique moins réactive et moins exothermique ( $865 \text{ J.g}^{-1}$  pour le C3A et  $418 \text{ J.g}^{-1}$  pour le C4AF [26]). Ceci n'est pas vrai lorsque la quantité de laitier devient trop importante (80 % de laitier), car dans ce cas, le laitier est le réactif majoritaire du ciment.

Par ailleurs, il est reconnu que la présence d'ajouts dans le ciment, que ce soit du filler calcaire ou du laitier, ainsi que l'augmentation du diamètre médian diminuent la quantité de chaleur dégagée [4, 14, 15]. Les ciments C3A-7\_S dégagent plus de chaleur que ceux C3A-7\_LL de par la réactivité pouzzolanique du laitier.

Enfin, la quantité d'anhydrite ne semble pas avoir d'effet sur la chaleur dégagée.

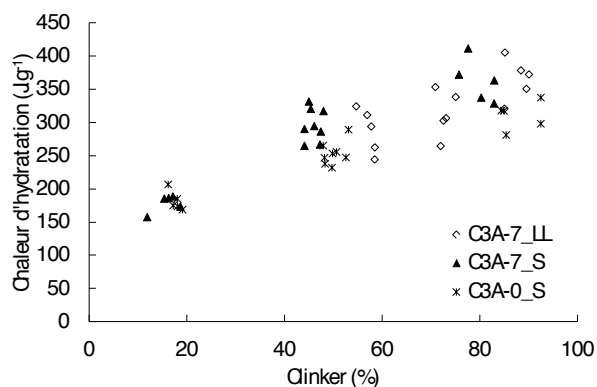


Figure 3-5 : Evolution de la chaleur d'hydratation à 168h en fonction du pourcentage de clinker dans le ciment.

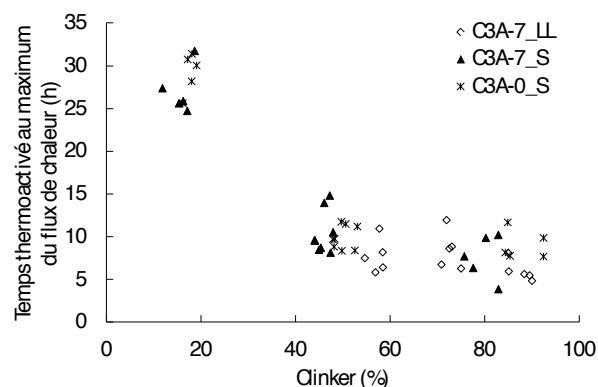
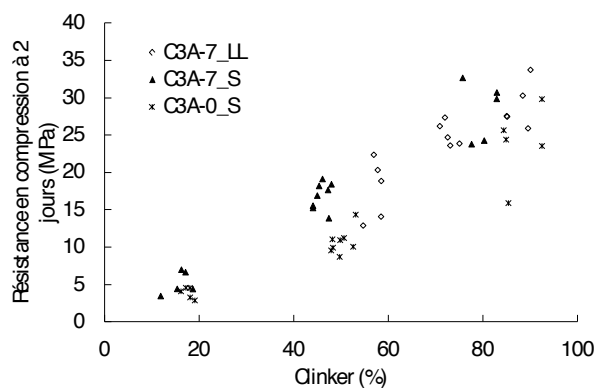
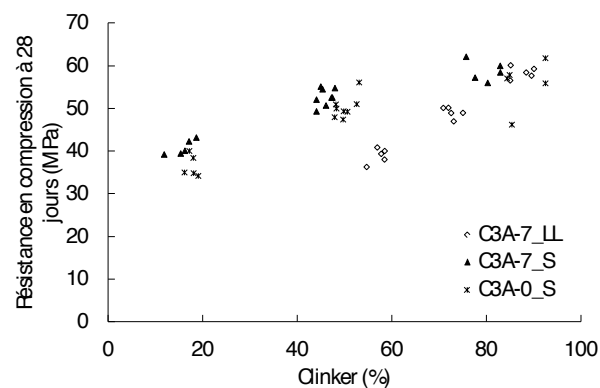


Figure 3-6 : Evolution du retard en fonction du pourcentage de clinker dans le ciment.



**Figure 3-7 : Evolution des résistances en compression à 2 jours en fonction du pourcentage de clinker dans le ciment.**



**Figure 3-8 : Evolution des résistances en compression à 28 jours en fonction du pourcentage de clinker dans le ciment.**

La figure 3-6 représente l'évolution du temps où le flux de chaleur est maximal, exprimé en temps corrigé par rapport à la thermoactivation, en fonction du pourcentage de clinker dans le ciment. La prise en compte de la thermoactivation permet de corriger les temps réels mesurés selon la température obtenues si les essais avaient été réalisés en conditions adiabatiques. Les températures adiabatiques calculées sont différentes selon la composition de chaque ciment. L'addition croissante d'ajouts dans le ciment a pour effet de diminuer la température adiabatique, et ce de façon encore plus visible pour le laitier par rapport au filler calcaire.

Ainsi, l'augmentation de la quantité d'ajouts dans le ciment, augmente le retard. Pour des pourcentages faibles à moyens (de 5 à 35 pour le filler calcaire ou 42,5 pour le laitier), il est possible de voir que les effets sur le retard semblent équivalents, mais que pour les très grands pourcentages de laitier, le retard peut être triplé. Ceci s'explique par l'activité pouzzolannique du laitier qui répartit la production de chaleur au court du temps, contrairement au clinker qui produit rapidement un pic de chaleur et donc un retard plus faible.

Par ailleurs, il est possible de constater que les ciments C3A-7\_S et C3A-0\_S présentent une légère différence qui met en avant la plus lente réactivité des ciments au C4AF par rapport à ceux au C3A.

Les figures 3-7 et 3-8 représentent l'évolution des résistances en compression à 2 et 28 jours en fonction du pourcentage de clinker présent dans les ciments. Les résistances en compression à 2 jours sont similaires pour les ciments C3A-7\_LL et C3A-7\_S alors que les ciments C3A-0\_S présentent des résistances nettement inférieures aux deux types de ciments. Au contraire, les résistances en compression à 28 jours présentent des résultats différents : les résistances obtenues pour les ciments contenant du laitier sont supérieures à celles contenant du filler calcaire.

Ceci peut être expliqué par plusieurs phénomènes : l'effet de l'addition et l'effet du type de clinker.

Au jeune âge, le filler calcaire, contrairement au laitier a deux effets : un effet filler et site de nucléation favorisant l'hydratation du ciment et un effet chimique de par son hydratation avec les aluminates de calcium présents dans le ciment, alors que le laitier est peu réactif au jeune âge. Ainsi, les résistances en compression au jeune âge sont quasiment identiques à 2 jours pour C3A-7\_LL et C3A-7\_S. L'infériorité des résis-

tances obtenues pour les ciments C3A-0\_S s'explique par la composition du clinker et l'absence de C3A, plus réactif que le C4AF.

Les résistances obtenues sur le long terme mettent au contraire, en évidence la réactivité du laitier de par son action pouzzolannique, à la différence du filler calcaire, donnant ainsi des résistances supérieures pour les ciments au laitier par rapport à ceux au filler calcaire. A noter également que l'absence de C3A dans le ciment C3A-0\_S implique une réactivité plus lente et donc des résistances légèrement plus faibles.

Ainsi au jeune âge, l'effet du clinker de par sa composition prime sur l'effet de l'addition, alors qu'à plus long terme, c'est l'effet de l'addition qui devient majoritaire sur les résistances.

## 4. CONCLUSION

Grâce à ces essais, il a été possible de mettre en évidence l'effet de l'addition, de la composition du clinker, principalement du C3A et de la finesse sur les caractéristiques du ciment, de l'état frais – mesure de la demande en eau et du temps de prise – à l'état durci – chaleur d'hydratation et résistances mécaniques. La demande en eau est plus influencée par la distribution granulométrique et l'effet du C3A que par la présence d'addition, alors que pour le temps de prise c'est la présence d'addition en plus du C3A qui prime sur la finesse et que l'effet activateur des sulfates sur le laitier est plus efficace lorsqu'il n'y a pas de C3A dans le ciment.

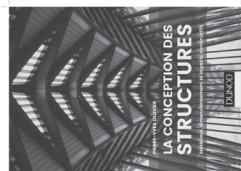
Enfin, une fois le ciment durci et dans le cas de cette étude, c'est l'effet de l'addition et l'effet du C3A qui influencent le plus la quantité de chaleur dégagée lors de l'hydratation. Concernant les résistances mécaniques, au jeune âge, l'effet du clinker de par sa composition prime sur l'effet de l'addition, alors qu'à plus long terme, c'est l'effet de l'addition qui devient majoritaire.

## 5. RÉFÉRENCES

- [1] Bessa-Badreddine A, Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers. 2004, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise.

- [2] Berodier E, Impact of the supplementary cementitious materials on the kinetics and microstructural development of cement hydration. 2015, Science et génie des matériaux, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [3] Husson S, Etude physicochimique et mécanique des interactions ciment-fillers. Application aux mortiers. 1991, Génie des procédés, Ecole nationale supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- [4] Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD, Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41:1244-1256.
- [5] Amouri C, Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, performances, durabilité). 2009, Génie civil, Université Mentouri Constantine.
- [6] Boudchicha A, Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons. 2007, Génie civil, Université Mentouri Constantine.
- [7] Demirboga R, Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar. *Energy and building*, 2003, 35:189-192.
- [8] Lawrence P, Cyr M, Ringot E, Minearl admixtures in mortars: effet of type, amount and fineness of fine constituent on compressive strength. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35:1092-1105.
- [9] Cyr M, Lawrence P, Ringot E, Efficiency of mineral admixtures in mortars, Quantification of physical and chemical effects of fines admixtures in relation with compressive strength. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36:264-277.
- [10] Kadri EH, Aggoun S, De Schutter G, Ezziane K, Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration. *Mater Struct*, 2010, 43:665-673.
- [11] Gutteridge WA, Dalziel JA, Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement: Part I. A fine non-hydraulic filler. *Cement and Concrete Research*, 1990, 20:778-782.
- [12] Minard H, Etude intégrée des processus d'hydratation, de coagulation, de rigidification et de prise pour un système C3S-C3A-sulfates-alkalins. 2003, Chimie - Physique, Université de Bourgogne - UFR des Sciences et Techniques.
- [13] Kocaba V, Development and evaluation of methods to follow microstructural development of cementitious systems including slags. 2009, Science et génie des matériaux, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- [14] Costoya Fernandez MM, Effect of particule size on the hydration kinetics and microstructural development of tricalcium silicate. 2008, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [15] Bentz DP, Garboczi EJ, Haecker CJ, Jensen OM, Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29:1663-1671.
- [16] AFNOR. 2012. NF EN 197-1, Méthodes d'essais des ciments Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- [17] Frigione G, Gypsum in cement. *Advances in Cement Technology*, 1983, 485-532.
- [18] Vesilind PA, The Rosin-Rammler particle size distribution. *Resource Recovery and Conservation*, 1980, 5:275-277.
- [19] AFNOR. 2010. NF EN 196-9, Méthodes d'essais des ciments Partie 9 : Chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique.
- [20] AFNOR. 2009. NF EN 196-3+A1, Méthodes d'essais des ciments. Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité.
- [21] AFNOR. 2006. NF EN 196-1, Méthode d'essais des ciments. Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques.
- [22] Ferraris CF, Obla KH, Hill R, The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31:245-255.
- [23] Locher FW, Sprung S, Korf P, The effet of the particle size distribution and properties strength of Portland cement. *Zement - Kalk - Gips International*, 1973, 26:349-355.
- [24] Sprung S, Kuhlmann K, Ellerbrock HG, Particle size distribution and properties of cement. Part II. Water demand of Portland cement. *Zement - Kalk - Gips International*, 1985, 38:528-534.
- [25] Divet L, Le Roy R, Van Rompaey G, Hydratation du laitier de haut fourneau. *LCPC - Ecole des Ponts et Chaussées*, 2006,
- [26] Hewlett PC, *Elsevier*, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition. 2003.

PUBLICATION D'UN LIVRE D'UN DES AUTEURS DES ANNALES DU BTP



<https://www.dunod.com/sciences-techniques/conception-structures-matieres-dimensionnement-et-aspects-constructifs>

La conception des structures

Matériaux, dimensionnement et aspects constructifs

Collection : Hors collection, Dunod  
Parution : mai 2017

Pierre-Yves Olivier, consultant indépendant en construction Ingénieur Polytech Lille, département géotechnique, génie civil, a travaillé 5 ans en tant qu'ingénieur conseil chez Schlach Bergermann und partner (Allemagne) sur divers projets en acier, béton ou câbles : pont-passerelle du Mont Saint-Michel, passerelle de la paix (Lyon), pont Nhât Tan (Vietnam), Pont Telekom (Bonn), stade de Varsovie.

Présentation du livre

N'avez-vous jamais été émerveillé devant la Passerelle de la paix franchissant le Rhône, retenu votre souffle en traversant le pont de l'Anarville suspendu dans les airs ou bien encore impressionné par certains ouvrages comme l'Atomium ou le parlement européen à Luxembourg ? Au-delà de l'aspect technique et normatif, l'élégance des structures et des constructions elles-mêmes suscitent l'envie de comprendre les contraintes à dompter ou à contourner pour les réaliser.

Tout en se basant sur les principes fondateurs de la science des structures et des matériaux, cet ouvrage traite de la conception des structures dans l'art de construire : formes géométriques, matériaux, dimensions, etc. Très illustré par des photos d'ouvrages existants, des schémas, des plans, il offre un panorama complet des différentes possibilités en matière de conception. Une vraie incitation à l'innovation !

Sommaire de l'ouvrage

- L'art de construire. Formes géométriques des structures.** Lignes. Surfaces. Volumes.
- Les matériaux.** Propriétés générales. Les roches. La terre (crue et cuite). Le bois. Le fer, l'aluminium et l'acier. Le béton. Les membranes.
- Modélisation.** A la main ou à l'ordinateur. Les éléments de la modélisation.
- Analyse statique.**
- Analyse dynamique.**
- Dimensionnement.**
- Aspects constructifs et normatifs.**



ASCO TP est une association partenaire de l'Union des Associations Françaises de Génie Civil UAFGC et des Annales. Ne pas hésiter à visiter son site.

<http://www.asco-tp.fr/newslettre/>



Batissiel Plus : le concours des territoires intelligents 9 septembre 2017

En 2018, le concours s'ouvre aussi à l'enseignement supérieur pour des équipes constituées d'étudiants (BTS, DUT, école d'ingénieurs...).

[Lire la suite](#)



En France, un aménagement hydroélectrique hors normes 26 août 2017

Aux portes de l'Oisans, dans une vallée étroite, EDF mène actuellement le plus grand chantier hydroélectrique en France.

[Lire la suite](#)



Fermeture du Tunnel du Chambon 20 août 2017

Après une ouverture partielle le 13 juillet, en saison estivale, le tunnel sera de nouveau fermé le 21 août 2017 pour finalisation des travaux.

[Lire la suite](#)



"Ripage" d'une dalle de 7 000 tonnes 17 août 2017

Ce week-end du 15 août s'est déroulé le "ripage" nocturne de la dalle de couverture de la future gare "Fort d'Issy-Vanves-Clamart" du Grand Paris express.

[Lire la suite](#)

Une passerelle "lancée" au-dessus de l'autoroute A5 14 août 2017

Une structure métallique longue de 105 mètres, large de 4 mètres et d'un poids de 160 tonnes a été lancée au-dessus de l'A5a, à hauteur de Lieusaint.

[Lire la suite](#)



## Conférence

# Développement en Afrique et Infrastructures

Sous le patronage de la Commission nationale française pour l'UNESCO  
et de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer

**Mercredi 13 décembre 2017**

**Bulletin n° 3**

**UNESCO - Paris**  
**Salle XIII - Bonvin**  
**Maison de l'UNESCO - 1, rue Miollis - 75015 Paris**

Siège social  
UIATI-UISF - Maison de l'UNESCO - 1, rue Miollis - F-75732 PARIS Cedex 15  
Tel : 33 (0)1 45 68 48 27 Courriel : [subs@uisf.fr](mailto:subs@uisf.fr) Site : <http://uiati.usf.fr>

1

14 septembre 2017

# Développement en Afrique et Infrastructures

## PRÉSENTATION

Depuis 2009, en collaboration étroite avec nos réseaux et nos partenaires en Afrique, nous avons entrepris un important programme de coopération sur le thème "*Education, Science et Technologie pour le Développement en Afrique*" (voir annexe 2).

Le travail accompli jusqu'en 2014 était indispensable pour garantir l'adéquation entre nos interventions et les besoins du terrain. Il constituait un socle solide pour engager une nouvelle étape dès 2015. La dynamique qui s'est développée durant cette période nous incite à persévérer avec confiance. Notons le constat capital suivant qui ressort de ce travail :

- L'Afrique est le continent où la population est la plus jeune au monde et son avenir dépend de sa jeunesse. Bientôt 40% des naissances dans le monde auront lieu en Afrique.
- Dans les prochaines décennies, l'Afrique comptera plus de 2 milliards d'habitants dont la moitié, près d'un milliard, sera constituée par des jeunes de moins de 25 ans. Le flux de jeunes arrivant sur le marché du travail dépassera les 20 millions par an. Le secteur public ne pourra pas l'absorber.
- En même temps, la population d'Afrique francophone atteindra 800 millions dont près de 400 millions seront des jeunes de moins de 25 ans.
- Ces jeunes peuvent être un grand atout pour le continent, mais ils peuvent rapidement devenir un handicap lourd de conséquences si rien n'est fait (migration, troubles, recul de la paix et de la sécurité, accroissement de la pauvreté, ...).

L'accès des jeunes à l'emploi est une priorité absolue. C'est une condition nécessaire pour assurer le progrès et la stabilité. Pour relever ce défi majeur, il y a lieu d'agir sur deux plans :

- Donner aux jeunes une éducation adaptée qui les prépare au monde du travail.
- Développer une stratégie de croissance de secteurs créateurs d'emplois et de richesse et faire appel à des entrepreneurs et aux entreprises qui recrutent.

Aujourd'hui, les performances économiques de l'Afrique sont encourageantes et la période est propice pour agir.

Nous sommes en présence d'un chantier vaste, complexe et varié. Il représente un enjeu socio-économique très lourd.

Nous sommes prêts à apporter notre concours à la hauteur de nos moyens. Le thème "*Accès des jeunes à l'emploi et le développement en Afrique*" occupe aujourd'hui une place centrale dans nos activités de coopération. Nous intervenons en mobilisant nos spécialistes et nos réseaux régionaux. Nous recherchons également la collaboration et les échanges avec des partenaires qualifiés. Les besoins sont énormes et il est nécessaire de rassembler les efforts. Nos interventions comprennent la tenue périodique de Conférences à l'UNESCO-Paris. Les programmes portent principalement sur l'approfondissement de questions techniques liées au développement technico-économiques, sur une synthèse des travaux réalisés et sur la préparation des étapes suivantes. Notre apport, si minime soit-il, vise à contribuer au lancement d'une dynamique nécessaire. Le temps presse.

2

14 septembre 2017

Les Journées "**Jeunesse et développement en Afrique**", que nous avons organisées à l'UNESCO en février 2015, ont suscité un vif intérêt. Elles étaient co-présidées par 2 Ambassadeurs auprès de l'UNESCO (Gabon et Sénégal) et 2 Sous-directrices générales de l'UNESCO (Secteur des Sciences et Département Afrique).

Aujourd'hui, nous avons engagé une importante coopération avec les Laboratoires nationaux du BTP d'une vingtaine de pays africains pour la réalisation de référentiels techniques répondant à leurs préoccupations. Rappelons que les laboratoires nationaux du BTP ont un rôle essentiel à jouer. Ils doivent servir de référence sur divers plans, mener des recherches d'intérêt général, réaliser des études et des essais, ...

## CONFÉRENCE 2017

L'organisation de la Conférence est bâtie sur les considérations suivantes :

### 1. Infrastructures

L'Afrique a besoin d'infrastructures bien adaptées pour son développement (infrastructures de transport, adduction d'eau et voies navigables, électrification, technologies de l'information et des communications TIC, aménagement urbain, ...). Les référentiels techniques qui régissent la conception de celles-ci, ainsi que leur exploitation, doivent être de qualité et satisfaire aux exigences locales (technico-économiques et sociétales, sécurité, hygiène, ...).

### 2. Les référentiels techniques

Les référentiels techniques sont constitués d'un ensemble de documents de référence (normes nationales ou internationales, prescriptions techniques, règlements, guides, procédures d'essais ou de contrôle, ...) qui fixent les exigences ou les directives auxquelles les produits et les services doivent se conformer. Ils servent de lien entre tous les acteurs intervenant dans une même opération. Ils sont un outil indispensable pour organiser le développement, gérer la production, définir une politique de qualité. Ils facilitent les échanges commerciaux, la coopération, le montage de projets en commun, ... Chaque référentiel définit son propre champ d'application et peut avoir une portée nationale, régionale ou internationale.

Dans divers domaines, l'Afrique manque de référentiels techniques adaptés aux besoins et au contexte local. Le recours sans discernement à des textes établis ailleurs et souvent périmés ne peut que conduire à des difficultés graves. Il est urgent de colmater les lacunes et d'actualiser les textes périmés.

### 3. Le changement climatique

Le changement climatique a des implications préoccupantes sur les infrastructures au plan de la conception, de l'exécution et de l'exploitation (inondations, sécheresse, désertification, tenue des matériaux, ...). Les conditions météorologiques sont de plus en plus irrégulières et inquiétantes. Il faut tenir compte de tout ceci dans l'élaboration des référentiels techniques et en cas de besoin revoir ceux qui existent.

### 4. Une éducation adaptée

L'éducation des jeunes est à considérer au sens large.

Elle doit :

- Tenir compte des besoins du marché ;
- Comprendre une initiation aux nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) ;
- Apprendre aux jeunes à entreprendre et à assumer des responsabilités ;
- Compléter la formation initiale par des programmes d'apprentissage tout au long de la vie professionnelle ;
- Initier à l'éthique professionnelle.

### 5. Programme (projet)

9 h	<i>Séance d'ouverture</i>
9 h 45	<i>Exposé introductif</i>
	<b>Infrastructures et référentiels techniques :</b>
10 h 15	<i>Coopération en cours de réalisation ou de préparation</i>
	- Traitement des ouvrages en béton
	- Routes : conception, exécution, entretien, réparation, ...
11 h 15	<i>Eau et changement climatique</i>
	- Evénements climatiques extrêmes
	- Impact sur les référentiels techniques
12 h 15	Déjeuner
14 h	<b>Education professionnelle adaptée</b>
15 h 15	<b>Facteurs clés de réussite</b>
	- Financement
	- Coopération Nord-Sud et Sud-Sud
	- Femmes et développement
	- Appuis et nouveaux partenaires
	- Relations public - privé
16 h 30	<b>Conclusions et recommandations</b>

## 6. Appel pour un partenariat Nord-Sud

Pour son développement, l'Afrique a besoin d'infrastructures de qualité qui répondent à ses besoins. Elle dispose du potentiel nécessaire pour y parvenir. Cependant l'urgence de la situation et la complexité de la tâche rendent indispensable un *partenariat Nord-Sud* bien organisé et ouvert pour satisfaire des besoins exprimés. Il faut éviter la dispersion et les actions ponctuelles sans lendemain.

Un des buts essentiels de cette conférence est de poser clairement la problématique et de définir une marche à suivre.

## Annexe 1

### 1. Le Groupement UATI-UJSF-ICEST

- L'UATI, ONG créée par l'UNESCO en 1952, comporte deux pôles : l'UJSF et l'ICEST. Elle agit dans le respect des priorités de l'UNESCO, en conformité avec l'accord-cadre qui les lie et en concertation avec les Délégations permanentes concernées.
- Co-présidents du Groupement
  - Elie ABSI : Professeur honoraire de l'Ecole Centrale - Paris
  - Serge ARNAUD : Ingénieur Général des Ponts, des Eaux et des Forêts
  - Philippe AUSSOURD : Ingénieur Général des Ponts, des Eaux et des Forêts

### 2. Comité d'organisation

- Président : Serge Arnaud
- Membres : Elie Absi, Philippe Aussourd, Jean-Armand Calgaro, Jean-Marie Caro, Marc Levilion, Folarin Osotiméhin, Philippe Vuillemin, Christine Bruneau, Odette Fokapu, Marc-Antoine Martin, Christian Tridon, Patrick M'Bongo, Zaid Angelos
- Secrétaire Général : Gilles Robert, assisté de Colette Reydellet
- Gestion : Eliane Absi

## Annexe 2

### Références

Liste des principales manifestations relatives au programme "Développement en Afrique" organisées entre 2009 et 2016 par l'UATI-UJSF et ses partenaires. Un document afférent à chaque manifestation est disponible en téléchargement sur le site [uati.ujsf.fr](http://uati.ujsf.fr). Pour accéder à l'un d'eux, il convient de copier son URL, donné ci-dessous, dans la zone d'adresse d'un navigateur Web.

1. Conférence « *Éducation, Science et Technologie pour le Développement au Maghreb* », à Tunis en 2010.  
Rapport de synthèse : [uati.ujsf.fr/upload/TunisSynthese.pdf](http://uati.ujsf.fr/upload/TunisSynthese.pdf)
2. Conférence « *Éducation, Science et Technologie pour le Développement au Maghreb* », à Rabat en 2011.  
Rapport de synthèse : [uati.ujsf.fr/upload/RabatSynthese.pdf](http://uati.ujsf.fr/upload/RabatSynthese.pdf)
3. Conférence « *Éducation, Science et Technologie pour le Développement en Afrique – Séminaire Qualité* », à Libreville en 2012.  
Intervention d'Elie ABSI à la séance d'ouverture : [uati.ujsf.fr/upload/InterventionOuverture.pdf](http://uati.ujsf.fr/upload/InterventionOuverture.pdf)
4. Conférence « *Femmes et Développement en Afrique – La Recherche au service de la santé et de l'esthétique* », à l'UNESCO en 2012.  
Actes de la Conférence : [uati.ujsf.fr/upload/ActesFinaux.pdf](http://uati.ujsf.fr/upload/ActesFinaux.pdf) remis à l'UNESCO dans le cadre du Programme de Participation 2012-2013.
5. Synthèse des travaux « *Éducation, Science et Technologie pour le Développement en Afrique* ».  
Rapport remis à l'UNESCO dans le cadre du Programme de Participation 2012-2013 : [uati.ujsf.fr/upload/RapportPP2012-2013.pdf](http://uati.ujsf.fr/upload/RapportPP2012-2013.pdf)
6. Conférences d'Alger en 2013
  - Conférence Maghrébine sur « *L'Ingénierie en Géotechnique* », à l'Université USTHB d'Alger ;
  - Conférence Internationale sur « *L'Eau* », à l'École Polytechnique d'Alger.
 Note sur les Conférences : [uati.ujsf.fr/upload/noteAlger.pdf](http://uati.ujsf.fr/upload/noteAlger.pdf)
7. Journées « *Jeunesse et Développement en Afrique – Les attentes des jeunes* », à l'UNESCO en 2015.  
Actes des Journées : [uati.ujsf.fr/upload/ActesJeunesseetDeveloppement.pdf](http://uati.ujsf.fr/upload/ActesJeunesseetDeveloppement.pdf) remis à l'UNESCO dans le cadre du Programme de Participation 2014-2015.
8. Intervention d'Elie ABSI « *Jeunesse et Développement en Afrique francophone* » à la réunion plénière du Groupe des Délégations francophones à l'UNESCO le 28 janvier 2016.  
Texte : [uati.ujsf.fr/upload/J\\_et\\_D\\_en\\_Afrique\\_francophone.pdf](http://uati.ujsf.fr/upload/J_et_D_en_Afrique_francophone.pdf)
9. Rapport de synthèse « *Développement en Afrique – Accès des jeunes à l'emploi et référentiels techniques* » en 2017  
Texte : [uati.ujsf.fr/upload/Synthese\\_jeunesse\\_et\\_referentiels\\_techniques.pdf](http://uati.ujsf.fr/upload/Synthese_jeunesse_et_referentiels_techniques.pdf)



### RÈGLEMENT DU CONCOURS

#### ARTICLE 1 : OBJET

Ce concours a pour objet de récompenser **de un à trois travaux de thèses ou mémoires de fin d'études supérieures** qui mettent en exergue des solutions concrètes et pérennes pour améliorer la **qualité des constructions**.

A cet effet, ces travaux devront apporter une contribution originale sur un ou plusieurs des points suivants :

- la prévention des pathologies dans le BTP,
- la meilleure compréhension de l'origine des dommages,
- des techniques innovantes, simples et pratiques pour éviter les désordres et améliorer la préservation de l'environnement,
- la promotion et l'emploi de maquette numérique dans les modes de construction et de réparation d'ouvrages en vue de sa pérennisation.

#### ARTICLE 2 : CANDIDATS

Peuvent participer à ce concours les étudiants, quelle que soit leur nationalité, ayant soutenu une thèse dans une école doctorale française habilitée ou ayant déposé un mémoire de fin d'études dans une grande école scientifique française.



#### ARTICLE 3 : CRITÈRES DE RECEVABILITÉ

Chaque candidat ne peut présenter qu'un seul projet. Un projet ne pourra pas être porté par plusieurs personnes physiques.

Le dossier de candidature comprendra un **travail de thèse ou un mémoire de fin d'études supérieures**. La thèse ou le mémoire devra avoir été soutenu moins de dix-huit mois avant la date limite de dépôt du dossier.

#### ARTICLE 4 : CRITÈRES DE SÉLECTION

La sélection des projets se fera sur la base des principaux critères suivants :

- l'intérêt du projet pour l'amélioration de la prévention des désordres dans la construction,
- le caractère pratique et réaliste du projet : possibilité de mettre en œuvre les mesures préconisées en situation réelle de chantier,
- la conformité à la réglementation,
- la présentation, clarté et qualité,
- l'originalité du projet,
- l'intérêt des solutions pour le marché de la construction européenne.

#### ARTICLE 5 : JURY

Placé sous l'autorité du président de la fondation EXCELLENCE SMA, le jury est composé d'experts de la construction, de représentants des universités et organismes de recherche.

Le jury est indépendant et souverain. Après examen des dossiers, il se réserve le droit de n'attribuer aucun prix, s'il estime que les projets ne répondent pas suffisamment aux critères définis à l'article 4 du présent règlement. Il se réunira courant octobre.

Le jury sélectionnera, parmi les candidats, **1 à 3 projets**, sur la base du plus grand nombre de voix et en fonction des critères visés à l'article 4.

Le jury n'est pas dans l'obligation de motiver ses décisions.

#### ARTICLE 6 : PRIX

Sous réserve de la régularité de leur situation financière et fiscale, les lauréats recevront un chèque du montant suivant :

- Premier prix : **8 000 €**
- Deuxième prix : **5 000 €**
- Troisième prix : **3 000 €**

Les modalités de règlement du prix seront fixées dans une convention entre la **fondation EXCELLENCE SMA** et le lauréat.

Les lauréats sont naturellement autorisés à se prévaloir librement du prix qui leur a été attribué et qui est destiné à promouvoir la notoriété de leur projet.

Les prix seront remis le 8 novembre 2017 sur le salon Batimat à Villepinte.



### ARTICLE 7 : ENGAGEMENT DES CANDIDATS

Tout dossier illisible, incomplet, portant des indications d'identité ou d'adresse fausses sera considéré comme nul.

- Les candidats s'engagent à :
- garantir sur l'honneur la sincérité et la véracité des informations qu'ils fournissent, toute imprécision ou omission susceptible d'introduire un jugement erroné entraînera l'annulation du dossier de candidature,
  - participer à des opérations de relations publiques et de presse relatives au concours,
  - répondre à toute question orale ou écrite du jury
  - participer à la remise du prix, au lieu et date qui leur seront confirmés ; les candidats seront avertis individuellement de la date et du lieu de remise du prix. L'absence du responsable d'un projet primé à la remise des prix, sans justificatif réel et sérieux, entraînera la disqualification du projet. En cas d'irrégularité prouvée, le jury se réserve la possibilité de retirer le prix attribué.

La participation à ce concours implique l'acceptation sans restriction du présent règlement sans possibilité de réclamation quant aux résultats.

### ARTICLE 8 : CONFIDENTIALITÉ

Les membres du jury et les personnes ayant accès aux dossiers déposés dans le cadre du présent concours s'engagent par écrit à garder secrètes toutes les informations relatives aux projets. Aucune information communiquée par les candidats au jury ne pourra être divulguée ou publiée sans l'autorisation expresse des intéressés.

### ARTICLE 9 : FRAIS DE PARTICIPATION

L'accès au concours est gratuit.

Les frais afférents à la présentation de candidature (présentation devant le jury, frais de déplacements, frais de constitution du dossier...) sont à la charge de chacun des candidats. Aucun remboursement de frais ne sera effectué.

### ARTICLE 10 : RESPONSABILITÉ DES ORGANISATEURS

La fondation EXCELLENCE SMA se réserve le droit de modifier, d'écourter, de proroger ou d'annuler le présent concours si les circonstances l'exigent. Sa responsabilité ne saurait être engagée de ce fait. Chaque candidat est informé du résultat des délibérations le concernant au plus tard 6 mois après la date limite de dépôt des dossiers.

Les résultats des délibérations du jury ne peuvent donner lieu à contestation. La fondation EXCELLENCE SMA ne pourra être tenue pour responsable si des changements de calendrier ou de disponibilités budgétaires interviennent.

### ARTICLE 11 : PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

Chaque candidat déclare détenir légitimement les droits de publication, de propriété intellectuelle et industrielle relatifs aux projets réalisés dans le cadre du concours, et garantit ainsi la fondation EXCELLENCE SMA contre tout recours. Chaque lauréat autorise la fondation EXCELLENCE SMA à faire la promotion des travaux primés par tous moyens à sa convenance.



### ARTICLE 12 : DÉPÔT

Le présent règlement est déposé chez :

**MAÎTRE MAZARI  
HUISSIER DE JUSTICE  
36 RUE DE PONTHEU  
75008 PARIS**

### ARTICLE 13 : COMMENT PARTICIPER ?

Tous les dossiers seront présentés sous format Word, en page A4, non reliés.

#### Liste des pièces à fournir :

- la fiche d'identification du candidat complétée comprenant la description succincte du travail (environ 100 mots),
- la fiche d'engagement du candidat complétée et signée,
- votre curriculum vitae,
- un exemplaire papier du rapport de thèse ou du mémoire,
- une copie papier du rapport de soutenance.

Vous retrouverez les documents à compléter sur notre site Internet [www.groupe-sma.fr](http://www.groupe-sma.fr) / rubrique : Fondation Excellence, Concours Thèses

### ARTICLE 14 : ENVOI DU DOSSIER DE CANDIDATURE

Le dossier complet doit être envoyé au plus tard le **30 septembre 2017** (le cachet de la poste faisant foi) par courrier à :

Fondation EXCELLENCE SMA  
Concours Thèses - Edition 2017  
114 Avenue Emile Zola  
75739 PARIS CEDEX 15

En outre, le dossier complet devra être sauvegardé sur une clé USB à nous joindre. Pour tout renseignement :

- Par email : [tropheestheses@excellencesma.org](mailto:tropheestheses@excellencesma.org)
- Objet : Concours Thèses - Edition 2017
- Par téléphone : Fatiha BOUSEBHA – 01 40 59 78 20



## FICHE D'IDENTIFICATION DU CANDIDAT CONCOURS THÈSES - ÉDITION 2017

*Cadre réservé au jury*

DOSSIER N°  
Reçu le

Nom : Prénoms :

Date et lieu de naissance :

Situation professionnelle :

Adresse personnelle :

N° Téléphone :

Email :

Formation(s) (initiale et continue) :

Expérience professionnelle et responsabilités : (joindre un CV détaillé)  
(résumé des principaux emplois occupés - durées - responsabilités exercées)

Titre de la thèse ou du mémoire de fin d'études :

Date et lieu de soutenance :

Université ou École :

Directeur de thèse ou du mémoire :

Laboratoire(s) d'accueil (intitulé, adresse) :

### DESCRIPTION SUCCINCTE DU TRAVAIL

(Environ 100 mots ; y démontrer l'adéquation avec l'objet du concours, bien mettre en évidence les perspectives d'applicabilité sur le terrain des résultats du travail)



## FICHE D'ENGAGEMENT DU CANDIDAT



Concours Thèses, édition 2017, de la fondation EXCELLENCE SMA.

Je soussigné

Nom et prénom

date et lieu de naissance

résidant à

candidat au concours Thèses, édition 2017, de la **Fondation EXCELLENCE SMA**, certifie avoir pris connaissance du règlement du concours et m'engage à en respecter toutes les clauses, notamment l'article 13.

Fait à

Le

Signature



# 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](mailto:annalesbtp@gmail.com)

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

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

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

Il est nécessaire de préciser :

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

## FONCTIONNEMENT DE LA RELECTURE

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

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

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

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

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