

# LE BETON MATIERE EN DEVENIR

EDITION 2011

28

# LE BETON MATIERE EN DEVENIR

COLLOQUE INTERDISCIPLINAIRE | 11 MAI 2011

08:30-19:30 | LEARNING CENTER | EPFL

*INTERDISCIPLINARY CONCRETE FORUM | MAY 11<sup>TH</sup>, 2011*

*08:30 AM - 07:30 PM | LEARNING CENTER | EPFL*

# TABLE DES MATIERES

## TABLE OF CONTENTS

### INTRODUCTION *INTRODUCTION*

Prof. Marc Parlange	présentation du Colloque et bienvenue	7
Julien Woessner	introduction	9

### BETON, CONCEPTION DES OUVRAGES GENIE CIVIL *CONCRETE, CIVIL ENGINEERING DESIGN*

Prof. Aurelio Muttoni	Une recherche pour de nouvelles formes et de nouvelles structures	13
Stefano Campana	Comprendre pour concevoir: un exemple de tranchée couverte	15
Thibault Clément	100 ans de planchers dalles: des questions encore ouvertes	17
Dr. Miguel Fernandez Ruiz	Les coques en béton: un retour d'actualité	19
Marie-Rose Backes	Optimisation de la forme structurale du Learning Center	21

### BETON, CONCEPTION DES OUVRAGES ARCHITECTURAUX *CONCRETE, ARCHITECTURAL DESIGN*

Prof. Andrea Bassi	Le béton n'est pas seulement gris	25
Prof. Joëlle Salomon	Le bétonnage du paysage Suisse: histoire d'un désamour	27
Thierry Voellinger	Enseignement du projet béton aux étudiants architectes: point de vue de l'architecte	29
Dr. Damien Dreier	Enseignement de la structure béton aux architectes: point de vue de l'ingénieur civil	29

### HISTOIRE ET BETON *HISTORY AND CONCRETE*

Prof. Roberto Gargiani	Le béton enseveli: renaissance d'un matériau au XVIII <sup>e</sup> siècle	33
Salvatore Aprea	Placement de l'armature dans une plaque en béton: la proposition de Koenen et Wayss, 1880-87	35
Anna Rosellini	Le Corbusier: "béton brut" et "nouvelle stéréotomie"	37

### BETON DANS LES PAYS DU SUD *CONCRETE IN SOUTHERN COUNTRIES*

Prof. Karen Scrivener	Collaboration avec l'université de Santa Clara, Cuba sur l'usage de matériaux cimentaires additionnels	41
Prof. José F. Martirena	Réduction du clinker dans la production du ciment: un choix pour les pays en développement	43
Mathieu Antoni	Addition combinée d'argiles calcinées et de calcaire pour un béton à bas-cout	47
Dr. Rodrigo Fernandez	Caractères et usage d'argiles calcinées comme substitut au ciment	49
Dr. Rancés Castillo Lara	Activation thermique et mécanique des sols argileux pour la substitution du ciment	53

### CONFERENCE, INVITE SPECIAL: BUREAU CLAUS EN KAAAN, PAYS-BAS *SPECIAL GUEST: CLAUS EN KAAAN, NETHERLANDS*

Prof. Felix Claus	Ronflonflon avec le béton	57
-------------------	---------------------------	----

### RECHERCHES EN COURS A L'EPFL *CURRENT RESEARCH AT THE EPFL*

	Posters des doctorants EPFL travaillant sur le béton	60
--	--	----



# INTRODUCTION

## *INTRODUCTION*

# MARC PARLANGE

Professeur, Doyen de la faculté EPFL / ENAC (Environnement Naturel, Architectural et Construit)



- 1990 Ph.D., Civil and Environmental Engineering, Cornell University
- 1987 M.S., Agricultural Engineering, Cornell University
- 1984 B.S., Applied Mathematics Griffith University, Brisbane, Australia

## Research interests

Hydrology and fluid mechanics in the environment: Land-atmosphere interaction

Evaporation

Precipitation

Atmospheric boundary layer

Turbulence

Lidar

Transport in porous media

## Editorial activities

Editor in Chief, Water Resources Research

## Edited books

Parlange, M.B. and J.W. Hopmans, 1999, *Vadose Zone Hydrology: Cutting across disciplines*, Oxford University Press, New York, pp.451.

Miller, C.T., M.B. Parlange, and M. Hassanizadeh, 2003, *25 years of Advances in Water Resources*, Elsevier Press, Amsterdam, pp.548.

## Editorials

Parlange, M.B., B. Berkowitz, A. Porporato, T. Torgersen, S.W. Tyler, 2005, Editorial: *Future of Water Resources Research*, 41(1): W01001, 10.1029/2004WR003899

Miller, C.T., M.B. Parlange, S.M. Hassanizadeh, 2002, Special 25th anniversary issue of *Advances in Water Resources*, 25(2): 127.

Kiely, G., M. Parlange, J. Albertson, 1999, *Water resources and climate change processes - Preface*, *Advances in Water Resources*, 239: 101-103.

## ENAC – Environnement naturel, architectural et construit

Les disciplines regroupées dans la Faculté ENAC, sont appelées à répondre, par des solutions innovantes, au plus important défi de notre société: garantir un cadre de vie durable. Ce domaine multiple nécessite des recherches à long terme, pluridisciplinaires et internationales. Ces recherches sont conduites dans une interaction créative entre art, science et ingénierie. Notre offre d'enseignement comprend des études de niveau Bachelor/Master en architecture, génie civil, et génie de l'environnement, des cycles et cours postgrades, et des programmes doctoraux. L'originalité de notre formation est d'établir des liens entre les disciplines afin d'apporter aux étudiants les outils et méthodes pour projeter ensemble.

L'ENAC, c'est:

4 instituts de recherche, 3 sections d'enseignement

3 programmes doctoraux, 3 prog. de formation continue

1795 étudiants (dont 36% d'étudiantes, et 36% d'étrangers)

622 collaborateurs (479 équivalent plein-temps)

un budget de 69,9 millions CHF

# PRESENTATION DU COLLOQUE ET BIENVENUE

Bienvenue au colloque interdisciplinaire "Le béton, matière en devenir"! Cette initiative, organisée par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, avec le soutien de Béton Suisse, s'inscrit pleinement dans la volonté de notre école d'encourager les approches interdisciplinaires.

Depuis les années 2000, les milieux scientifiques ont pris de conscience de l'importance des approches holistiques pour tenir compte des 3 piliers du développement durable de façon équilibrée et dans des approches long terme. A la faculté ENAC (Environnement Naturel Architectural et Construit), comme dans toute l'EPFL, nous cherchons depuis lors à développer, en plus des compétences spécialisées de pointe, qui font la réputation de l'école, la capacité pour les ingénieurs et les architectes formés chez nous, de travailler avec des professionnels d'autres disciplines.

Ce colloque est une belle opportunité d'échanges interdisciplinaires à propos d'un matériau qui nous concerne tous, parce qu'il s'est peu à peu imposé comme le plus utilisé au monde, aussi bien dans les bâtiments et les villes que dans les ouvrages des ingénieurs et les infrastructures. Nous nous réjouissons d'écouter chacun des professeurs et chercheurs de notre école exposer son approche de ce matériau, formuler les enjeux sur lesquels il travaille et les objectifs qu'il poursuit. Nous nous réjouissons également de l'apport des intervenants extérieurs à l'école, praticiens engagés, dont le témoignage est essentiel. Et nous remercions les entreprises du secteur béton qui ont contribué au soutien de ce colloque dans notre école.

Nous espérons que ce moment d'échanges de haut niveau encouragera les équipes de recherche de l'EPFL à renforcer les synergies avec d'autres équipes de l'école, avec des praticiens extérieurs, avec des entreprises engagées et avec les services du Canton et de l'Etat.

Nous espérons aussi qu'il permettra aux étudiants des différentes sections d'entrevoir la complexité des enjeux scientifiques d'aujourd'hui et de développer l'envie de travailler et échanger avec les étudiants des autres sections.

Ce colloque organisé sur 3 ans, cherche à être une plateforme d'échanges et d'informations relative au béton, permettant à chacun de mieux comprendre les défis et les enjeux liés à cette matière en devenir. C'est pourquoi, nous encourageons celles et ceux qui travaillent sur le béton et qui ont envie de mettre en commun leurs avancées, de contacter les organisateurs et de participer aux prochaines éditions du colloque!

# JULIEN WOESSNER

Architecte, EPFL / LAURE (Laboratoire d'architecture urbaine et réflexion énergétique)  
Organisation du Colloque interdisciplinaire "Le béton, matière en devenir"



Architecte EPFL diplômé 1997

Postgrade européen en architecture et développement durable 1999 (<http://madd.epfl.ch>)

Responsable de projet à la Fondation CL Mayer ([www.fph.ch](http://www.fph.ch))

Responsable de l'agence d'architecture W-ARCHITECTURE sarl ([www.w-architecture.ch](http://www.w-architecture.ch))

## LAURE: Laboratoire d'architecture urbaine et réflexion énergétique

### Objectifs

La réflexion principale que nous développerons dans notre atelier pour les quatre années consécutives d'enseignement à l'EPFL portera sur des projets d'architecture dans la ville.

Nous avons choisi un territoire emblématique en profonde mutation, une zone industrielle en activité au cœur de la ville internationale de Genève - zone à même d'accueillir une extension de la ville en pleine expansion. Nous postulons d'en faire son portrait dans le temps qui nous est donné.

Les objectifs pédagogiques visent l'élaboration de projets d'architecture dans un contexte urbain. La recherche de valeurs collectives (espace public, mixité programmatique) propres à l'espace de la ville sera également l'objectif de nos réflexions. L'étudiant adoptera une attitude face à cette problématique urbaine.

### Contenu

Les morceaux de ville sur lesquels nous nous pencherons sont les quartiers de la Praille et des Acacias à Genève. Chaque semestre, à l'intérieur de ce compartiment territorial, un lieu sera désigné et fera l'objet d'une nouvelle réflexion et d'un nouveau projet.

Le développement des projets devra englober l'aspect de la reconversion programmatique logements/bureaux/activités commerciales existantes. En parallèle, les techniques de construction en béton préfabriqué seront au centre de notre réflexion (en lien direct avec les questions du futur telles que : économie, développement durable et hautes performances thermiques).

### Notre équipe

Professeur Andrea Bassi

Assistants Emy Amstein  
Bertrand Counson  
Leo Fabrizio  
Enrico Slongo  
Thierry Voellinger  
Julien Woessner

Secrétaire Rosa Ana Turielle

# INTRODUCTION

Depuis la dernière édition de ce colloque, il y a un an, environ 5 milliards de m<sup>3</sup> de béton ont été coulés dans le monde<sup>1</sup>. Durant cette même période, la population humaine s'est accrue de près de 80 millions d'individus, passant à presque 7 milliards<sup>2</sup>. Notre monde contemporain offre donc, année après année, à chaque nouveau terrien plus de 60m<sup>3</sup> de béton en guise de cadeau de bienvenue... un cadeau durable – dans le sens premier du terme – puisqu'il aura souvent une durée d'existence supérieure à l'espérance de vie de son destinataire!

L'image peut paraître saugrenue, mais elle a le mérite de considérer le béton – matériau de construction le plus utilisé au monde<sup>3</sup> – comme un enjeu de société aussi bien à court terme que pour les générations futures. Ce d'autant plus que son utilisation a de beaux jours devant elle si l'on en croit les prévisions qui annoncent que la population mondiale vivant en ville pourrait passer des presque 51% actuels à près de 70% en 2050<sup>4</sup>.

Cet enjeu de société nécessite un effort de compréhension pour cerner les multiples défis à relever et définir les responsabilités à assumer, aux différents niveaux de la chaîne de production sur le long terme. Les acteurs de la filière béton sont nombreux et variés : chercheurs, concepteurs, industriels, acteurs étatiques, ouvriers, usagers, habitants...

Ce colloque interdisciplinaire en rassemble une partie, offrant un espace d'échanges et de débat pour tenter, modestement, d'apporter une petite pierre à cet effort de compréhension et d'engagement collectifs.

L'édition 2010 du colloque a proposé un état des lieux de différents enjeux généraux liés au béton. Le colloque 2011 mettra l'accent sur les recherches en cours et donnera pour cela la parole aux doctorants travaillant sur des thèmes liés au béton. L'éventail des professions représentées s'élargira : en plus des ingénieurs en génie civil, architectes, historiens et ingénieurs en science des matériaux, une sociologue interviendra sur le concept de "bétonnage". Le spectre géographique s'étendra également puisque nous aurons la chance d'accueillir un professeur de Cuba et un architecte d'Amsterdam. Le programme sera structuré de manière à réserver plus de temps pour le débat : chaque bloc thématique se terminera par un moment d'échange entre conférenciers et avec le public.

Nous espérons que vous sortirez de cette journée en ayant l'impression d'en savoir un peu plus sur cette "matière en devenir" et avec l'envie d'échanger des idées avec des acteurs de disciplines différentes de la vôtre!

1. *Introduction à la science des matériaux*, Kurz, Mercier, Zambelli, PPUR, 3<sup>rd</sup> ed, 2002  
2. [http://www.ined.fr/fr/pop\\_chiffres/pays\\_du\\_monde/](http://www.ined.fr/fr/pop_chiffres/pays_du_monde/) • [http://www.prb.org/presentations/g\\_world-pop-clock.ppt](http://www.prb.org/presentations/g_world-pop-clock.ppt)  
3. <http://www.nanochem.org>  
4. *State of the World's Cities 2010/2011 - Year: 2010* - Publisher: UN-HABITAT - ISBN: 9781849711753

**BETON,  
CONCEPTION  
DES OUVRAGES  
GENIE CIVIL  
*CONCRETE,  
CIVIL  
ENGINEERING  
DESIGN***

# AURELIO MUTTONI

Professeur ordinaire et directeur du Laboratoire de construction en béton (IBETON)



Aurelio Muttoni est né en 1958 à Faido (Suisse italienne). Il obtient un diplôme d'ingénieur civil de l'EPFZ en 1982 et le titre de docteur en sciences techniques de la même école en 1989 avec une thèse sur l'application de la théorie de la plasticité dans le dimensionnement des structures en béton armé.

De 1989 à 2001 il travaille comme ingénieur conseil en tant qu'associé d'un bureau d'ingénieurs à Lugano où il collabore dans le cadre de nombreux projets de bâtiments et d'ouvrages d'art. Il s'est en particulier distingué dans la conception structurale avec des projets innovants et a également participé comme expert à une série de projets de plateformes offshore dans la Mer du Nord.

Dès l'ouverture de l'"Accademia di Architettura" de l'Université de la Suisse italienne en 1996, Aurelio Muttoni y fonctionne comme professeur et développe le domaine des structures.

Depuis 2000, il est professeur ordinaire et dirige le Laboratoire de Construction en Béton à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Son enseignement porte sur la conception des structures, la théorie et le dimensionnement des structures en béton armé ainsi que la conception et le calcul des ponts. Il dirige un groupe de recherche actif dans les domaines suivants : comportement et méthodes de dimensionnement des structures, conception des structures innovantes, poinçonnement des dalles, effort tranchant, adhérence béton-armature, comportement mécanique des éléments en béton à ultra-hautes performances et interaction sol-structures.

En 2007 il réduit son activité à l'EPFL pour fonder le bureau Muttoni & Fernández (www.mfic.ch) actif dans la conception structurale, l'analyse et le dimensionnement des structures porteuses en architecture et des ouvrages d'art ainsi que l'exécution d'expertises dans le domaine de l'ingénierie structurale.

## Publications représentatives

*L'art des structures; Une introduction au fonctionnement des structures en architecture*, A. Muttoni, PPUR, 271 p., Lausanne, Switzerland, 2<sup>e</sup> éd., 2005

*Design of Concrete Structures with Stress Fields*, A. Muttoni, J. Schwarz, B. Thürlimann, Birkhäuser / Springer, 145 pages, 1997.

## Laboratoire de construction en béton (IBETON)

Au sein de la faculté ENAC, section de Génie Civil de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, l'équipe du Laboratoire de construction en béton est active dans le domaine des structures en béton.

## Enseignement

Comportement et fonctionnement des structures

Conception des structures

Dimensionnement et comportement des structures en béton armé et précontraint.

## Recherche

Comportement et méthodes de dimensionnement des structures,

Conception des structures innovantes,

Poinçonnement des dalles, effort tranchant,

Adhérence béton-armature,

Comportement mécanique des éléments en béton à ultra-hautes performances et

Interaction sol-structures (tranchées couvertes, culées de ponts, ...).

# RECHERCHE EN GENIE CIVIL

Depuis plusieurs décennies, les ingénieurs s'interrogent sur le rôle de la conception et de la recherche dans l'ingénierie civile. Ce débat a été lancé par des figures-clés de l'ingénierie structurale du XX<sup>e</sup> siècle comme par exemple Eduardo Torroja (1899-1961) en Espagne, Pier Luigi Nervi (1891-1979) en Italie et Robert Maillart (1872-1940) en Suisse. Ils ont surtout critiqué le fait que des théories et des modèles de calcul de plus en plus complexes étaient utilisés pour des solutions structurales de plus en plus simples et de moins en moins créatives. En effet, les ingénieurs s'occupaient (et s'occupent toujours) trop du calcul et pas assez de la conception. Cependant, leur exemple est très intéressant : ces ingénieurs très doués étaient en même temps des chercheurs scientifiques de haut niveau et la conception structurale qu'ils pratiquaient était souvent fortement liée à des développements théoriques.

Aujourd'hui, la situation reste la même et l'introduction du calcul informatique n'a pas résolu les problèmes évoqués auparavant. Par contre, dans certains cas de nouvelles formes structurales ont été rendues possibles par des méthodes de calcul simples et facilement compréhensibles (la compréhension est la base de la conception structurale). C'est par exemple le cas de la méthode des champs de contraintes, développée surtout à Stuttgart, Copenhague et Zurich pour le dimensionnement des structures en béton. Grâce au fait qu'elle permet une visualisation et une quantification facile des efforts dans les voiles en béton, des structures porteuses tridimensionnelles constituées de dalles et de voiles peuvent être conçues de façon plus efficace et plus directe. Le développement de l'architecture Suisse des dernières années en est l'un des résultats.

De nouvelles formes structurales peuvent toujours être développées sur la base de travaux de recherche récents. C'est le cas de la Maison de l'Écriture actuellement en construction à Montricher (VD), dont la forme structurale dérive d'une interprétation du fonctionnement des planchers-dalles par le biais de la méthode des champs de cisaillement. La forme et l'épaisseur des membrures sont définies en fonction du cheminement des forces et de l'intensité des efforts. La solution structurale qui en résulte est inédite : ni dalle trouée, ni grille de poutres. Cette nouvelle forme structurale nécessite néanmoins des solutions constructives nouvelles. Dans ce cas c'est l'utilisation du béton fibré et d'une armature flexible à très haute résistance qui en rend possible la réalisation.

Dans d'autres cas, une meilleure connaissance du comportement mécanique et l'utilisation de nouveaux matériaux rendent possibles des solutions structurales plus performantes. Dans un projet actuellement en réalisation à Chiasso, une coque très mince et de grandes dimensions peut être réalisée avec une forme géométrique simple (ellipsoïde) grâce à l'utilisation de la précontrainte, du béton fibré et surtout en faisant appel aux développements récents concernant la capacité de déformation des structures en béton.

# STEFANO CAMPANA

Doctorant EPFL / IBETON

## AUTEUR AUTHOR

Stefano Campana



Né en 1982 à Lugano, il termine un apprentissage de dessinateur en bâtiments et du génie civil en 2001. Il se diplôme ensuite en génie civil à l'IES de Lugano. Il continue ses études à l'EPFL où il obtient son diplôme en génie civil en 2008 avec spécialisation en structures.

Après son diplôme il commence son travail de doctorat au sein du laboratoire IBETON à l'EPFL sous la direction du Professeur Aurelio Muttoni et du Dr Miguel Fernández Ruiz.

Sa recherche traite de la résistance à l'effort tranchant de poutres avec faible contenu d'armatures d'effort tranchant. Aussi, en utilisant la méthode des champs de contraintes, il s'occupe de l'optimisation des détails d'armature d'angles de cadre d'une tranchée couverte à forme polygonale.

Dans le cadre de son doctorat, il est également impliqué dans l'enseignement pour les cours et les projets proposés par l'IBETON aux étudiants en Bachelor et en Master de génie civil.

## MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

TRANCHEE COUVERTES

INTERACTION SOL-STRUCTURE

ANGLES DE CADRE

CAPACITE DE DEFORMATION

RESISTANCE

CHAMPS DE CONTRAINTES

DETAILS D'ARMATURE

## EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM

Personnel IBETON:  
Aurelio Muttoni  
Miguel Fernández Ruiz  
Olivier Burdet  
Yvonne Bühl  
Galina Argirova  
Stefano Campana  
Thibault Clément  
Jürgen Einpaul  
Gilles Guignet  
Stefan Lips  
Francisco Natario  
Michael Rupf  
Luca Tassinari

## CONTEXTE CONTEXT

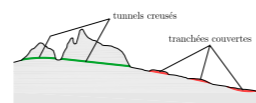
Les tranchées couvertes sont des tunnels pour lesquels la construction de la structure se fait à ciel-ouvert. Cette solution constructive est souvent utilisée:

- > pour la construction de tunnels avec un faible recouvrement de sol,
- > pour la réduction de l'impact environnemental des infrastructures routières.

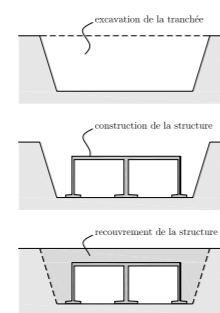
## CHIFFRES FIGURES

Sur le réseau des routes nationales suisses:

- > 10% du tracé est souterrain
- > 220 tunnels au total, dont 64 tranchées couvertes (total de 32 km)



La topologie du territoire suisse justifie la construction de tranchées couvertes



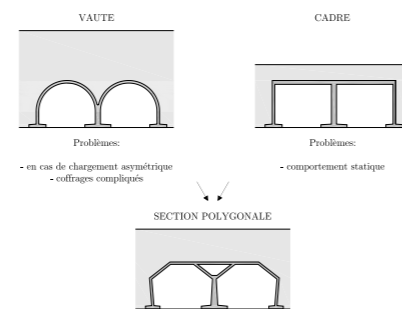
Procédure constructive d'une tranchée couverte



Phases constructives de la tranchée couverte de la Beuchille, Suisse

## STRUCTURE ANALYSEE ANALYSED STRUCTURE

Une forme polygonale de la section transversale a été proposée à l'EPFL afin de combiner les avantages des deux solutions typiquement utilisées: la voûte et le cadre.



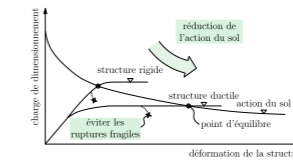
Proposition pour une nouvelle forme de la section transversale

## CONCEPTION DE TRANCHEES COUVERTES AVEC LA METHODE DES CHAMPS DE CONTRAINTES ELASTICO-PLASTIQUES

DESIGN OF CUT-AND-COVER TUNNELS USING ELASTIC-PLASTIC STRESS FIELDS METHOD

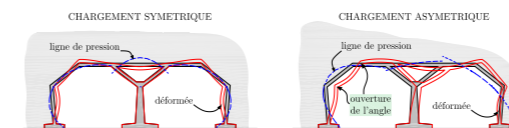
## INTERACTION SOL-STRUCTURE SOIL-STRUCTURE INTERACTIONS

L'augmentation de la capacité de déformation de la structure conduit à une diminution des actions du sol sur la structure. La capacité de déformation de la structure est directement influencée par la capacité de déformation de ses régions nodales, zones où les déformations se concentrent.



## COMPORTEMENT DE LA STRUCTURE STRUCTURE BEHAVIOUR

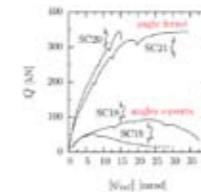
Le comportement de la structure est différent suivant la forme du sol de recouvrement. Le long du tracé longitudinal, un angle du polygone de la section transversale peut alternativement s'ouvrir et se fermer selon les sollicitations.



Variations de comportement de la structure en fonction du type de chargement

## PROBLEMATIQUE PRINCIPALE MAIN ISSUE

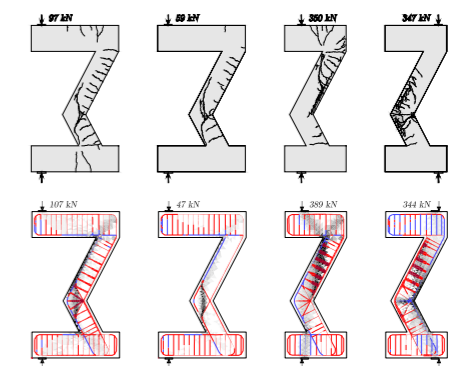
La résistance et la capacité de déformation d'un angle qui s'ouvre sont sensiblement inférieures à celles d'un angle qui se ferme. Des ruptures fragiles peuvent même avoir lieu pour ces premiers angles. Des solutions pour améliorer leur comportement sont ainsi nécessaires.



Résultats d'essais sur angles de cadre

## METHODE DES CHAMPS DE CONTRAINTE STRESS FIELDS METHOD

La méthode des champs de contraintes est un outil puissant pour l'étude du comportement des régions nodales. Elle peut être aussi utilisée pour l'évaluation du comportement global de la structure.



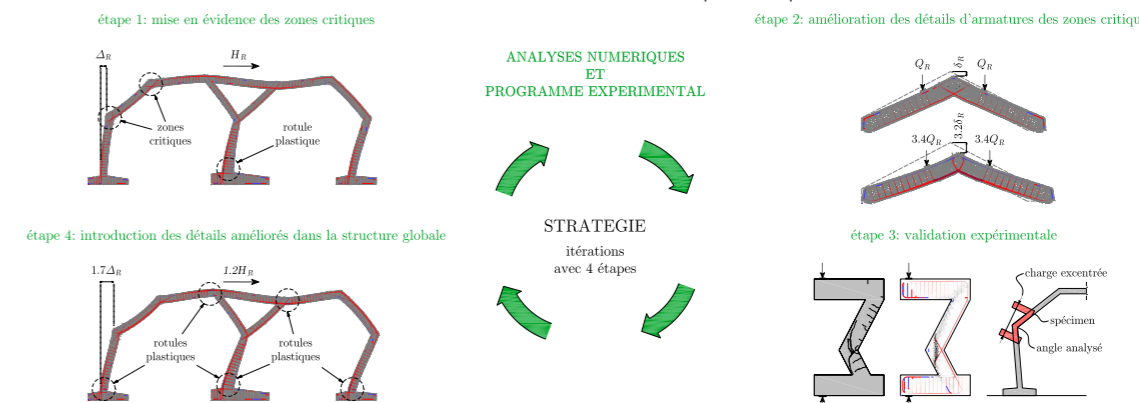
Résultats d'essais sur angles de cadre et prédictions de comportement obtenues avec la méthode des champs de contraintes

## OBJECTIFS OBJECTIVES

L'étude vise à sélectionner des détails d'armature adaptés pour les régions nodales de la tranchée couverte. Les détails proposés doivent permettre de maximiser la capacité de déformation de la structure et d'éviter toutes ruptures fragiles.

## PROCEDURE ADOPTEE SELECTED PROCEDURE

- > La méthode des champs est utilisée pour la mise évidence des zones critiques de la section transversale.
- > Elle peut ensuite être utilisée pour améliorer les détails d'armature de ces zones.
- > Des séries expérimentales viennent ensuite valider les résultats des analyses numériques.
- > Grâce à des détails d'armature améliorés, le comportement de la structure entière peut être optimisé.



## AUTEUR AUTHOR

Thibault Clément



Né en 1984, il obtient son diplôme d'ingénieur de l'Ecole des Mines (Alès - France) après un échange à l'EPFL en 2006-2007.

Il commence directement après son diplôme son travail de doctorat au sein du laboratoire IBETON à l'EPFL sous la direction du Professeur Aurelio Muttoni.

Sa recherche s'articule autour du phénomène de poinçonnement dans le domaine de la construction et plus particulièrement sur l'influence de la précontrainte sur la résistance au poinçonnement.

Il s'investit aussi dans l'enseignement en génie civil pour des cours et des projets de niveau Bachelor et Master et en architecture pour des interventions ponctuelles sur les structures.

## MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

DALLES

PRECONTRAINTE

POINÇONNEMENT

RESISTANCE

BETON

## EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM

Personnel IBETON :  
 Aurelio Muttoni  
 Miguel Fernandez Ruiz  
 Olivier Burdet  
 Yvonne Bühl  
 Galina Argirova  
 Stefano Campana  
 Thibault Clément  
 Jürgen Einpaul  
 Gilles Guignet  
 Stefan Lips  
 Francisco Natario  
 Michael Rupf  
 Luca Tassinari

## OBJECTIFS OBJECTIVES

Comprendre l'influence de la précontrainte sur la résistance au poinçonnement.

### Solution structurale très répandue :

- > Plancher-dalle (solution la plus répandue en Suisse lors de l'utilisation de poteau)
- > Pont-dalle (environ 30% du réseau de des routes nationales en Suisse)
- > A l'étranger aussi



Sao paulo - Brésil (pavilhão Cicillo-Matarazzo, Niemeyer (arch.))



Pont-dalle Copenhague - Danemark



Pont-dalle Genève (A1) - Suisse



Montricher - Suisse (Maison de l'écriture, Muttoni et Fernandez (ing.), Mangeat et Wahlen (arch.))

### Phénomène de poinçonnement :

La colonne traverse la dalle

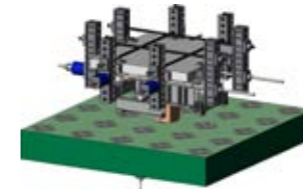
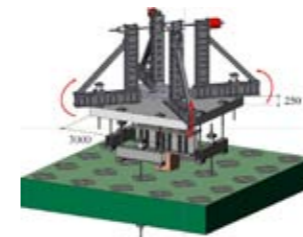


### Effets de la précontrainte

- > Moment de flexion  $m_p$
- > Effort normal  $\sigma_p$
- > Composante verticale  $V_p$

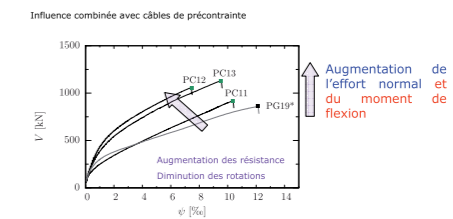
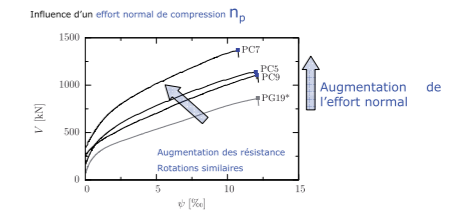
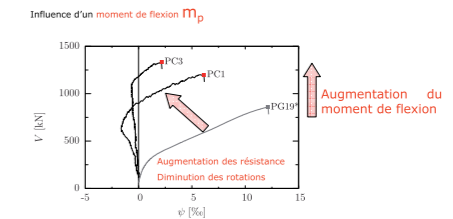
## METHODOLOGIE METHODOLOGY

Découplage des différents effets de la précontrainte  
 Essais en laboratoire sur dalles en béton armée de 3000 x 3000 x 250 mm



## RESULTATS RESULTS

Résultats de la campagne d'essais réalisée  
 PG19 : dalle de référence sans moment de flexion ni effort normal



# MIGUEL FERNANDEZ RUIZ

Docteur Ingénieur, Université Polytechnique de Madrid, Collaborateur scientifique EPFL



Né à Madrid (Espagne) en 1977, il reçoit le titre d'ingénieur civil par l'Université Polytechnique de Madrid (Espagne) en 2001. Après son diplôme, il poursuit ses études de doctorat et travaille en parallèle dans la pratique au sein des bureaux Proes (2001-2002) et MC-2 (2002-2004) dans la conception et calcul des ouvrages d'art et des bâtiments à grande hauteur.

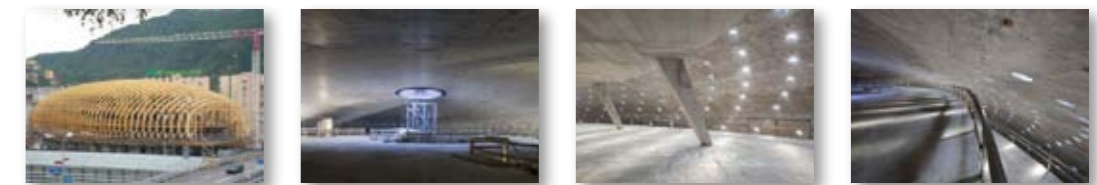
En Janvier 2004, il reçoit le titre de docteur ingénieur par l'Université Polytechnique de Madrid avec une thèse sur les effets structuraux des déformations rhéologiques des matériaux. Cette même année, il rejoint l'équipe du prof. Muttoni à l'EPF Lausanne, où il travaille actuellement en tant que collaborateur scientifique et chargé de cours. En 2007 il réduit son activité à l'EPFL pour fonder le bureau Muttoni & Fernández, ingénieurs conseils, dont il travaille dans la conception, calcul et vérification de structures à caractère innovant.

# LES COQUES EN BETON : UN RETOUR D'ACTUALITE

Les coques en béton armé sont des structures formidables. Grâce à leur double courbure, elles permettent de franchir de grandes espaces avec des épaisseurs de seulement quelques centimètres. En plus d'être une solution économique et compétitive pour certains types de structures (comme par exemple les silos ou les tours de réfrigération) elles présentent de grandes possibilités plastiques pour leur application dans l'architecture.

Leur développement a toujours été lié à la grande difficulté que leur calcul et leur dimensionnement présentaient. Les coques en béton étaient développées dans la première moitié du siècle passé fondamentalement en Europe (F. Dischinger, E. Torroja). Un développement intéressant a ensuite eu lieu en Amérique par l'architecte espagnol F. Candela et par l'uruguayen E. Dieste (ce dernier fondamentalement dans les coques en maçonnerie). En Suisse, H. Isler effectuait aussi un développement intéressant dans la deuxième moitié du siècle passé sur de coques en béton dont leur forme était obtenue par des analogies mécaniques. Ces travaux ont cependant toujours été liés au génie de leurs concepteurs, sans écrire une ligne de continuité.

Dans les deux dernières décennies, les possibilités offertes par les nouveaux types de béton, systèmes de coffrage et moyens de calcul ont permis un nouveau approche à ce type de structures. Cependant, la compréhension correcte des mécanismes de transmission de charges et de leur fonctionnement structural restent encore les aspects incontournables pour la conception des coques performantes et pouvant répondre aux besoins architecturaux. Dans cette conférence, ces aspects sont révisés sur la base d'un cas pratique, une coque ellipsoïdale (93 x 52 x 22 m) avec épaisseur variable entre 10 et 12 cm.



# MARIE-ROSE BACKES

Master EPFL / IBETON

## AUTEUR AUTHOR

Marie-Rose Backes



Née en 1986 au Luxembourg. Elle commence ses études de génie civil en 2006 à l'EPFL. En 2009 elle réussit son Bachelor en génie civil et poursuit ses études de Master avec une spécialisation en structures.

Afin d'obtenir son diplôme d'ingénieur civil en 2011, elle choisit de faire le projet de Master au sein du laboratoire IBETON à l'EPFL.

Son travail intitulé "Optimisation de la forme structurale du Learning Center" est réalisé sous la direction de Professeur Aurelio Muttoni. Le projet traite du comportement structural des coques et de l'application au cas du Learning Center.

## MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

COQUES

FORM FINDING

RIGIDITE

RESISTANCE

BETON

## EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM

Personnel IBETON:  
Aurelio Muttoni  
Miguel Fernández Ruiz  
Thibault Clément

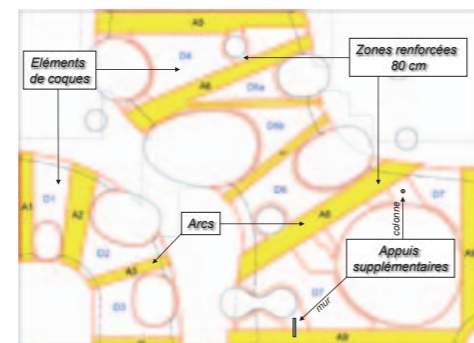
## CONTEXTE CONTEXT

Le Rolex Learning Center (RLC), qui a ouvert ses portes en février 2010, est le nouveau point de rencontre du campus de l'EPFL. Le bureau d'architecture SANAA l'a conçu selon le concept du paysage architectural. Le bâtiment comporte un seul niveau et se compose de deux coques fortement surbaissées pourvues d'ouvertures circulaires appelées patios.

## PROBLEMATIQUE ISSUE

La conception de la géométrie des deux coques du RLC s'est basée sur un compromis entre architecture, exploitabilité, sécurité et exigences structurales. Le comportement statique résultant est une combinaison d'arcs et d'éléments de dalles, et guère celui d'une coque.

Les conséquences sont des efforts de flexion importants nécessitant:  
 Epaisseurs considérables 80 cm  
 Taux d'armature très élevé 470 kg/m<sup>3</sup>  
 Quantité de précontrainte importante 84 MN (arc n°5)  
 Appuis supplémentaires colonne + mur  
 Perception visuelle arcs



Concept statique : Arcs et éléments de dalles #B-G



Mur d'appui



Colonne d'appui



Façade sud : perception d'arcs



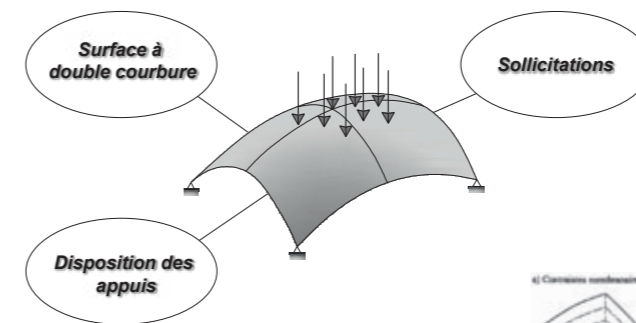
Epaisseur de 80cm



Arc N°9

## CONCEPTION D'UNE COQUE

Facteurs clés pour la génération d'une géométrie de coque efficace :  
 La forme d'une coque est optimale si les efforts intérieurs sont uniquement de type membranaire. En tenant compte des interrelations entre les différents facteurs clés, il est possible de s'approcher d'une géométrie optimale



La forme d'une coque est optimale si les efforts intérieurs sont uniquement de type membranaire. En tenant compte des interrelations entre les différents facteurs clés, il est possible de s'approcher d'une géométrie optimale



Etat de contraintes membranaires

## OBJECTIFS OBJECTIVES

L'objectif principal du travail est la recherche d'une nouvelle géométrie qui permet le développement d'un comportement membranaire dans les deux coques du Learning Center. Ensuite, une optimisation au niveau des épaisseurs de béton et du taux d'armature peut être effectuée grâce à une utilisation efficace de la matière. La nouvelle géométrie permet également d'augmenter la fluidité des formes en évitant la perception de section en forme d'arcs.

## I. Analyser le comportement à l'aide d'un modèle physique



Maquette - configuration originale des appuis



Mise en évidence d'un comportement unidirectionnel par manque de double courbure au droit des extrémités d'appuis

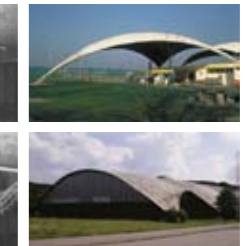
## "FORM FINDING" FORM FINDING

### Une approche expérimentale

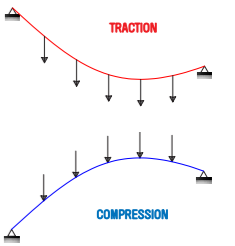
À partir des années 60', l'ingénieur suisse H. Isler a réalisé un grand nombre de coques en béton armée, dont une grande partie ont été conçues selon la méthode de la membrane suspendue.



Maquettes utilisées par Isler pour déterminer la forme de ses coques.



Dettlingen Service Station, 1968, Solothurn. Bruhl Sports Center, 1982, Solothurn.



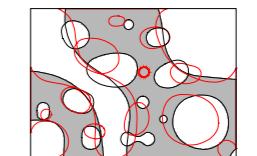
Analogie avec le câble et l'arc

La méthode de la membrane suspendue part de l'idée qu'une membrane soumise à son poids propre adapte une forme qui travaille entièrement en traction. En inversant cette géométrie, on obtient une coque travaillant en état membranaire de compression pure.

## METHODOLOGIE METHODOLOGY

- La méthode de la membrane suspendue est utilisée pour l'identification des zones critiques de la géométrie actuelle du RLC. Zones à comportement unidirectionnel (arcs) et zones à forte concentration d'efforts
- La maquette de travail permet également d'élaborer une nouvelle disposition des appuis et des patios afin d'améliorer le comportement coque.
- Un modèle aux éléments finis permet ensuite de vérifier le comportement de la nouvelle géométrie et de dimensionner les sections critiques.

## II. Modifications de la géométrie des appuis et des patios



Nouvelle configuration des appuis



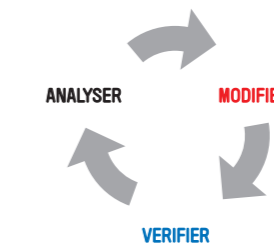
Petite coque



Face est - Développement d'une double courbure à l'appui nord.



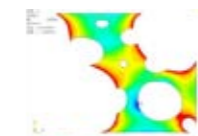
Grande coque patio nord - Zones à double courbure efficace et zones instables.



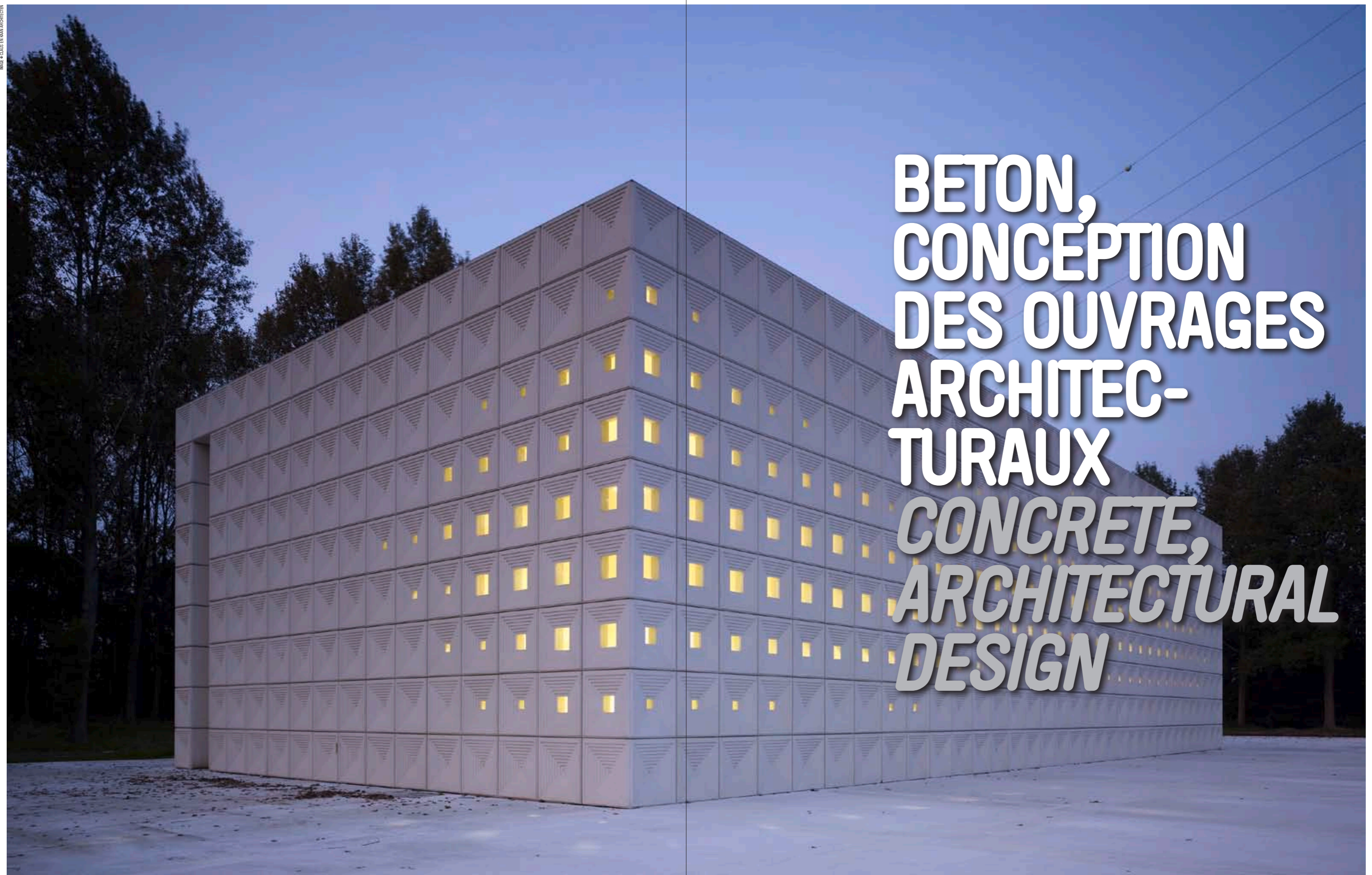
## III. Vérifications avec un modèle aux éléments finis



Modèle EL avec la nouvelle géométrie



Flèches sous poids propre



**BETON,  
CONCEPTION  
DES OUVRAGES  
ARCHITECT-  
TURAUX  
*CONCRETE,  
ARCHITECTURAL  
DESIGN***

# ANDREA BASSI

Architecte, Professeur, direction du Laboratoire d'architecture urbaine et réflexion énergétique (LAURE)  
Enseignement et recherche en projet d'architecture



## Biographie

- 1964 naissance à Lugano  
1991-1993 Chef de projet chez Burkhalter & Sumi à Zürich  
1994-2006 Atelier d'architecture Andrea Bassi

## Principaux concours

- Centre Civique de Pregassona (TI) 1999, 1<sup>er</sup> prix  
Ecole primaire de la Maladière à Neuchâtel 2000, 1<sup>er</sup> prix  
Groupe scolaire, crèche et divers aux Ouches (GE) 2001, 1<sup>er</sup> prix  
Siège administratif industrie Techron à Raron (VS) 1<sup>er</sup> prix  
Siège banque Pictet & Cie aux Acacias (GE) 2001, 1<sup>er</sup> prix  
Aménagement du centre ville de Sierre 1<sup>er</sup> prix secteur Sud  
Immeubles locatifs sociaux, rte de la Chapelle, Lancy, 1<sup>er</sup> prix  
Pavillons de l'Herbier, Jardin Botanique, Genève, 1<sup>er</sup> prix  
Centre Biotechnologique et services communaux, lieu-dit "La Piscine", Plan-les-Ouates, 1<sup>er</sup> prix

## Principales réalisations

- Diverses villas et transformations d'habitations à Genève, Vaud, Valais et Tessin  
Centre de Diagnostic Radiologique à Carouge, 1998  
Ecole primaire de la Maladière à Neuchâtel, 2005  
Groupe de quartier des Ouches à Genève, 2005  
Siège banque Pictet & Cie à Genève, 2006  
Fondation Baur, collection d'arts japonais à Genève, 2010  
Bâtiment Clairière, UEFA, Nyon, 2010

## Articles

Aktuelle Wettbewerbs Scene, Zürich. AMC, Paris. Archi, Bellinzona | Architektur + Wettbewerbe, Stuttgart | Archithese, Sulgen | Architecture Suisse, Lausanne | Bauwelt, Berlin | Faces, Genève | Le Temps, Genève | NZZ, Zürich. Rivista Tecnica, Lugano | Spazio & Società, Milan | Technique & architecture, Paris | Tracés, Ecublens | Werk, Bauen+Wohnen, Zürich

## Principaux livres, catalogues et expositions

- La Romandie existe, éd. Hochparterre, 1998  
Matière d'art. Architecture contemp. en Suisse, éd. Birkhäuser, 2001  
Une constellation de 4 maisons, Galerie Attitudes, Genève, 2001  
Nouvelle Simplicité, Mouans Sartoux (F), 2002  
Schulhausbau. Der Stand der Dinge, éd. Birkhäuser, 2004  
Figures - Andrea Bassi, éd. Quart, 2004  
Andrea Bassi, la recherche d'une architecture concrète, EPFL, 2004.  
Matérialité, Institut international d'Architecture, Vico Morcote, 2011

## LAURE: Laboratoire d'architecture urbaine et réflexion énergétique

### Objectifs

La réflexion principale que nous développerons dans notre atelier pour les quatre années consécutives d'enseignement à l'EPFL portera sur des projets d'architecture dans la ville.

Nous avons choisi un territoire emblématique en profonde mutation, une zone industrielle en activité au coeur de la ville internationale de Genève - zone à même d'accueillir une extension de la ville en pleine expansion. Nous postulons d'en faire son portrait dans le temps qui nous est donné.

Les objectifs pédagogiques visent l'élaboration de projets d'architecture dans un contexte urbain. La recherche de valeurs collectives (espace public, mixité programmatique) propres à l'espace de la ville sera également l'objectif de nos réflexions. L'étudiant adoptera une attitude face à cette problématique urbaine.

### Contenu

Les morceaux de ville sur lesquels nous nous pencherons sont les quartiers de la Praille et des Acacias à Genève. Chaque semestre, à l'intérieur de ce compartiment territorial, un lieu sera désigné et fera l'objet d'une nouvelle réflexion et d'un nouveau projet.

Le développement des projets devra englober l'aspect de la reconversion programmatique logements/bureaux/activités commerciales existantes. En parallèle, les techniques de construction en béton préfabriqué seront au centre de notre réflexion (en lien direct avec les questions du futur telles que : économie, développement durable et hautes performances thermiques).

## Notre équipe

- Professeur Andrea Bassi  
Assistants Emy Amstein  
Bertrand Counson  
Leo Fabrizio  
Enrico Slongo  
Thierry Voellinger  
Julien Woessner  
Secrétaire Rosa Ana Turielle

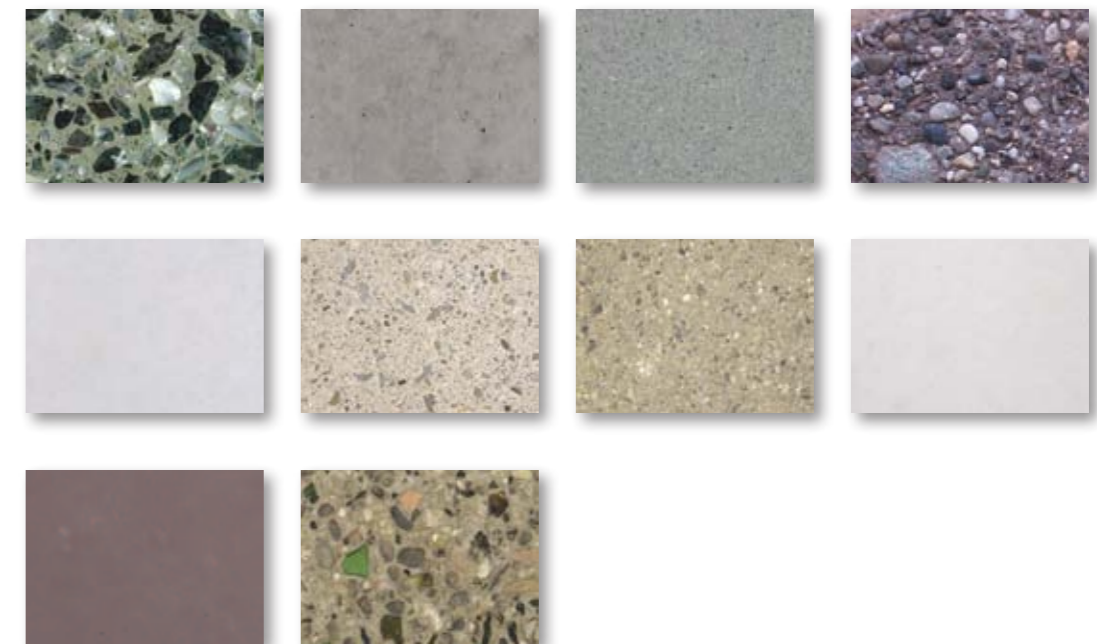
# LE BETON N'EST PAS SEULEMENT GRIS

Dans la nature, la perception que nous avons des choses est intimement liée à leur forme et à leur matérialité. La matérialité, c'est ce que nous reconnaissons de la matière et plus particulièrement sa surface. En architecture, nous pouvons faire le même constat. La dichotomie forme-matérialité est indissociable de la façon dont nous percevons les objets. La matérialité a une charge émotionnelle puissante, elle forge le caractère des choses.

Notre "recherche patiente" s'est concentrée sur le béton, en particulier pour son caractère urbain, mais également pour la continuité plutôt que la nouveauté qu'il représente. Nous avons besoin de calme et de constance pour chercher un chemin durable.

Le béton moderne est un matériau jeune. Le verbe bétonner est aujourd'hui synonyme de destruction de l'environnement, pourtant, le béton est un matériau autant universel que régional, il est économique, simple et courant. Il a une multitude de compositions possibles et dans sa mise en oeuvre normale, est respectueux de l'environnement.

L'évolution de la technique du béton est dans une phase de maturité, ce qui permet d'exploiter au mieux ses potentialités expressives et constructives. Dans nos projets, nous recherchons la tension qui existe entre le lieu, la forme, le programme et la matérialité d'une architecture. Ces composantes interagissent entre-elles comme dans une constellation, elles n'ont pas de liens directs, mais elles existent en tant que figure concrète dans notre regard.



# JOELLE SALOMON CAVIN

Maître assistante en politiques territoriales UNIL / IPTEH



Après des études en Géographie et en Urbanisme à Paris, Joëlle Salomon Cavin a été assistante en aménagement du territoire à l'École polytechnique fédérale de Lausanne de 1997 à 2002. Entre 2001 et 2002, elle a également été aménagiste pour le service de l'aménagement du territoire du canton de Neuchâtel. En 2003, elle a soutenu sa thèse de doctorat en sciences consacrée à l'hostilité à l'égard de la ville et ses conséquences sur l'aménagement du territoire. Elle est ensuite partie deux années en Grande-Bretagne dans le cadre d'un projet avec le Department of City and Regional Planning de l'Université de Cardiff. Ces recherches ont été publiées en 2005 sous le titre "La ville, mal aimée?" et se sont également soldées par l'organisation d'un colloque international en 2007 à Cerisy-la-salle (site web du colloque).

Depuis 2005, elle est chercheuse associée au Laboratoire Dynamiques sociales et recomposition des espaces du CNRS à Paris et a rejoint en 2006 l'équipe de l'IPTEH. Elle est actuellement maître assistante en Politiques territoriales et chargée d'enseignement à l'Université de Neuchâtel.

Elle a publié de nombreux articles et coédité en 2010 un ouvrage collectif intitulé "Antiurbain, origines et conséquences de l'urbaphobie". Le magazine UNISCOPE de l'UNIL consacre un dossier complet à l'occasion de la publication de cet ouvrage. Il est présenté par l'auteur dans une vidéo disponible sur Youtube.

## Domaines de recherche

Elle s'intéresse aux fondements imaginaires et aux effets territoriaux des relations ville-campagne, ville-nature. Ces relations sont analysées via les thèmes de l'urbaphobie, des stratégies urbaines des défenseurs de la nature et de l'agriculture urbaine.

## Mots-clés

Urbaphobie, rapports ville-nature et ville-campagne, imaginaires géographiques, agriculture urbaine, instruments de l'aménagement, politiques territoriales, développement urbain durable.



## Groupe "Politiques Territoriales" (UNIL IPTEH)

La ville vue du dehors

L'urbanisation généralisée de même que les préoccupations environnementales globales nous poussent à transcender nos catégories traditionnelles d'analyses des politiques territoriales. Dans ce contexte, la posture générale du groupe Politiques territoriales au sein de l'IPTEH est d'abord "la ville vue du dehors", c'est-à-dire via des territoires, des disciplines ou des thématiques qui traditionnellement en sont exclues.

Ce dehors est non seulement entendu comme un dehors géographique (qui dans la pratique est de plus en plus difficile à définir), mais également comme un dehors produit par des acteurs qui habituellement ne s'occupent pas de la ville (par exemple : les associations de protection de l'environnement), par des activités qui n'ont communément pas cours en ville (par exemple l'agriculture), par des professions dont la ville n'est pas a priori le terrain de jeu privilégié (par exemple, les biologistes), par des préoccupations qui ne sont en général pas immédiatement rattachées à la ville (par exemple énergie, santé, gestion de l'eau) ou par des politiques publiques non rattachées à la gestion urbaine (par exemple protection de la forêt, gestion des cours d'eau).

L'intérêt de cette approche en miroir est de pouvoir réinterroger la ville et ses pratiques en se fondant sur un regard extérieur, et également de comprendre en quoi l'intégration urbaine modifie en retour ce regard.

Les questions qui traversent les recherches que mènent le groupe Politiques Territoriales sont :

- > pourquoi et dans quels contextes "ces dehors" en viennent-ils à intégrer la ville ?
- > avec quelles représentations ?
- > avec quelles actions et quelles pratiques ?
- > avec quels impacts sur les modes de régulation du territoire ?

Actuellement, les domaines principaux d'investigation du groupe Politiques Territoriales sont :

- > Le foncier : politiques foncières, gestion foncière, urbanisme opérationnel, marchés fonciers, acteurs immobiliers, Public/Privé, PPP ;
- > les rapports ville-nature : l'agriculture urbaine, les stratégies urbaines des défenseurs de la nature, la ville mal-aimée ;
- > la gouvernance environnementale : quartiers durables, gestion des risques dans l'aménagement du territoire, sécurité territoriale, justice environnementale et conditions d'émergence de nouveaux territoires après les catastrophes.

## Références du texte ci-contre

1. DETEC, *Biodiversité Un équilibre à respecter*, 22.5.2009.
2. Joëlle Salomon Cavin, *La ville mal-aimée*, PPUR, Lausanne, 2005.
3. François Walter, *La Suisse urbaine*, 1994, Georg, Genève.
4. Joëlle Salomon Cavin et Pierre-Alain Pavillon, *L'urbanisation : ennemie ou alliée du paysage suisse ?*, EspacesTemps.net, Actuel, 17.12.2009

# LE BETONNAGE DU PAYSAGE SUISSE : HISTOIRE D'UN DESAMOUR

Le béton à mauvaise presse dès lors que l'on parle de paysage en Suisse. Dans son initiative "Sauver le sol suisse" Franz Weber déclare ainsi vouloir sauver "les derniers mètres carrés non encore bétonnés de notre précieuse terre suisse" alors que dans un récent rapport de l'office chargé de l'environnement on peut lire "En Suisse, le rythme du bétonnage est d'environ 1m<sup>2</sup> par seconde"<sup>1</sup>.

On pourrait multiplier à loisir les exemples d'utilisation récente dans les médias de ce type de formule mobilisée non seulement dans les milieux de la protection de la nature mais également dans ceux de l'aménagement du territoire.

Le bétonnage à partie liée avec la condamnation de l'urbanisation. C'est une image récurrente qui vise à désigner l'urbanisation comme éternelle dévoreuse des campagnes. Il constitue l'une des figures types d'un discours anti-urbain non spécifique à la Suisse qui trouve ses racines dans une opposition entre une ville laide, artificielle, minérale et finalement nocive pour l'homme et la nature, et une nature/paysage harmonieuse, vivante et régénérante.

Plus particulièrement en Suisse, la ville est depuis longtemps mal-aimée<sup>2</sup>. Ce désamour est intimement lié à la construction de l'identité nationale autour du mythe des Alpes et l'idée que la véritable Suisse est un pays profondément rural<sup>3</sup>. L'idéalisation du monde rural et de la nature a eu comme corollaire des discours très hostiles à la grande ville. Tout au long du 20<sup>e</sup> siècle, l'avancée urbaine a été associée à un danger pour des raisons qui tiennent autant de la crainte, pour partie, légitime de la destruction des paysages que de la peur irrationnelle d'une dégénérescence physique et morale associée à la ville.

Le caractère mobilisateur des slogans anti-bétonnage du paysage ne fait aucun doute. A chaque seconde qui passe, on imagine le rouleau compresseur et la bétonneuse avancer sur un paysage fragile et engloutir des espèces menacées. Il permet en outre la dénonciation du problème et des conséquences bien réelles de la fragmentation du territoire notamment en Suisse.

Cependant, il est éminemment critiquable. Il repose la plupart du temps sur des arguments fallacieux, à l'instar cet indicateur du "m<sup>2</sup> de sol bétonné par seconde"<sup>4</sup>, qui tendent finalement à faire apparaître n'importe quelle construction comme dommageable pour le paysage.

Surtout, le slogan du bétonnage participe à entretenir l'image négative de l'urbanisation en Suisse au moment même où l'on cherche à vanter les mérites de la ville durable. Une véritable protection du paysage suisse nécessite de concevoir d'une toute autre manière la ville en général et le béton en particulier.

# THIERRY VOELLINGER + DAMIEN DREIER

## AUTEURS AUTHORS

Thierry Voellinger



Né en 1969, il obtient le diplôme en architecture à l'EPFL en 1998. Il travaille trois ans en tant qu'illustrateur d'architecture dans les bureaux de Kraaijvanger-Urbis et Claus en Kaan Architecten à Rotterdam et professe ensuite en tant qu'architecte indépendant.

En 2004, il rejoint l'enseignement de premier année d'architecture à l'EPFL du professeur Vincent Mangeat. Dans ce laboratoire, il enseigne l'usage de la maquette dans le projet d'architecture. Parallèlement, il développe et approfondit ce thème dans le cadre de son cours à l'école d'art et design de Genève.

À partir de 2006, il élabore le projet d'enseignement « Critique et Théorie du Projet » en 3<sup>e</sup> année du Professeur Andrea Bassi pour le Laboratoire d'Architecture Urbaine, LAURE. Il y enseigne la structure, la conception de la façade préfabriquée et la matérialité du béton.

Il effectue un doctorat dont le thème principal est la mise au point d'un procédé d'analyse pour optimiser des murs composites en béton préfabriqué.

Damien Dreier



Damien Dreier est né en 1982 à Genève. Il obtient un diplôme d'ingénieur civil de l'EPFL en 2006 et le titre de docteur en sciences techniques de la même école en 2010 avec une thèse sur l'interaction sol-structure dans le domaine des ponts intégraux.

Dés 2006, il est membre actif du Werkbund Suisse dans le groupe Romandie. Dans ce cadre, il acquiert un intérêt prononcé pour les métiers ayant une vocation de création. En particulier, son intérêt pour l'architecture se renforce lors de son engagement à temps partiel dès 2010 dans le bureau Dreier Frenzel Architecture - Communication à Lausanne. Lors de ce mandat, il travaille entre autre sur le développement de la relation entre la structure et l'architecture des bâtiments du futur Eco-quartier de la Jonction à Genève.

Lors de son travail d'assistant-doctorant, au sein du laboratoire de la Construction en Béton (IBETON) dirigé par le Prof. Muttoni, en plus de sa recherche scientifique dans les domaines vastes que sont le béton, la géotechnique, les ponts ainsi que leurs interactions, il s'implique dans l'enseignement des ingénieurs civils et architectes. Naît de cette implication une coopération avec le laboratoire d'Architecture Urbaine et Réflexion Energétique (LAURE) dirigé par le Prof. Bassi sur le thème de l'application des grandes portées structurales dans les bâtiments comportant une mixité programmatique.

Depuis 2011, il travaille comme ingénieur civil dans le bureau T Ingénierie à Genève tout en conservant une activité dans le domaine de l'enseignement à l'EPFL.

## MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

Enseignement de la construction en béton  
Façade en béton préfabriqué  
Structure en béton  
Matérialité du béton

## EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM

Personnel LAURE  
Prof. Andrea Bassi  
Thierry Voellinger  
Bertrand Counson  
Enrico Slongo  
Emy Amstein  
Rosana Turielle

Personnel IBETON  
Aurelio Muttoni  
Miguel Fernandez Ruiz  
Galina Argirova  
Yvonne Buehl-Brauch  
Olivier Burdet  
Stefano Campana  
Thibault Clément  
Damien Dreier  
Gilles Guignet  
Stefan Lips  
Michael Markus Rupf  
Luca Tassinari

## OBJECTIFS OBJECTIVES

Donner aux étudiants architectes en 3<sup>e</sup> année des notions fondamentales pour élaborer :

- > une structure porteuse béton pour un programme mixte incluant parkings, bureaux, logements, activités industrielles et commerciales
- > une façade préfabriquée en éléments sandwich béton
- > des choix de composition du béton pour atteindre une matérialité définie

Permettre aux étudiants d'intégrer ces notions dans le développement de leur projet de semestre.

## METHODOLOGIE METHODOLOGY

Dans le cadre de l'enseignement du projet en 3<sup>e</sup> année d'architecture, le laboratoire LAURE (Laboratoire d'Architecture Urbaine et de Réflexion Energétique) propose d'aborder successivement différentes échelles auxquelles l'architecte est confronté dans son travail : la ville, le quartier, le bâtiment, la typologie, le détail constructif, la matérialité.

Pour cadrer le travail de l'étudiant et parce que c'est le matériau le plus utilisé pour construire les villes, les étudiants doivent concevoir leur projet en béton : structure porteuse en béton armé et façades porteuses en éléments préfabriqués.

### Structure porteuse

Pour enseigner les principes de la structure porteuse, des cours et des exercices pratiques sont proposés aux étudiants. Ils sont encadrés par des docteurs en Génie Civil et des assistants-architectes. Les notions enseignées sont : bref historique de la construction béton, trames structurales en fonction du programme des locaux, conception de longues portées, voiles

### Façade préfabriquée

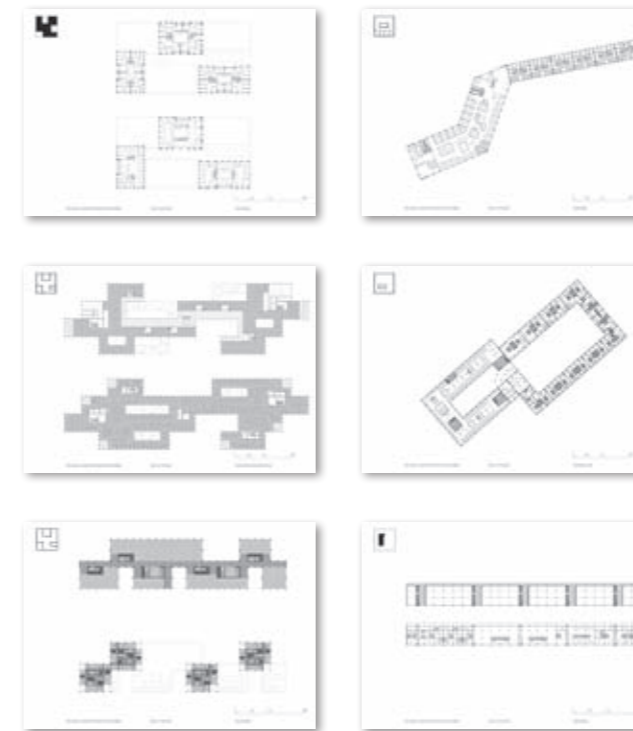
Pour enseigner les principes de la façade préfabriquée, des cours et un exercice pratique sont proposés aux étudiants, ainsi qu'une visite d'une entreprise de béton préfabriqué basée à Genève (Prelco SA). Ils sont encadrés par des assistants-architectes et des professionnels de la construction béton. Les notions enseignées sont : bref historique de la préfabrication béton, dimensionnements des éléments sandwich, détails constructifs type, chaîne de production des éléments

### Matérialité

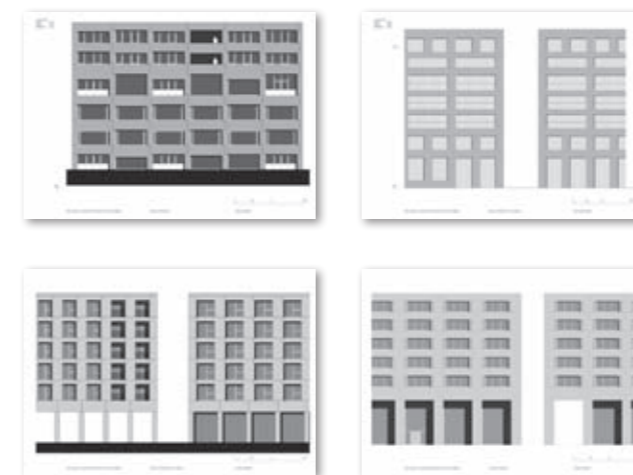
Pour sensibiliser les étudiants à la matérialité, des visites de bâtiments et deux exercices pratique sont proposés aux étudiants. Le premier exercice consiste à décrire, sur la base d'échantillons réels, la composition de différents bétons de couleurs et de textures variées et le deuxième demande aux étudiants de couler un cube de 10cm d'arête, en choisissant eux-mêmes les granulats et en traitant les faces de manière différenciée : ponçage, désactivage, acidification, matriques...

## LA CONSTRUCTION BETON DANS L'ENSEIGNEMENT DU PROJET ARCHITECTURAL CONCRETE BUILDING AS TAUGHT IN THE ARCHITECTURAL PROJECT WORKSHOP

## RESULTATS RESULTS



Planches typologie / structure, rendus de divers semestres



Planches façade préfabriquée, rendus de divers semestres



Cubes réalisés par les étudiants à l'occasion de l'exercice béton

## CONCLUSIONS CONCLUSIONS

L'intégration de cours ciblés sur un matériaux de construction dans l'enseignement du projet, permet de mettre en relation les aspects structurels, constructifs et expressifs d'un bâtiment avec d'autres dimensions du projet : l'intégration du bâtiment dans son contexte urbain, la gestion de la lumière naturelle, l'organisation des espaces, etc...

Les interventions ciblées de spécialistes venant d'autres disciplines permettent aux étudiants architectes de prendre conscience de la complexité des enjeux liés à un choix de matériaux et à la nécessité de collaborer dans le cadre d'équipes interdisciplinaires.

# HISTOIRE ET BETON

## *HISTORY AND CONCRETE*



# ROBERTO GARGIANI

Professeur, EPFL / LTH, direction du Laboratoire de Théorie et d'Histoire 3 (LTH3) de l'Institut d'Architecture et de la ville, faculté ENAC, enseignement et recherche en histoire de l'architecture et de la construction



- 1983 diplôme d'architecte à la Faculté de Florence
- 1992 doctorat en histoire de l'architecture et de l'urbanisme
- 1956 naissance en Italie

Roberto Gargiani a publié plusieurs ouvrages sur Perret, Le Corbusier, Labrouste, Sempër et Brunelleschi.

Il enseigne l'histoire de l'architecture à Florence, Rouen, Paris, puis, dès 1999, à la Faculté d'architecture de Roma Tre, où il est nommé professeur ordinaire en 2001.

Dès 1999, il assume l'enseignement de l'Histoire de l'architecture en 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> années à l'EPFL, en tant que professeur invité. Puis il est nommé professeur ordinaire en histoire de l'architecture et de la construction à l'Ecole d'architecture de la Faculté ENAC dès mars 2005.

## Publications représentatives

*Principi e costruzione nell'architettura italiana del Quattrocento*, Gargiani, Roberto, Roma-Bari, Laterza, 2003, 731 pages.

*Storia dell'architettura contemporanea (1998)*, Gargiani, Roberto, Laterza, Roma-Bari, 2005 (6<sup>e</sup> éd.), 532 p.

*Entre unité et assemblage: apologie du joint*, Gargiani, Roberto, *matières*, n° 8, 2006, pp. 83-101.

*Rem Koolhaas/OMA*, Gargiani, Roberto, Laterza, Roma-Bari, 2006, 231 p.

*Archizoom Associati 1966-1974, de la vague pop à la surface neutre*, Gargiani, Roberto, Electa, Milan, 2007, 336 p.

*Archizoom Associati 1966-1974, dall'onda pop alla superficie neutra*, Gargiani, Roberto, Electa, Milan, 2007, 344 p.

*La colonne. Nouvelle histoire de la construction*, Gargiani, Roberto (dir.), PPUR, Lausanne, 2008, 538 p.

*RemKoolhaas / OMA. The Construction of Merveilles*, Gargiani, Roberto, PPUR, 2008, 344 p.

*Histoire de l'architecture moderne. Structure et revêtement*, Fanelli, Giovanni Gargiani, Roberto, PPUR, Lausanne, 2008, 464 p.

## Laboratoire de théorie et d'histoire (LTH)

Le LTH a pour mission de développer et renouveler les réflexions en matière d'histoire et de théorie de l'architecture. Dans le cadre de sa nouvelle intégration à l'Ecole d'Architecture de la Faculté ENAC, les missions générales du LTH sont :

**enseignement :**  
apporter à l'enseignement ses compétences en matière d'histoire et de théorie de l'architecture et de l'urbain et produire des outils de connaissance (polycopiés, comptes-rendus de travaux d'élèves, etc.);

**recherche :**  
développer des recherches é la fois sur des questions disciplinaires et transdisciplinaires; mettre en valeur ces recherches par l'organisation de conférences et de colloques, et par des publications spécifiques (revue *matières*, cahiers de théorie, monographies, livres collectifs, etc.); mettre en place une formation doctorale de troisième cycle;

**services :**  
offrir ses services é des partenaires extérieurs, publics ou privés, en matière de connaissance de l'architecture et de l'urbain (recensements, catalogages, expertises, monographies de bâtiments, etc.);

**échanges :**  
établir des relations entre connaissances liées é des situations locales et cadres internationaux de réflexion, et développer des échanges avec des institutions ou des écoles étrangères.



# BETON ENSEVELI : REDECOUVERTE D'UN MATERIAU AU XVIII<sup>E</sup> SIECLE

Nessun secolo come il Settecento è segnato da una effervescenza di studi, esperienze, ricerche e realizzazioni cruciali per la messa a punto del cemento, dopo quanto era stato ideato e sperimentato all'epoca dell'impero romano. Le tecniche derivate dall'opus caementicium e in uso durante il Medioevo, quanto messo in opera e teorizzato da tra Quattrocento e Seicento, non sono che tappe di una reinvenzione della muratura in calcestruzzo per fondazioni, cisterne, muri o volte che solo nel Settecento conosce un nuovo e glorioso inizio destinato a orientare le ricerche nei secoli a venire. Nella prospettiva storica, le opere nei secoli che separano le invenzioni settecentesche da quelle romane non sembrano altro che geniali quanto sporadici tentativi di ridare attualità ad una tecnica dalle potenzialità straordinarie, nell'attesa del delinearsi di un nuovo impero che sostanzialmente decretò il fondamento progressivo di quella tecnica, l'impero di quello che verrà definito il capitalismo otto-novecentesco, con le sue esigenze di economia di cantiere, di impiego di mano d'opera non specializzata, di rapidità di esecuzione, di magnificenti opere ingegneristiche per un nuovo dominio del paesaggio naturale. Non è un caso che, al di là delle accademiche disquisizioni sul primato dell'architettura greca nella definizione di quello che dovrà essere il modello per i monumenti contemporanei, sia la costruzione romana, con le sue rovine e le fonti scritte, da Vitruvio a Plinio, e in cui si ritiene siano conservati i segreti delle ricette per comporre il meraviglioso materiale artificiale di cui i secoli hanno dimostrato la solidità, a diventare il centro degli interessi di tecnici, chimici, inventori e ingegneri protagonisti della nuova e definitiva affermazione del calcestruzzo che si delinea nel corso del Settecento.

Solo sullo sfondo della inarrestabile sequenza di invenzioni e sperimentazioni delineatesi soprattutto nella seconda metà del Settecento, è possibile cogliere tutto il potenziale dei disegni di Piranesi e di Boullée, e ridare loro il valore che a tratti hanno assunto nella evoluzione della costruzione in calcestruzzo, di cui hanno rappresentato aspetti complementari, dall'apologia di Piranesi dell'era romana dell'invenzione del calcestruzzo, alle visioni di Boullée di cosa sia possibile immaginare con quel materiale nel Settecento, dalla testimonianza appassionata del potere evocativo delle rovine della costruzione in opus caementicium, alla prefigurazione di forme sintetiche per la nuova costruzione in calcestruzzo. Tra gli estremi rappresentati dai disegni di Piranesi e di Boullée si dispiega una costellazione di inesorabili e fondanti esperienze scientifiche di cui sono protagonisti inventori e ingegneri, e che prendono spesso la forma di tabelle di valori in cui si confrontano dati numerici tesi a dimostrare la supremazia del cemento, fabbricato secondo la ricetta romana, sulle potenzialità degli altri leganti. In tutte queste esperienze prevale un singolare uso del calcestruzzo che ne dimostra emblematicamente al tempo stesso il fenomenale potenziale costruttivo e la condizione di estrema subordinazione in cui è costretto rispetto ai materiali tradizionali, dalla pietra al mattone: viene colato in fosse per fondazioni o cisterne. Ma proprio le sue potenzialità costruttive e di fabbricazione lo riscatteranno dall'essere costretto, dapprima, ad imporsi in opere non visibili, sottoterra o sott'acqua.

# SALVATORE APREA

Doctorant EPFL / LHA3



- 2009- Assistant-doctorant au Laboratoire d'Histoire de l'Architecture 3 de la Faculté ENAC de l'EPFL
- 2004 Master en Histoire de l'Architecture à l'Université Roma Tre
- 2002 Diplôme d'architecte à la Faculté de Naples
- 1973 Naissance en Italie

Il a mené des recherches, à l'Université de Naples (1998-2000) et à la Fondazione Adriano Olivetti (2004-2006), sur les logements sociaux réalisés en Italie entre la fin de la Seconde Guerre Mondiale et les années soixante-dix. Il a travaillé à l'aménagement du territoire pour la commune de Rome, la région de Lazio et l'Université La Sapienza (2004-2007).

## Publications représentatives

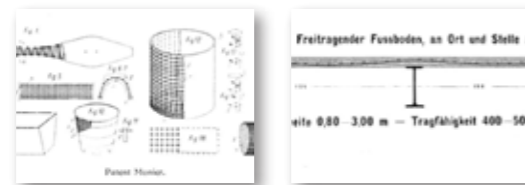
"Corviale, un'idea di città", in *Immaginare Corviale*, Milano, Mondadori, 2006.

"Making waves", in *L'utopia praticabile, ipertesti metropolitani*, Roma, Gangemi, en cours de publication.

## Thèse de doctorat

La thèse a pour thème le développement de la construction moderne en béton en Allemagne, des premières décennies du XIX<sup>e</sup> siècle aux réalisations en béton armé des années quatre-vingt-dix.

L'historiographie traditionnelle attribue à l'Allemagne un rôle très important dans l'histoire de la construction en béton armé à partir des années 1890, à la suite du succès du brevet allemand de Joseph Monier. Au contraire, le but de cette thèse est de reconstruire l'histoire de la construction en béton en Allemagne d'un point de vue tout allemand, en considérant le brevet Monier comme un élément révolutionnaire qui, de l'étranger, va s'introduire dans un pays qui est déjà en train de développer sa propre culture du bâtir en béton.



# LE PLACEMENT DE L'ARMATURE DANS UNE PLAQUE EN BETON

## Le placement de l'armature dans une plaque en béton : propositions de Wayss et Koenen, 1880-87

Dans l'histoire des techniques de construction en béton armé, le placement de l'armature métallique est une question cruciale, et cette question est abordée au cours de la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. La contribution donnée à ce sujet, par les ingénieurs allemands Gustav Adolf Wayss et Matthias Koenen, représente un véritable tournant entre l'approche empirique des premières expérimentations menées sur ce sujet et l'approche scientifique propre de la construction moderne. La collaboration des deux ingénieurs, bien qu'historiquement controversée, produit une alchimie qui aboutit à trois résultats fondamentaux : rationalisation du placement de l'armature, élaboration d'un modèle mathématique de dimensionnement et divulgation de la méthode de construction ainsi mise au point. L'objet élémentaire, à partir duquel commence le travail de Wayss et Koenen, est une simple plaque armée. En fait, dans la version allemande du brevet Monier apparaît déjà un échantillon de plaque en béton contenant une maille en fer placée au milieu de la section de béton. Monier décrit cette petite plaque comme l'élément essentiel pour fabriquer les "planchers, cloisons, dallages, pavages, etc.". Wayss se concentre d'abord sur les applications de ce brevet, qu'il a partiellement acquis, afin de produire des cloisons résistantes au feu. Koenen, par contre, en étant un expert en structure, se concentre plutôt sur l'armature et propose de la placer là où se concentrent les tensions de traction. Afin de pousser à fond l'analyse de la question des tensions de traction et de vérifier sa proposition, Koenen tourne la cloison de Wayss et travaille sur une plaque droite, dont il arrive à en fournir un modèle mathématique de dimensionnement. De son côté, Wayss, qui vise toujours à l'exploitation commerciale des résultats des recherches théoriques, organise une démonstration publique d'essais de résistance sur des échantillons de plaques, arches et tuyaux fabriqués selon la théorie de Koenen. Le succès de l'opération le pousse à en divulguer les résultats à travers une publication dont le caractère pratique est exalté par l'insertion de tables pour le dimensionnement rapide des plaques. La plaque, donc, en plus d'être un élément de base pour construire en béton armé, devient aussi le moyen pour en diffuser la technique de mise en œuvre.

C'est à ce moment-là que le but de l'entreprise des deux ingénieurs allemands peut être considéré comme achevé. Le béton armé, qui avait été une des techniques de mise en œuvre du béton, devient finalement un matériau de construction, bien qu'hybride, et en effet, dans la démonstration organisée par Wayss, il a été montré sous forme d'échantillons sans aucune référence à des applications finies. Cela devient clair alors, que chaque objet fabriqué en béton armé doit être pensé dans sa forme extérieure aussi bien que dans sa structure intérieure. Par contre, le champ de l'imagination et de l'expérimentation des techniques de construction va se réduire car Wayss et Koenen ont montré une direction précise qui, en fait, se montrera gagnante.

# ANNA ROSELLINI

Chercheur post-doctorant EPFL



- 2009 Elle est chercheur post-doctorant auprès l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- 2008 Doctorat en Histoire de l'Architecture et de l'Urbanisme, Science des Arts et Restauration à l'Ecole des Hautes Etudes de Venise (SSAV)
- 2004 Diplôme d'études supérieures en Histoire de l'Architecture à Université de Roma 3
- 2003 Diplôme en Histoire et Conservation du Patrimoine Architectural à l'Université IUAV de Venise
- 1977 Naissance en Italie

## Publications

*La sede dell'INAL a Venezia di Giuseppe Samonà, 1947-1961: oltre lo strutturalismo*, dans, Giovanni Marras, Marco Pogacnik (dir.), *Giuseppe Samonà e la scuola di Venezia*, Il Poligrafo, Padova 2006.

*Oltre il "béton brut": Le Corbusier e la "nouvelle stéréotomie"*, dans, Flaminia Bardati, Anna Rosellini (dir.), *Arte e Architettura. Le cornici della Storia*, Bruno Mondadori Editore, Milano 2007.

*Les pilotis de Le Corbusier: les questions de la "la colonne ronde et évidée" et du coffrage*, dans, Roberto Gargiani (dir.), *La colonne. Nouvelle histoire de la construction*, PPUR, Lausanne 2008.

*"Sculptures moulées" di Le Corbusier*, dans, Cristina Baldacci, Clarissa Ricci (dir.), *Quando è scultura*, et al. Edizioni, Milano 2010.

## En cours de publication

*Charles-Edouard Jeanneret, consulente tecnico della Società Française de l'Everite, 1917-20*, dans, "Massilia. Annuaire d'Etudes Corbusiennes".

*Les plates-formes de Le Corbusier*, dans, Roberto Gargiani (dir.), *Architraves, planchers, plates-formes. Nouvelle histoire de la construction*, PPUR, Lausanne.

*Le Tetrahedron Floor System de Kahn dans la Yale Art Gallery*, dans, Roberto Gargiani (dir.), *Architraves, planchers, plates-formes. Nouvelle histoire de la construction*, PPUR, Lausanne.

Avec Roberto Gargiani, *Le Corbusier, Béton Brut and Ineffable Space, 1940-1965. Surface Materials and Psychophysiology of Vision*, PPUR, Lausanne.



# LE CORBUSIER: "BETON BRUT" ET "NOUVELLE STEREOTOMIE"

Le Corbusier a été le premier architecte à se questionner sur les possibilités artistiques du béton en tant que matière douée d'une potentialité expressive autonome. A travers une constante expérimentation menée dans tous ses chantiers après la Seconde Guerre mondiale, il a su produire une vaste gamme de solutions, riche d'effets plastiques, que seule une longue pratique de peintre et sculpteur a rendu possible.

Les expérimentations de Le Corbusier sur l'expressivité du béton se distinguent nettement de celles des grands constructeurs d'œuvres pour l'industrie, qui souvent laissent le béton apparent après le décoffrage sans se poser de question sur la qualité artistique des surfaces. Mais elles se distinguent aussi de celles de grands pionniers du béton armé, comme Perret, qui souvent dans leurs monuments ont voulu imiter, à travers le traitement du béton, le grain et la couleur des pierres.

A partir de l'Unité d'Habitation à Marseille, Le Corbusier se lance dans une exploration passionnée de la surface de béton à travers laquelle il conjugue l'imperfection et la brutalité des constructions industrielles avec l'aspiration à transformer la surface dessinée par la trame calculée des empreintes de joints de coffrages, en un "opus moderne", une "nouvelle stéréotomie".

L'Unité d'Habitation à Marseille est le chantier où le montage soigné et parfait des coffrages aboutit à la découverte de la beauté inattendue et décevante de toutes les "malfaçons" produites par les coffrages et le coulage. La découverte des surfaces rugueuses du béton devient la base d'une poétique, celle du béton brut, qui amène progressivement Le Corbusier à voir émerger la forme constructive de ce que lui même définit comme le "style Le Corbusier". Mais ce nouveau "style" du béton brut est marqué par une évolution continue, d'un chantier à l'autre, d'un lieu à l'autre du monde, au point que ce qui avait été célébré, à Marseille, comme le béton brut définitif de Le Corbusier ne sera en réalité que la première étape d'un processus dont l'aboutissement est un type de béton brut poli destiné à surprendre la critique internationale et à être considéré, aujourd'hui encore, comme non pleinement représentatif du "style Le Corbusier", et même dans quelques cas, une véritable trahison.

Si, dans la définition originelle de béton brut, l'adjectif brut impliquait l'existence des "malfaçons", dans ses dernières œuvres, au contraire, Le Corbusier entend éliminer de cet adjectif toute idée d'imperfection. Toute son expérimentation sur le béton brut montre la recherche d'une surface polie que Le Corbusier lui même entrevoit comme un objectif possible après la faillite spectaculaire des "malfaçons" de Marseille. Son béton brut deviendra lisse, déclinaison sublime de la matière, marquant une sorte de nouveau Purisme en architecture, nouveau parce que privé de cette peau périssable qui était l'enduit de ses premières villas.

# BETON DANS LES PAYS DU SUD *CONCRETE IN SOUTHERN COUNTRIES*

# KAREN SCRIVENER

Professeure ordinaire, directrice du Laboratoire de Matériaux de Construction (LMC) et présidente du Centre de Compétences pour les Sciences des Matériaux et Technologie (CCMX)



De nationalité anglaise, Karen Scrivener est née en 1958. Au cours de sa carrière, ses travaux et sa recherche ont traité les domaines suivants : Identification du développement microstructurale pendant l'hydratation du ciment. Elaboration d'une approche multitechnique pour étudier la microstructure des ciments et bétons, avec accent sur la quantification par analyse des images d'électrons rétrodiffusés. Caractérisation de l'auréole de transition de la pâte de ciment autour des granulats. Compréhension des processus de dégradation des bétons, en particulier le gonflement lié à la formation de l'étringite retardée dans les bétons étuvés.

Elle est en outre éditrice en chef du journal de recherche *Cement and Concrete Research* et directrice du Nanocem ([www.nanocem.org](http://www.nanocem.org)), le partenariat industriel pour la recherche fondamentale sur les matériaux cimentaires.

## Main publications

*Studying nucleation and growth kinetics of alite hydration using UIC*, Bishnoi S., Scrivener, K.L., *Cement and Concrete Research*, 39, 2009

*UIC: A new platform for modelling the hydration of cements*, Shashank Bishnoi, Karen L. Scrivener, *Cement and Concrete Research*, Volume 39, Issue 4, April 2009, Pages 266-274

*Innovation in use and research on cementitious material*, Karen L. Scrivener, R. James Kirkpatrick (University Illinois, USA), *Cem. Concr. Res.* (2007), doi:10.1016/j.cemconres.2007.09.025

*Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification*, Scrivener KL, *CEMENT & CONCRETE COMPOSITES* 26 (8): 935-945 NOV 2004

*The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete*, Scrivener KL, Crumie AK, Laugesen P, *INTERFACE SCIENCE* 12 (4): 411-421 OCT 2004

*Influence of limestone on the hydration of Portland cements*, Lothenbach, B; Le Saout, G; Gallucci, E; Scrivener, K, *Cement and Concrete Research* 38 (6):848-860

*A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation*, Schmidt, T; Lothenbach, B; Romer, M; Scrivener, K; Rentsch, D; Figi, R, *Cement and Concrete Research* 38 (3):337-349

*Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis*, Ben Haha M, Gallucci E, Guidoum A, Scrivener KL., *CEMENT AND CONCRETE RESEARCH* 37 (8): 1206-1214 AUG 2007

*What causes differences of C-S-H gel grey levels in backscattered electron images?*, Famu, C., K. L. Scrivener, et al., *Cement and Concrete Research* 32(9): 1465-1471., 2002

*Si-29 and Al-27 NMR study of alkali-activated slag.*, Wang, S. D. and K. L. Scrivener, *Cement and Concrete Research* 35(5): 769-774., 2005

## Laboratory of construction materials (LMC)

The Laboratory of Construction Materials provides research and teaching facilities, and carries out testing and construction work related to its competence. The Laboratory of Construction Materials is a competence centre for all construction materials. A highly qualified team of scientific collaborators and doctoral students under the lead of professor Karen Scrivener are doing intensive research to further improve the world's most used material - concrete. Our laboratory is also teaching students the bases of concrete and wood technology in the bachelor cycle and organizes lectures and projects, including master thesis, for further specialisation in the master cycle. Our atelier is performing tests on demand for partners from the industry.

Research activities at the Laboratory of Construction Materials (LMC) are focused on cementitious materials and on the micro-mechanics and processing of wood. The complexity and heterogeneity of cementitious materials make difficult the establishment of microstructure-property relationships. Within the LMC, quantitative microstructural characterisation and microstructural modelling provide a unique capability to study, understand and improve cementitious materials and their applications, ranging from mixing and placing to long-term performance (durability).

## Competence centre for materials science and technology (CCMX)

The Competence Centre for Materials Science and Technology (CCMX) is one of several centres of excellence initiated at the national level by the ETH Board in early 2006. It aims to serve the interests of Switzerland in the field of materials science in terms of research, education and technology transfer by reinforcing ties between academia, industry and the Swiss economy.

### Structure:

CCMX federates the strengths of four ETH Domain institutions (EPFL, ETHZ, EMPA, PSI) and of CSEM, and involves the active participation of partners from industry, from industrial associations and from Swiss universities. The Centre is headed by a Steering Committee comprising members from EPFL (chair), ETHZ, PSI, Empa, CSEM and industry.

### Research:

The Centre funds projects involving industrial partners and research institutions. CCMX concentrates on pre-competitive research and thus aims to strongly and positively influence this area in Switzerland. Each CCMX funded project includes at least two institutions and very often one or more industrial partners. This multi-partner project approach brings together the best competencies from all over Switzerland in specific materials science related domains.

### Conclusion:

CCMX aims to strongly and positively influence materials science in Switzerland by building a Swiss reservoir of expertise in the field of materials science. It builds bridges between the scientific and industrial communities and addresses targeted specific needs with particular emphasis on developments of interest for the applications of tomorrow.

# DEVELOPMENT OF CEMENTITIOUS MATERIALS

## Development of cementitious materials with reduced environmental footprint

Production of Concrete accounts for some 8% of world CO2 emissions. The best route to reducing this impact is to partially substitute conventional Portland cement with other materials. A diverse range of substitute materials can be used, from by-products of other industrial processes, such as blast furnace slag from the production of iron to calcined clays and fine limestone. Reducing the environmental footprint essentially comes down to making the best use of locally available materials. In this series of talks, we describe a partnership between EPFL and University de Las Villa, Santa Clara, Cuba to develop, low cost, low environmental impact materials for developing countries. At EPFL we work on the characterisation of the raw materials and their chemical reactions in concrete. We aim to identify simpler characterisation methods which can be applied in regional laboratories. On the Cuban side they are looking at the practical mixes and applications of these products.



# JOSE FERNANDO MARTIRENA

Professeur, La Havane  
Directeur du Groupe pour les matériaux de construction au CIDEM, Université Centrale de Las Villas, Santa Clara, Cuba



Prof. Dr. José Fernando Martirena Hernández graduated from Civil Engineering, Cuba in 1983 and received a PhD in Construction Technology, La Habana in 1988.

In 2004 Professor Martirena was awarded a Habilitation in Building Materials, La Habana.

Professor Martirena is Head of the Group for Building Materials at CIDEM, Universidad Central de las Villas, Santa Clara, Cuba, and consultant to various international institutions – among them the International Network for the Sustainable Habitat (EcoSur). Professor Martirena has more than 20 years of experience in low cost housing projects in many developing countries. He has been personally involved in the development of alternative pozzolanic binders and their application in small scale production.

He is a Fellow of the Alexander von Humboldt Foundation, Germany (2000); recipient of the Cuban Academy of Science National Prize (2005) and the UN-Habitat World Habitat Award (2007).

CIDEM stands for Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (Centre for Research & Development of Structures and Materials). It is a Research & Development Institute attached to the Faculty of Construction at the "Universidad Central de Las Villas", and while it is part of the Cuban Ministry of Higher Education, it has operative freedom. It manages several foreign currency bank accounts, sells its services in the local market (to Ministries and firms) and internationally (consultancies and contracts for planning in Latin America and Africa).

As well, CIDEM is a Project Center of the Faculty for Construction and has specialized in the practical application of ecologically and economically sustainable construction materials and technologies. Its status of being part of the University and being able to count on its staff and installations, but having achieved a high degree of self-financing through marketing their services and know-how within and outside of Cuba to Ministries, Municipalities, Commercial firms and NGO's, gives them a high degree of operational independence and allows flexibility.

CIDEM addresses different areas of construction with a practically minded approach. The main thrust is in the field of sustainable technologies for the manufacture of ecomaterials. The scope of CIDEM's work is very wide, and includes fundamental and applied research, technology development and practical implementation, mainly in social projects. The fundamental research is carried out in close connection with Universities in Europe (Germany, Switzerland) and North America (Canada). The applied research is basically done in Cuba and other countries of the region, and includes development of the hardware (machinery) for the manufacture of the newly developed materials. Implementation and follow up is often done in collaboration with other institutions, mainly NGOs or local governments, through donor projects for vulnerable communities, where disaster preparedness and mitigation have a great priority.

The technologies developed are oriented to small-scale production, suitable for rural and suburban areas. This type of small-scale production would stimulate the local economy through creation of new job opportunities. Furthermore, the environment is protected since potential threats in the form of wastes are profitably and/or effectively used. Great success has been reported in the production of Microconcrete Roofing Tiles (MCR), Lime Pozzolana Cement (CP-40), and precast concrete elements of small format (hollow concrete blocks). There are currently 19 ecomaterials workshops in full operation throughout Cuba, and another 15 outside Cuba, mostly in Central America (Nicaragua, Honduras, Panama, Guatemala), South America (Colombia, Ecuador), and Africa (Namibia, Nigeria, Mozambique).

CIDEM was founded back in 1992, initially as a R&D unit, and in 2004 was recognized as an independent Center for Research by the Cuban Ministry of Science. The work with communities began in 1995 and the first project implemented in 1996. At present it has been involved in the implementation of 10 international projects, funded by international donors, such as GTZ (Germany), SDC (Switzerland), AEICI (Spain), Swiss Red Cross (Switzerland), DESWOS (Germany), EU-Werkhof Verein e.V. (Germany), DAAD (Germany), Alexander von Humboldt Foundation (Germany), and CIDA (Canada).

CIDEM is an active member of the EcoSur network (Network for an Ecological and Economical Habitat, [www.ecosur.org](http://www.ecosur.org)) which includes different institutions (NGO's, Parastatal, private companies) from 13 different countries of Latin America and is active member of the BASIN network (Building Advisory Service and Information Network, led by GATE, ITDG, SKAT and CRATerre).

# A CHOICE FOR DEVELOPING COUNTRIES

## Reducing the clinker factor in cement manufacture : a choice for developing countries

The increase of urban population in developing countries poses a huge demand on construction of residential buildings in areas surrounding the cities. Concrete could be an ideal material to tackle this problem, provided it is used in a sustainable way. Ordinary Portland cement (OPC), the main and most expensive component of concrete can be optimized to meet the challenge of becoming universally available at affordable prices.

Pozzolans can help making the production of OPC more sustainable, for they can partially replace the costly and energy-intensive clinker. However, the best known and studied pozzolans (fly ash, silica fume) are available only in industrial countries, while developing countries cannot access them because of their high price. Clays are widely available around the world, and when calcined show a good pozzolanic behavior; products such as Metakaolin (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) (MK), which results of calcining clays rich in kaolin. Again, the economies of developing countries could hardly access the high prices of this sophisticated material, although the raw materials for its production.

In a collaborative project, CIDEM and LMC have undertaken a study to produce a highly reactive, MK-like pozzolan, through the activation of low grade clays with relatively simple and low energy consuming processes like flash calcination. Preliminary results show that clayey soils with kaolin content in the range of 50%, plus other clay minerals and impurities, can be activated at temperatures around 800 oC and produce a very reactive material, which can help reducing up to 50% of clinker in current OPC manufacture. The main target of this development would be the hollow concrete blocks industry, widely disseminated in developing countries in Asia, Africa and Latin America. The new concrete is more sustainable and would make the material more affordable and accessible for developing countries.



## AUTEUR AUTHOR

Mathieu Antoni



2009- PhD Student at Laboratory of Construction Materials, IMX STI EPFL, Lausanne  
 2005-2009 R&D Material Scientist at EPCOS OHG, Deutschlandsberg Austria  
 2000-2005 Master Science et Ingénierie des Matériaux, EPFL, Lausanne  
 1998-2000 Baccalauréat Scientifique, Lycée des Eaux Claires, Grenoble, France,  
 1985-1998 Birth and childhood in Evian les Bains, France

## MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

CALCINED CLAYS

LIMESTONE

CEMENT SUBSTITUTION

POZZOLANICITY

## EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM



EPFL-STI-IMX

Prof. Karen Scrivener

## INTRODUCTION INTRODUCTION

Supplementary cementitious materials (SCM's) are commonly used nowadays to reduce the clinker factor of blended cements. However, commonly used industrial by-products such as fly ash and blast furnace-blast slags are only available locally and in comparatively small amounts compared to the worldwide production of cement. Consequently, alternative sources of SCM's such as calcined clays are of growing interest. Kaolinite,  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ , mineral found in clayey soils is widely available in the earth's crust, and a heat treatment between 600 and 800°C of such clays leads to the dehydroxylation of the crystalline structure of kaolinite to give metakaolin [He 1995, Rocha 1993]. Excellent pozzolanic properties of metakaolin have been extensively studied in the literature [Sabir 2009, Fernandez 2011]. Pozzolanic reaction common definition is the reaction of finely ground reactive silicate and to lesser extent reactive aluminates with calcium hydroxide (portlandite) that has been produced by the hydration of the cement anhydrous phases. The products of the pozzolanic reaction are Calcium-Silicates-Aluminates gel hydrates.

Fine limestone is also commonly added to cement and it is established that limestone additions up to 5% can react entirely with cement and enhance most properties. It forms carbonates-AFm ( $C_2ACH_1$ , and/or  $C_2AC_{0.5}H_{1.5}$ ) and stabilizes ettringite, the highest water binding calicoaluminate cement hydrate ( $C_6A_3H_{12}$ ). The total volume of bound water increases and the pore filling by the hydrates is enhanced [Lothenbach & Matschei, 2007]. It is effective to improve the durability and has slight beneficial effect on the mechanical properties, especially at early age.

Nevertheless beyond 5%, limestone usually acts as inert filler. Use of limestone is extremely interesting because of its low price, ease of grinding, worldwide availability and clean environmental aspect (no  $CO_2$  production).

## OBJECTIFS OBJECTIVES

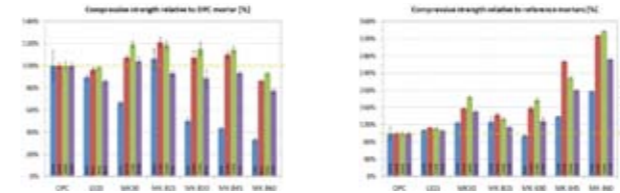
In this study we investigate the properties of blends with coupled additions of metakaolin and limestone, with the idea that the extra reactive alumina provided by the metakaolin will react with more limestone, allowing good properties to be maintained to higher levels of substitution. This approach has recently been applied using blends of fly ash and limestone [De Weerd, 2011].

## RESULTATS RESULTS

On the next figure are given the mechanical results obtained in Lausanne with very high quality industrial metakaolin. On the left side are given the relative values obtained by the blends compared with the OPC mortar, on the right the relative values to their references substituted mortars (inert quartz used instead of blended materials). Blends with substitution as high as 45% have similar or better compressive strengths than OPC reference at 7 and 28 days, while with 60% substitution the strength reaches 93% of the OPC at 28 days. Blending limestone and clays showed clearly to be effective. Compared to quartz references with similar fineness, the strengths obtained are much higher. Furthermore, at constant metakaolin content, the replacement of 15% OPC by limestone has nearly no detrimental effect on the compressive strength.

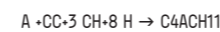
We could as well experimentally show by X-Ray Diffraction that the initial hypotheses concerning the possible synergy in the blend were confirmed; with stabilization of ettringite with simultaneous formation of growing amount of carboaluminates hydrates as well as strätlingite ( $C_2ASH_6$ ). The Thermogravimetry analysis has also demonstrated that the formation of these hydrates was consuming portlandite that provide a source of calcium ions to react with both the aluminates

## ADDITION COMBINEE D'ARGILES CALCINEES ET DE CALCAIRE POUR UN BETON A BAS-COUT CEMENT SUBSTITUTION BY COMBINED ADDITION OF CALCINED CLAYS AND LIMESTONE FOR LOW COST HOUSING



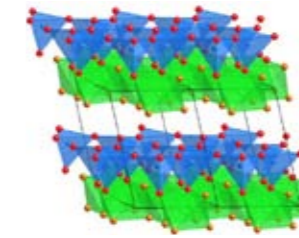
Figures 1: Compressive strength of blends obtained in Lausanne, normalized to the strength of pure OPC (first graph) and to the quartz reference (second graph) mortars at 1, 7, 28 & 90 days.

from the metakaolin and the carbonates from the limestone to form the carboaluminates hydrates.



## CONCLUSIONS CONCLUSIONS

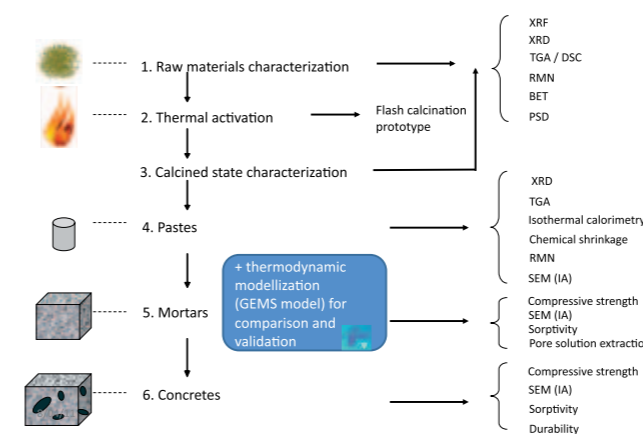
- Mechanical properties are not impaired at substitution levels as high as 45% at 7 days and later. The early age mechanical strength in this blend system are maintained due to the fast kinetics of the synergic reaction, provided by the fineness of the highly reactive metakaolin, as well as the initial fast dissolution of the carbonates that are consumed in the reaction.
- Phase assemblage is modified. Pozzolanic reaction is revisited:
  - Portlandite is virtually all consumed: non-solely by forming extra C-A-S-H gel but also large amount of carbonates AFm phases, strätlingite and ettringite phases.
  - A low-cost concrete with low clinker content is achievable by using local clays and adapt this blending.



Structure of the kaolinite. Alternating layers of one sheet of aluminate octahedra (green) sharing oxygen / hydroxyl group (red) with silicate tetrahedra (blue)

## TRAVAUX FUTURS FURTHER WORK

- Characterize reactivity and kinetics of the metakaolin for a better understanding of the ternary system ( $^{27}Al$  &  $^{29}Si$  NMR, SEM).
- Comparison of phase assemblage with thermodynamic calculations and phase stability (Pore solution measurements), for a consequent optimization of the system by varying the  $CO_2/SO_2/Al_2O_3$  ratios.
- Durability investigation of the system. Portlandite depletion implies threatening due to carbonation. Resistance to sulfates and marine salts is also investigated to fulfill the requirements adapted to the Cuban climatic conditions.
- Adaptation of the blends formulation to the local Cuban clay to transfer the knowledge gained in the project into application.



# RODRIGO FERNANDEZ

Doctorant EPFL / LMC



- 2005-2009 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
Doctorat au Laboratoire des Matériaux de Construction (LMC)  
Titre de thèse : "Les argiles calcinées comme potentiel de substitut du ciment dans la production de béton"
- 1999-2004 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
Master en Ingénierie et Science des Matériaux
- 1998-1999 Université de St-Andrews, Ecosse  
Etudes de langue et littérature anglaise
- 1979 naissance

## Publications scientifiques

*The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite*, Cement and Concrete Research, Vol 41, January 2011, Pages 113-122

*Activation of low grade clays at high temperatures*, Revista Ingeniería de Construcción (Chile), Vol 25, n°3, December 2010, Pages 329-352

# CARACTERISATION ET USAGE D'ARGILES CALCINEES

## Caractérisation et usage d'argiles calcinées comme substitut au ciment

Ce projet de recherche du Laboratoire des Matériaux de construction de l'EPFL, en partenariat avec l'Université Centrale de Las Villas (Cuba), vise à étudier le comportement thermique de différents types d'argiles afin d'optimiser leur réactivité pouzzolanique. Les argiles calcinées pourraient ainsi être utilisées pour substituer une partie du clinker dans la production de ciment afin d'obtenir des liants hydrauliques à moindre impact environnemental.

Dans un premier temps, des argiles pures ainsi qu'une argile mixte d'origine cubaine sont caractérisées avant et après calcination afin de déterminer leur état d'amorphisation.

La courbe dérivée de l'analyse thermogravimétrique (DTG) est un bon exemple de caractérisation car elle permet de suivre les principaux phénomènes de décomposition des structures argileuses, soit la déshydratation, entre 20 et 200°C (perte d'eau libre du système) et la déshydroxylation, entre 400 et 800°C (perte d'eau structurelle). Pour la kaolinite, on observe une importante déshydroxylation localisée entre 400 et 600°C qui est caractéristique de ce type d'argile [2]. En mettant en relation la quantité d'eau dégagée lors de ce processus avec sa structure, on peut estimer la teneur en kaolinite de l'argile analysée. Dans notre cas cette valeur est de 85.3 ±5%. Cette méthode s'avère utile pour la caractérisation de l'argile mixte cubaine, qui présente un pic de déshydroxylation dans la même gamme de température que la kaolinite. La teneur en kaolinite de cette argile est donc estimée à 44.5 ±5%. La montmorillonite se différencie des autres argiles par son pic de déshydratation important dû à l'eau se situant dans l'inter-feuillet ainsi qu'une déshydroxylation entre 600 et 800°C. Cette perte de groupes OH est plus graduelle pour l'illite, se situant entre 400 et 750°C.

Les divers résultats de caractérisation ont montré que la fenêtre optimale d'activation des argiles se situe entre 500 et 800°C. Les recristallisations ayant lieu à plus hautes températures diminueraient la quantité de matière amorphe et de ce fait la réactivité pouzzolanique de ces matériaux.

Dans un deuxième temps, la fabrication de pâtes ainsi que de mortiers constitués d'un mélange de 70% de ciment et de 30% d'argiles calcinées (en masse) permettent de suivre la réaction pouzzolanique et son influence sur les propriétés mécaniques.

La réaction pouzzolanique n'est autre que la réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium (produit de l'hydratation du ciment) et les alumino-silicates désordonnés (produit de la calcination des argiles), qui donne lieu à la formation de silicates de calcium hydratés, contribuant au développement de la résistance mécanique du matériau. La quantification de l'hydroxyde de calcium par analyse thermogravimétrique

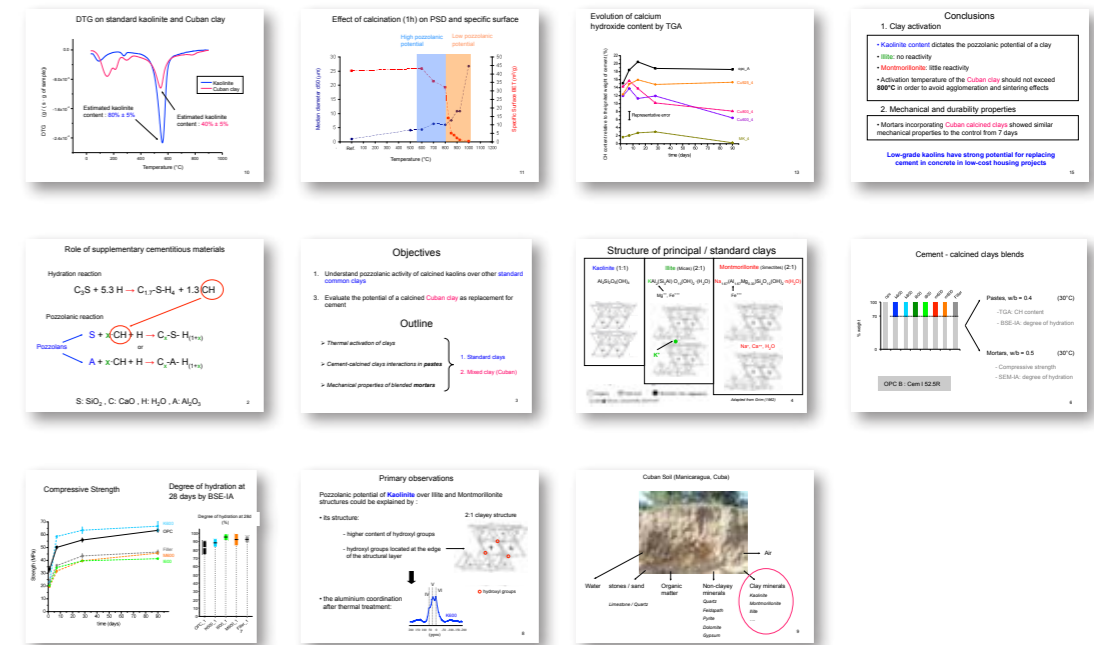
(ATG) au cours des 28 premiers jours a montré que seuls les systèmes comportant de la kaolinite calcinée, et dans une moindre mesure de la montmorillonite calcinée à 600°C, présentent des contenus en hydroxyde de calcium inférieurs à l'échantillon de référence (100%ciment). Les systèmes avec Montmorillonite calcinées à 800°C et les systèmes comportant l'illite à 600 et 800°C ne montrent aucune réactivité pouzzolanique

Les propriétés mécaniques des mortiers sont en accord avec l'étude de réactivité entreprise sur les pâtes. Dès 7 jours, la résistance du mortier ciment-kaolinite 600°C est supérieure à la référence, alors que la montmorillonite et l'illite calcinée se comportent comme un substituant inerte comparable à un sable de quartz microcristallin (Filler). L'argile mixte cubaine calcinée présente, avec seulement 45% de kaolinite, des propriétés très intéressantes. En effet, à 28 jours, les résistances des mortiers comportant ce type d'argile sont comparables à la référence.

La teneur en kaolinite d'une argile ainsi que sa température de calcination jouent donc un rôle déterminant dans la réactivité pouzzolanique. Cette étude ouvre des perspectives intéressantes pour l'utilisation d'argiles mixtes impures comme substituant du ciment dans la construction. Dans un contexte moins industrialisé comme pourrait l'être certains milieux ruraux dans les pays en voie de développement, le développement d'outils simples permettant de déterminer la teneur en kaolinite des sols argileux pourraient amener une réponse à la demande toujours croissante de matériaux de constructions durables.

**Bibliographie**

1. J.K. Mitchell, *Fundamentals of soil behaviour, 3rd edition.* (John Wiley & Sons, Inc., 2005).
2. V.S. Ramachadran, *Handbook of thermal analysis of construction materials.* (Noyes publication, 2002).
3. G.W Brindley, M. Nakahira, *The Kaolinite-Mullite Reaction Series: II, Metakaolin.* Journal of the American ceramic society, p. 314-318, 1959.
4. R. Fernandez, *The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite,* Cement and Concrete Research, Vol 41, Jan. 2011, p. 113-122.



# RANCES CASTILLO LARA

Doctorant EPFL / LMC - Université Centrale de Las Villas, Cuba

## AUTEUR AUTHOR

Rancés Castillo Lara



His work is related with investigation of eco-materials and their production at local level, focus on low cost housing in Cuba and other countries in South America. He has contributed to the Network EcoSouth in social housing projects.

As member of the work team "Ecomaterials in social housing projects" was awarded with the "World Habitat Award 2007" by the British foundation "Building a Housing Foundation" together with the Habitat section of the United Nations.

Born in Cuba in 1981. He obtained his civil engineering degree in 2004 at the Central University of Las Villas. Since then he has worked as lecturer in the Department of Civil Engineering of the Construction Faculty of this university. He is also associate researcher at the Centre for Research & Development of Structures and Materials (CIDEM).

Since 2006 is member of the joint research program "Ecomaterials for Low-cost housing" between FNS-EPFL-UCLV. In 2008 he made a research stay in the LMC, EPFL, for the study of calcined clays as supplementary cementitious materials. Recently defended his PhD thesis entitled "High reactivity pozzolans from thermal and mechanical activation of low purity grade kaolinitic clays".

## MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

POZZOLANS

CALCINED CLAYS

POROSITY

SORPTIVITY

## EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM

In Cuba:  
Prof. Fernando Martirena, Rancés Castillo, Adrian Alujas

In Switzerland:  
Prof. Karen Scrivener, Rodrigo Fernández, Mathieu Antoni

## OBJECTIF OBJECTIVE

Analyze the mechanical properties and microstructure changes in pastes and mortars by replacing 30% of ordinary Portland cement in weight by a pozzolanic mineral admixture, from the calcination of clayey soil.

## CONTRIBUTIONS PRINCIPALES MAIN CONTRIBUTIONS

- > The use of local materials, in this case a clayey soil with a kaolinite mineral of low degree purity as a natural source for the production of highly reactive pozzolan.
- > The improvement of environmental performance of concrete due to the reduction of ordinary Portland cement clinker consumption, together with the increasing of compressive strength and durability and the efficient use of alternative raw materials.

## INTRODUCTION INTRODUCTION

Nowadays the cement industry looks for the replacement of cement clinker by other supplementary cementitious materials (SCM) due to economic and environmental reasons. The search for new alternative cementitious materials is necessary, mostly in developing countries, where materials requiring high technological costs are very limited.

Calcined clay in form of metakaolin are such an alternative, they received a special attention in the recent years in the literature. When added to mortar and concrete, calcined clays provide improved mechanical behavior as well as improved durability.

This work studies a clay soil from the central region of Cuba as a natural source for the production of highly reactive pozzolan. This soil contains kaolinite as the main clay mineral. Two processing procedures of the soil have been evaluated: without sedimentation (clayey earth: T120) and with sedimentation (sedimented clay: AS-900), both have been calcined at 900 °C and ground until achieving similar grain size. A sample of sugar cane straw ash (SC) has also been used for comparison with an already characterized pozzolan. A calcium carbonate filler (F) is used, with equal percent of substitution, as reference mix of equal amounts of cement.

## RESULTS RESULTATS

The grains size distribution of the processed materials has been measured. Finer materials than the ordinary Portland cement (CP N3) have been obtained achieving average particle size D50: SC 5.49 µm, T120 3.83 µm, AS-900 7.47 µm and F 13.01 µm. The study shows that grinding has a major influence on reactivity of both processed materials. The reactive pozzolans, finely ground, first act as filler, which enhances the cement hydration process. When 30% of cement is replaced by tested pozzolans, the compressive strengths of mortars are similar to the reference at 7 days. Later on, the pozzolanic reaction takes place and compressive strengths at 28 and 60 days were higher than reference (Figure 1). The grinding of the pozzolans shows to have a major influence on the compressive strength behavior (Figure 2).

# ACTIVATION THERMIQUE ET MECANIQUE DES SOLS ARGILEUX POUR LA SUBSTITUTION DU CIMENT THERMAL AND MECHANICAL ACTIVATION OF CLAYEY SOILS FOR CEMENT REPLACEMENT

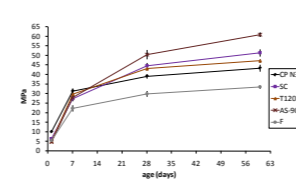


Figure 1: Compressive strength in mortars.

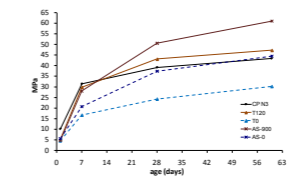


Figure 2: Effect of the grinding process on compressive strength.

Refinement is evident in the internal structure of pores in pastes made from these pozzolans on these measurements of mercury intrusion porosity (MIP). (Figure 3)

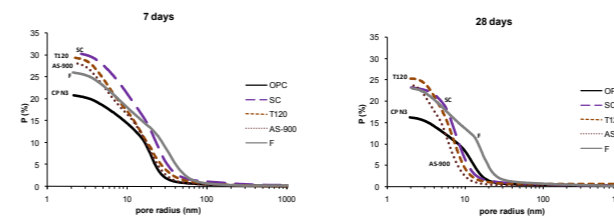


Figure 3: Porosity by mercury intrusion in pastes at 7 and 28 days.

To assess the transport phenomena in the material, sorptivity of mortars has been evaluated. Clayey soils substituted systems showed a reduction of their values from 28 days (Figure 4). This study leads to a reduction of more than 60% of capillary porosity in mortars made of sedimented clay compared to pure Portland reference (Figure 5).

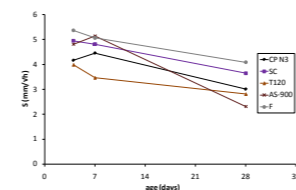


Figure 4: Sorptivity in mortars.

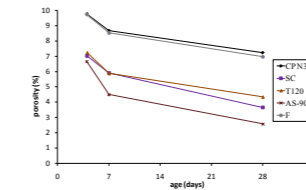


Figure 5: Capillary porosity in mortars.

## PERSPECTIVES OUTLOOKS

A way to reduce the costly energy consumption associated to the clay activation would be the employment of a more efficient calcination process. We investigated the solid fuel block (SFB), a densified block of intimately mixed biomass from agro-industrial processes and clays. The SFB enables a calcination process around 900°C that is economically more viable and less dependent on external energy source. A key factor is the use of appropriate technologies to enable an efficient burning process, such as continuous vertical kiln (VSBK) for the production of bricks. We demonstrated that the ashes collected from the SFB bur-

ning have a potential pozzolanic behavior, which could be used after grinding as cement replacement. A possible scenario for the application of current results of this work is the use of calcined clay for concrete hollow block production at local level. (Figure 6)

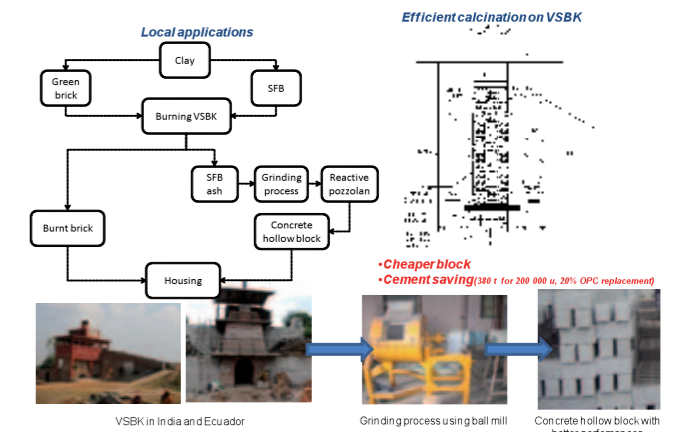


Figure 6: Global conception of local application.

## CONCLUSIONS CONCLUSIONS

When finely ground, calcined soils and clays at 900 °C can achieve remarkable pozzolanic activity. This can enlarge the field of applications of possibilities to implement the production of reactive pozzolans from local clayey materials.

The process of thermal activation of the clays can be done efficiently by burning of solid fuel block. The vertical shift brick kiln technology ensures a controlled combustion process. Clay calcined by this process, after adequate grinding process, can be used as supplementary cementitious material in the manufacture of concrete hollow blocks.

# INVITE SPECIAL *SPECIAL GUEST*



# FELIX CLAUS

Architecte, Amsterdam – Rotterdam



Felix Claus (1956)

Felix Claus founded Claus en Kaan Architecten together with Kees Kaan in 1987.

The office has establishments in Amsterdam and Rotterdam.

Claus en Kaan Architecten works on urban design, housing, the refurbishment of historical buildings and interior design. The office specializes in public buildings with a specific programme.

Examples are the Dutch Embassy in Maputo, Museum of Fine Arts in Antwerp, City Archives in Amsterdam, Netherlands Forensic Institute in The Hague, Pharmaceutical Faculty in Granada and several Town Halls in the Netherlands.

Currently Claus en Kaan Architecten are working on the Magistrates Court in Amsterdam, Dutch Institute of Ecology in Wageningen and the city extension of Barcelona "El Prat de Llobregat", Spain.

Monographies on Claus en Kaan Architecten were published in Barcelona (1997), Rotterdam (2001), Berlin (2003), Roma (2004) and Amsterdam (2009).

Felix Claus teaches at ETSA Madrid, he lives in Amsterdam and Tokyo.

[www.clausenkaan.com](http://www.clausenkaan.com)

## Exhibitions

- 2010 Haus der Niederlande, Münster; "Grenzüberschreitende Architektur in der Euregio"
- 2008 The vital Apartment Building, Helsinki Finland  
Arc en Reve, Bordeaux Frankrijk
- 2005 Festival of Architecture, Dubrovnik Kroatie
- 2004 La Biennale di Venezia, 9. Mostra Internazionale di Architettura
- 2003 Beauftragt, Aedes West, Berlin
- 2002 La Biennale di Venezia, 8. Mostra Internazionale di Architettura
- 2001 Minimalismos, Museo Reina Sophia, Madrid
- 2000 Dutchtown, Aedes East, Berlin
- 2000 Bienal Internacional de Arquitectura, São Paulo
- 1998 Claus en Kaan Architecten, ABC Haarlem
- 1994 Bienal de Arquitectura y Urbanismo, Zaragoza
- 1993 Premio internazionale Andrea Palladio, Vicenza

## Honors, prizes

- 2011 Nomination Golden AAP (Amsterdam Architecture Price)
- 2010 Third price competition Les Arts Gstaad (CH)  
Nomination Golden AAP (Amsterdam Architecture Price)
- 2009 Winner Golden AAP (Amsterdam Architecture Price)  
Nomination Ugo Rivolta Architecture Award  
Nomination Mies van der Rohe Price

- 2008 Winner Archie 2007/08  
Nomination Golden Pyramide  
Fritz Höger Brick-Architecture Prize  
Winner DAC-pan
- 2007 Nomination Lensvelt the Architect Interiorprice
- 2005 Lensvelt the Architect Interior Architecture Prize
- 2004 Nomination Premio Dedalo Minosse
- 2003 Nomination Museum of the Year Award
- 1998 Winner of the 1998 DuPont Benedictus Award  
Nomination Mies van der Rohe Pavilion Award
- 1997 Grand Prix Rhéna d'Architecture
- 1993 Nomination Premio Palladio

## Books

- H. Ibelings; *Ideal Standard*; Amsterdam 2009
- M. Costanzo; *Claus en Kaan*; Roma 2005
- H. Ibelings ed.; *Claus en Kaan, Building*; Rotterdam 2001
- R. Yamamoto; *Claus en Kaan, Beauftragt*; Berlin 2001
- F. Claus, F.van Dongen, T. Schaap; *Uburg Haveneiland and Rieteilanden*; Rotterdam 2001
- H. Michel; *Claus en Kaan*; Amsterdam 2000
- C. Ferrater; *Claus en Kaan. New generations in the Dutch tradition*; Barcelona 1997

## Articles

- N.Yoshida ed.; *Claus en Kaan Architecten*; a+u Nr.382; Tokyo 2002
- J.Ector; *Virtuoso self-evidence; Work by Claus and Kaan*; archis Nr.7; Doetinchem 2000
- H.Ibelings; *An ideal Standard - Two Recent Projects by Claus en Kaan*; a+u Nr.348; Tokyo 1999
- A.García-Herrera ed.; *Claus & Kaan Riguroso realismo*; Arquitectura Viva Nr.73; Madrid 1998

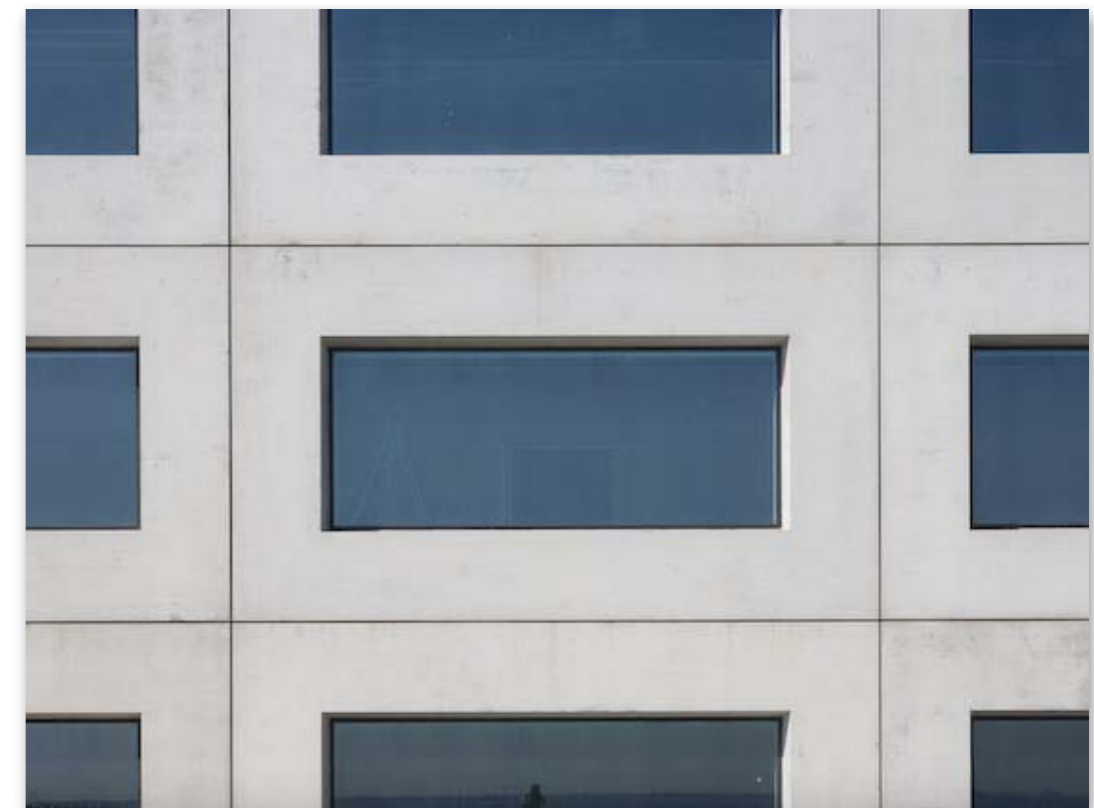
# RONFLONFLON AVEC LE BETON

Felix Claus will address the possibilities of prefabricated concrete as an integrated tectonic material; both sound, practical and beautiful (in dutch: strong, cheap and easy).

The office of Claus en Kaan is not interested in specific architecture incorporating cutting edge construction technology, but researches the adaptation of everyday, generic practice to create.

Felix Claus will present examples of this research into the use of prefabricated concrete, integrating the traditional load bearing function of the material, resulting in a possible architectural esthetic that allows the architect to remain in control of the haptic and tectonic aspects of the design in a building culture that is ever more depleted of craftsmanship, delivering great economic and spatial value at the same time.

Amsterdam, 6 april 2011



**BRANDWEER**

**RECHERCHES  
EN COURS  
A L'EPFL  
*CURRENT  
RESEARCH  
AT THE EPFL***

# OPTIMISATION DE LA FORME STRUCTURALE DU LEARNING CENTER OPTIMIZING LEARNING CENTER'S STRUCTURAL SHAPE

## AUTEUR AUTHOR

Marie-Rose Backes



Née en 1986 au Luxembourg. Elle commence ses études de génie civil en 2006 à l'EPFL. En 2009 elle réussit son Bachelor en génie civil et poursuit ses études de Master avec une spécialisation en structures.

Afin d'obtenir son diplôme d'ingénieur civil en 2011, elle choisit de faire le projet de Master au sein du laboratoire IBETON à l'EPFL.

Son travail intitulé "Optimisation de la forme structurale du Learning Center" est réalisé sous la direction de Professeur Aurelio Muttoni. Le projet traite du comportement structural des coques et de l'application au cas du Learning Center.

## CONTEXTE CONTEXT

Le Rolex Learning Center (RLC), qui a ouvert ses portes en février 2010, est le nouveau point de rencontre du campus de l'EPFL. Le bureau d'architecture SANAA l'a conçu selon le concept du paysage architectural. Le bâtiment comporte un seul niveau et se compose de deux coques fortement surbaissées pourvues d'ouvertures circulaires appelées patios.

## PROBLEMATIQUE ISSUE

La conception de la géométrie des deux coques du RLC s'est basée sur un compromis entre architecture, exploitabilité, sécurité et exigences structurales. Le comportement statique résultant est une combinaison d'arcs et d'éléments de dalles, et guère celui d'une coque.

Les conséquences sont des efforts de flexion importants nécessitant :  
 Epaisseurs considérables 80 cm  
 Taux d'armature très élevé 470 kg/m<sup>3</sup>  
 Quantité de précontrainte importante 84 MN (arc n°5)  
 Appuis supplémentaires colonne + mur  
 Perception visuelle arcs

## MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

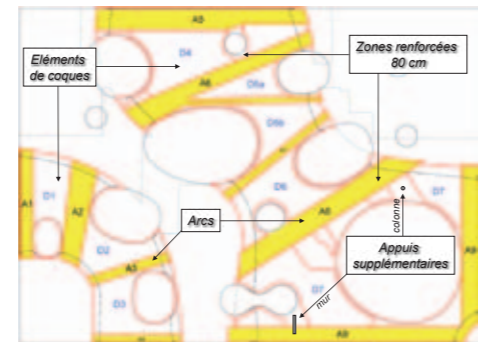
COQUES

FORM FINDING

RIGIDITE

RESISTANCE

BETON



Concept statique : Arcs et éléments de dalles #B-G



Mur d'appui



Colonne d'appui



Façade sud : perception d'arcs



Epaisseur de 80cm



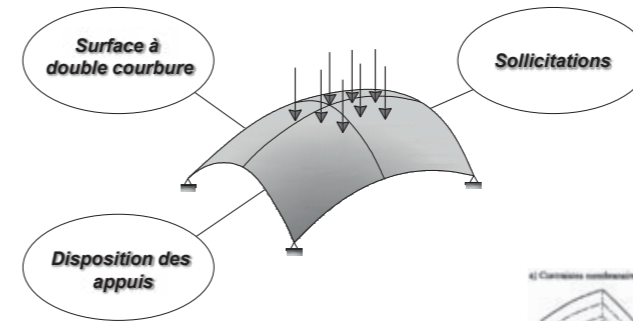
Arc N°9

## EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM

Personnel IBETON :  
 Aurelio Muttoni  
 Miguel Fernández Ruiz  
 Thibault Clément

## CONCEPTION D'UNE COQUE

Facteurs clés pour la génération d'une géométrie de coque efficace :  
 La forme d'une coque est optimale si les efforts intérieurs sont uniquement de type membranaire. En tenant compte des interrelations entre les différents facteurs clés, il est possible de s'approcher d'une géométrie optimale

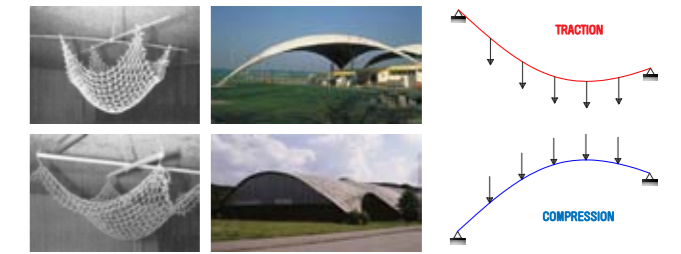


La forme d'une coque est optimale si les efforts intérieurs sont uniquement de type membranaire. En tenant compte des interrelations entre les différents facteurs clés, il est possible de s'approcher d'une géométrie optimale

## "FORM FINDING" FORM FINDING

### Une approche expérimentale

À partir des années 60, l'ingénieur suisse H. Isler a réalisé un grand nombre de coques en béton armée, dont une grande partie ont été conçues selon la méthode de la membrane suspendue.



Maquettes utilisées par Isler pour déterminer la forme de ses coques.

Deltingen Service Station, 1968, Solothurn. Bruhl Sports Center, 1982, Solothurn.

Analogie avec le câble et l'arc

La méthode de la membrane suspendue part de l'idée qu'une membrane soumise à son poids propre adapte une forme qui travaille entièrement en traction. En inversant cette géométrie, on obtient une coque travaillant en état membranaire de compression pure.

## METHODOLOGIE METHODOLOGY

- La méthode de la membrane suspendue est utilisée pour l'identification des zones critiques de la géométrie actuelle du RLC. Zones à comportement unidirectionnel (arcs) et zones à forte concentration d'efforts
- La maquette de travail permet également d'élaborer une nouvelle disposition des appuis et des patios afin d'améliorer le comportement coque.
- Un modèle aux éléments finis permet ensuite de vérifier le comportement de la nouvelle géométrie et de dimensionner les sections critiques.

## OBJECTIFS OBJECTIVES

L'objectif principal du travail est la recherche d'une nouvelle géométrie qui permet le développement d'un comportement membranaire dans les deux coques du Learning Center. Ensuite, une optimisation au niveau des épaisseurs de béton et du taux d'armature peut être effectuée grâce à une utilisation efficace de la matière. La nouvelle géométrie permet également d'augmenter la fluidité des formes en évitant la perception de section en forme d'arcs.

## I. Analyser le comportement à l'aide d'un modèle physique

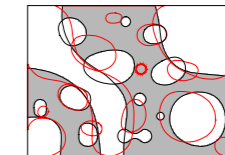


Maquette - configuration originale des appuis

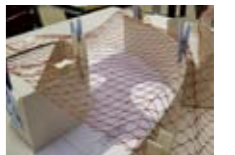


Mise en évidence d'un comportement unidirectionnel par manque de double courbure au droit des extrémités d'appuis

## II. Modifications de la géométrie des appuis et des patios



Nouvelle configuration des appuis



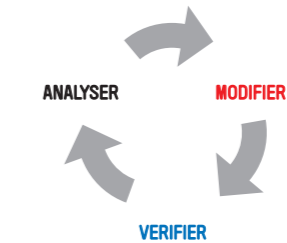
Petite coque



Face est - Développement d'une double courbure à l'appui nord.



Grande coque patio nord - Zones à double courbure efficace et zones instables.



## III. Vérifications avec un modèle aux éléments finis



Modèle EL avec la nouvelle géométrie

Flèches sous poids propre

# CONCEPTION DE TRANCHÉES COUVERTES AVEC LA METHODE DES CHAMPS DE CONTRAINTES ELASTIQUES-PLASTIQUES

## DESIGN OF CUT-AND-COVER TUNNELS USING ELASTIC-PLASTIC STRESS FIELDS METHOD

### AUTEUR AUTHOR

Stefano Campana



Né en 1982 à Lugano, il termine un apprentissage de dessinateur en bâtiments et du génie civil en 2001. Il se diplôme ensuite en génie civil à l'HESS de Lugano. Il continue ses études à l'EPFL où il obtient son diplôme en génie civil en 2008 avec spécialisation en structures.

Après son diplôme il commence son travail de doctorat au sein du laboratoire IBETON à l'EPFL sous la direction du Professeur Aurelio Muttoni et du Dr Miguel Fernández Ruiz.

Sa recherche traite de la résistance à l'effort tranchant de poutres avec faible contenu d'armatures d'effort tranchant. Aussi, en utilisant la méthode des champs de contraintes, il s'occupe de l'optimisation des détails d'armature d'angles de cadre d'une tranchée couverte à forme polygonale.

Dans le cadre de son doctorat, il est également impliqué dans l'enseignement pour les cours et les projets proposés par l'IBETON aux étudiants en Bachelor et en Master de génie civil.

### MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

- TRANCHEE COUVERTES
- INTERACTION SOL-STRUCTURE
- ANGLES DE CADRE
- CAPACITE DE DEFORMATION
- RESISTANCE
- CHAMPS DE CONTRAINTES
- DETAILS D'ARMATURE

### EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM

- Personnel IBETON:
- Aurelio Muttoni
  - Miguel Fernández Ruiz
  - Olivier Burdet
  - Yvonne Bühl
  - Galina Argirova
  - Stefano Campana
  - Thibault Clément
  - Jürgen Einpaul
  - Gilles Guignet
  - Stefan Lips
  - Francisco Natario
  - Michael Rupf
  - Luca Tassinari

### CONTEXTE CONTEXT

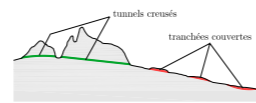
Les tranchées couvertes sont des tunnels pour lesquels la construction de la structure se fait à ciel-ouvert. Cette solution constructive est souvent utilisée:

- > pour la construction de tunnels avec un faible recouvrement de sol,
- > pour la réduction de l'impact environnemental des infrastructures routières.

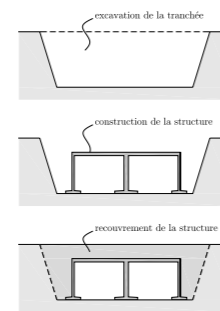
### CHIFFRES FIGURES

Sur le réseau des routes nationales suisses:

- > 10% du tracé est souterrain
- > 220 tunnels au total, dont 64 tranchées couvertes (total de 32 km)



La topologie du territoire suisse justifie la construction de tranchées couvertes



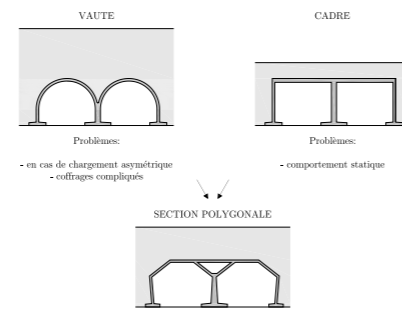
Procédure constructive d'une tranchée couverte



Phases constructives de la tranchée couverte de la Beuchille, Suisse

### STRUCTURE ANALYSEE ANALYSED STRUCTURE

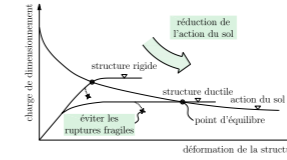
Une forme polygonale de la section transversale a été proposée à l'EPFL afin de combiner les avantages des deux solutions typiquement utilisées: la voûte et le cadre.



Proposition pour une nouvelle forme de la section transversale

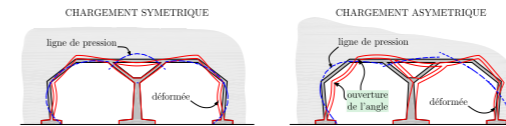
### INTERACTION SOL-STRUCTURE SOIL-STRUCTURE INTERACTIONS

L'augmentation de la capacité de déformation de la structure conduit à une diminution des actions du sol sur la structure. La capacité de déformation de la structure est directement influencée par la capacité de déformation de ses régions nodales, zones où les déformations se concentrent.



### COMPORTEMENT DE LA STRUCTURE STRUCTURE BEHAVIOUR

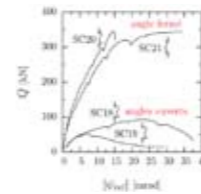
Le comportement de la structure est différent suivant la forme du sol de recouvrement. Le long du tracé longitudinal, un angle du polygone de la section transversale peut alternativement s'ouvrir et se fermer selon les sollicitations.



Variations de comportement de la structure en fonction du type de chargement

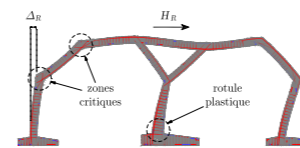
### PROBLEMATIQUE PRINCIPALE MAIN ISSUE

La résistance et la capacité de déformation d'un angle qui s'ouvre sont sensiblement inférieures à celles d'un angle qui se ferme. Des ruptures fragiles peuvent même avoir lieu pour ces premiers angles. Des solutions pour améliorer leur comportement sont ainsi nécessaires.

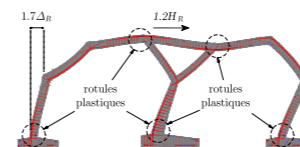


Résultats d'essais sur angles de cadre

### étape 1: mise en évidence des zones critiques



### étape 4: introduction des détails améliorés dans la structure globale

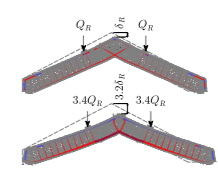


### ANALYSES NUMERIQUES ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

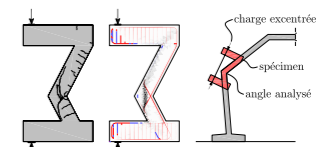
### STRATEGIE

itérations avec 4 étapes

### étape 2: amélioration des détails d'armatures des zones critiques

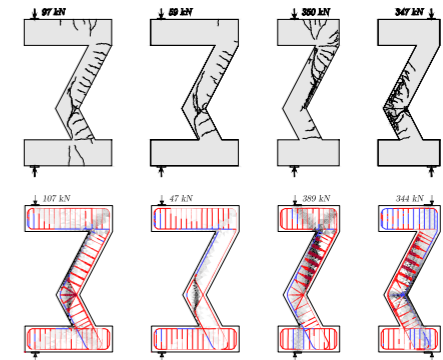


### étape 3: validation expérimentale



### METHODE DES CHAMPS DE CONTRAINTE STRESS FIELDS METHOD

La méthode des champs de contraintes est un outil puissant pour l'étude du comportement des régions nodales. Elle peut être aussi utilisée pour l'évaluation du comportement global de la structure.



Résultats d'essais sur angles de cadre et prédictions de comportement obtenues avec la méthode des champs de contraintes

### OBJECTIFS OBJECTIVES

L'étude vise à sélectionner des détails d'armature adaptés pour les régions nodales de la tranchée couverte. Les détails proposés doivent permettre de maximiser la capacité de déformation de la structure et d'éviter toutes ruptures fragiles.

### PROCEDURE ADOPTEE SELECTED PROCEDURE

- > La méthode des champs est utilisée pour la mise évidence des zones critiques de la section transversale.
- > Elle peut ensuite être utilisée pour améliorer les détails d'armature de ces zones.
- > Des séries expérimentales viennent ensuite valider les résultats des analyses numériques.
- > Grâce à des détails d'armature améliorés, le comportement de la structure entière peut être optimisé.

# INFLUENCE DE LA PRECONTRAINTESUR LA RESISTANCE AU POINÇONNEMENT INFLUENCE OF PRESTRESSING ON PUNCHING SHEAR STRENGTH

## AUTEUR AUTHOR

Thibault Clément



Né en 1984, il obtient son diplôme d'ingénieur de l'École des Mines (Alès - France) après un échange à l'EPFL en 2006-2007.

Il commence directement après son diplôme son travail de doctorat au sein du laboratoire IBETON à l'EPFL sous la direction du Professeur Aurelio Muttoni.

Sa recherche s'articule autour du phénomène de poinçonnement dans le domaine de la construction et plus particulièrement sur l'influence de la précontrainte sur la résistance au poinçonnement.

Il s'investit aussi dans l'enseignement en génie civil pour des cours et des projets de niveau Bachelier et Master et en architecture pour des interventions ponctuelles sur les structures.

## MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

DALLES  
PRECONTRAINTES  
POINÇONNEMENT  
RESISTANCE  
BETON

## EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM

Personnel IBETON :  
Aurelio Muttoni  
Miguel Fernandez Ruiz  
Olivier Burdet  
Yvonne Bühl  
Galina Argirova  
Stefano Campana  
Thibault Clément  
Jürgen Einpaul  
Gilles Guignet  
Stefan Lips  
Francisco Natario  
Michael Rupf  
Luca Tassinari

## OBJECTIFS OBJECTIVES

Comprendre l'influence de la précontrainte sur la résistance au poinçonnement.

### Solution structurale très répandue :

- > Plancher-dalle (solution la plus répandue en Suisse lors de l'utilisation de poteau)
- > Pont-dalle (environ 30% du réseau de des routes nationales en Suisse)
- > A l'étranger aussi



Sao paulo - Brésil (pavilhão Cicillo-Matarazzo, Niemeyer (arch.))



Pont-dalle Copenhague - Danemark



Pont-dalle Genève (A1) - Suisse



Montricher - Suisse (Maison de l'écriture, Muttoni et Fernandez (ing.), Mangeat et Wahlen (arch.))

### Phénomène de poinçonnement :

La colonne traverse la dalle

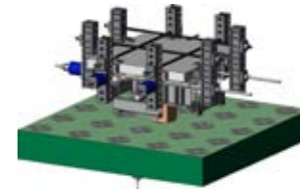
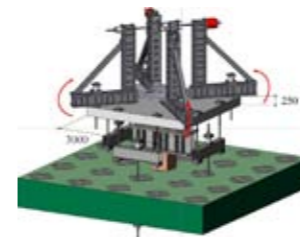


### Effets de la précontrainte

- > Moment de flexion  $m_p$
- > Effort normal  $\sigma_p$
- > Composante verticale  $V_p$

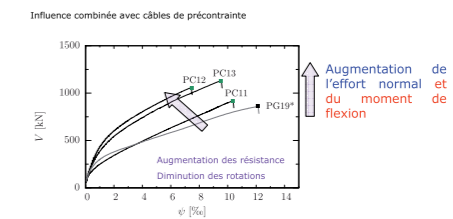
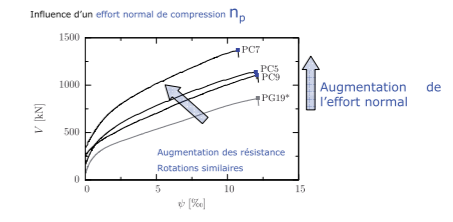
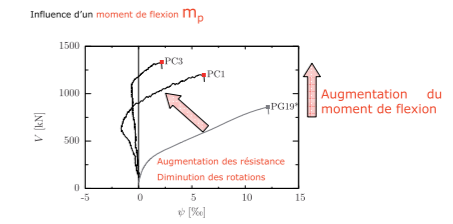
## METHODOLOGIE METHODOLOGY

Découplage des différents effets de la précontrainte  
Essais en laboratoire sur dalles en béton armée de 3000 x 3000 x 250 mm



## RESULTATS RESULTS

Résultats de la campagne d'essais réalisée  
PG19 : dalle de référence sans moment de flexion ni effort normal



# LA CONSTRUCTION BETON DANS L'ENSEIGNEMENT DU PROJET ARCHITECTURAL

## CONCRETE BUILDING AS TAUGHT IN THE ARCHITECTURE PROJECT WORKSHOP

### AUTEURS AUTHORS

Thierry Voellinger



Né en 1969, il diplômé en architecture à l'EPFL en 1998. Il travaille trois ans en tant qu'illustrateur d'architecture dans les bureaux de Kraaijvanger-Urbis et Claus en Kaan Architecten à Rotterdam et professe ensuite en tant qu'architecte indépendant.

En 2004, il rejoint l'enseignement de premier année d'architecture à l'EPFL du professeur Vincent Mangeat. Dans ce laboratoire, il enseigne l'usage de la maquette dans le projet d'architecture. Parallèlement, il développe et approfondit ce thème dans le cadre de son cours à l'école d'art et design de Genève.

À partir de 2006, il élabore le projet d'enseignement « Critique et Théorie du Projet » en 3<sup>e</sup> année du Professeur Andrea Bassi pour le Laboratoire d'Architecture Urbaine, LAURE. Il y enseigne la structure, la conception de la façade préfabriquée et la matérialité du béton.

Il effectue un doctorat dont le thème principal est la mise au point d'un procédé d'analyse pour optimiser des murs composites en béton préfabriqué.

Damien Dreier



Né en 1982, il est diplômé en architecture à l'EPFL en 2006 et le titre de docteur en sciences techniques de la même école en 2010 avec une thèse sur l'interaction sol-structure dans le domaine des ponts intégraux.

Dés 2006, il est membre actif du Werkbund Suisse dans le groupe Romandie. Dans ce cadre, il acquiert un intérêt prononcé pour les métiers ayant une vocation de création. En particulier, son intérêt pour l'architecture se renforce lors de son engagement à temps partiel dès 2010 dans le bureau Dreier Frenzel Architecture - Communication à Lausanne. Lors de ce mandat, il travaille entre autre sur le développement de la relation entre la structure et l'architecture des bâtiments du futur Eco-quartier de la Jonction à Genève.

Lors de son travail d'assistant-doctorant, au sein du laboratoire de la Construction en Béton (IBETON) dirigé par le Prof. Muttoni, en plus de sa recherche scientifique dans les domaines vastes que sont le béton, la géotechnique, les ponts ainsi que leurs interactions, il s'implique dans l'enseignement des ingénieurs civils et architectes. Nait de cette implication une coopération avec le laboratoire d'Architecture Urbaine et Réflexion Energétique (LAURE) dirigé par le Prof. Bassi sur le thème de l'application des grandes portées structurales dans les bâtiments comportant une mixité programmatique.

Depuis 2011, il travaille comme ingénieur civil dans le bureau T Ingénierie à Genève tout en conservant une activité dans le domaine de l'enseignement à l'EPFL.

### MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

Enseignement de la construction en béton  
Façade en béton préfabriqué  
Structure en béton  
Matérialité du béton

### EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM

Personnel LAURE  
Prof. Andrea Bassi  
Thierry Voellinger  
Bertrand Counson  
Enrico Slongo  
Emy Amstein  
Rosana Turielle

Personnel IBETON  
Aurelio Muttoni  
Miguel Fernandez Ruiz  
Galina Argirova  
Yvonne Buehl-Brauch  
Olivier Burdet  
Stefano Campana  
Thibault Clément  
Damien Dreier  
Gilles Guignet  
Stefan Lips  
Michael Markus Rupf  
Luca Tassinari

### OBJECTIFS OBJECTIVES

Donner aux étudiants architectes en 3<sup>e</sup> année des notions fondamentales pour élaborer :

- > une structure porteuse béton pour un programme mixte incluant parkings, bureaux, logements, activités industrielles et commerciales
- > une façade préfabriquée en éléments sandwich béton
- > des choix de composition du béton pour atteindre une matérialité définie

Permettre aux étudiants d'intégrer ces notions dans le développement de leur projet de semestre.

### METHODOLOGIE METHODOLOGY

Dans le cadre de l'enseignement du projet en 3<sup>e</sup> année d'architecture, le laboratoire LAURE (Laboratoire d'Architecture Urbaine et de Réflexion Energétique) propose d'aborder successivement différentes échelles auxquelles l'architecte est confronté dans son travail : la ville, le quartier, le bâtiment, la typologie, le détail constructif, la matérialité.

Pour cadrer le travail de l'étudiant et parce que c'est le matériau le plus utilisé pour construire les villes, les étudiants doivent concevoir leur projet en béton : structure porteuse en béton armé et façades porteuses en éléments préfabriqués.

#### Structure porteuse

Pour enseigner les principes de la structure porteuse, des cours et des exercices pratiques sont proposés aux étudiants. Ils sont encadrés par des docteurs en Génie Civil et des assistants-architectes. Les notions enseignées sont : bref historique de la construction béton, trames structurales en fonction du programme des locaux, conception de longues portées, voiles

#### Façade préfabriquée

Pour enseigner les principes de la façade préfabriquée, des cours et un exercice pratique sont proposés aux étudiants, ainsi qu'une visite d'une entreprise de béton préfabriqué basée à Genève (Prelco SA). Ils sont encadrés par des assistants-architectes et des professionnels de la construction béton. Les notions enseignées sont : bref historique de la préfabrication béton, dimensionnements des éléments sandwich, détails constructifs type, chaîne de production des éléments

#### Matérialité

Pour sensibiliser les étudiants à la matérialité, des visites de bâtiments et deux exercices pratique sont proposés aux étudiants. Le premier exercice consiste à décrire, sur la base d'échantillons réels, la composition de différents bétons de couleurs et de textures variées et le deuxième demande aux étudiants de couler un cube de 10cm d'arête, en choisissant eux-mêmes les granulats et en traitant les faces de manière différenciée : ponçage, désactivage, acidification, matriques...

### RESULTATS RESULTS



Planches typologie / structure, rendus de divers semestres



Planches façade préfabriquée, rendus de divers semestres



Cubes réalisés par les étudiants à l'occasion de l'exercice béton

### CONCLUSIONS CONCLUSIONS

L'intégration de cours ciblés sur un matériaux de construction dans l'enseignement du projet, permet de mettre en relation les aspects structurels, constructifs et expressifs d'un bâtiment avec d'autres dimensions du projet : l'intégration du bâtiment dans son contexte urbain, la gestion de la lumière naturelle, l'organisation des espaces, etc...

Les interventions ciblées de spécialistes venant d'autres disciplines permettent aux étudiants architectes de prendre conscience de la complexité des enjeux liés à un choix de matériaux et à la nécessité de collaborer dans le cadre d'équipes interdisciplinaires.

# ADDITION COMBINEE D'ARGILES CALCINEES ET DE CALCAIRE POUR UN BETON A BAS-COUTS

## CEMENT SUBSTITUTION BY COMBINED ADDITION OF CALCINED CLAYS AND LIMESTONE FOR LOW COST HOUSING

### AUTEUR AUTHOR

Mathieu Antoni



2009- PhD Student at Laboratory of Construction Materials, IMX STI EPFL, Lausanne  
 2005-2009 R&D Material Scientist at EPCOS OHG, Deutschlandsberg Austria  
 2000-2005 Master Science et Ingénierie des Matériaux, EPFL, Lausanne  
 1998-2000 Baccalauréat Scientifique, Lycée des Eaux Claires, Grenoble, France,  
 1985-1998 Birth and childhood in Evian les Bains, France

### MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

CALCINED CLAYS

LIMESTONE

CEMENT SUBSTITUTION

POZZOLANICITY

### EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM



EPFL-STI-IMX

Prof. Karen Scrivener

### INTRODUCTION INTRODUCTION

Supplementary cementitious materials (SCM's) are commonly used nowadays to reduce the clinker factor of blended cements. However, commonly used industrial by-products such as fly ash and blast furnace-blast slags are only available locally and in comparatively small amounts compared to the worldwide production of cement. Consequently, alternative sources of SCM's such as calcined clays are of growing interest. Kaolinite,  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ , mineral found in clayey soils is widely available in the earth's crust, and a heat treatment between 600 and 800°C of such clays leads to the dehydroxylation of the crystalline structure of kaolinite to give metakaolin [He 1995, Rocha 1993]. Excellent pozzolanic properties of metakaolin have been extensively studied in the literature [Sabir 2009, Fernandez 2011]. Pozzolanic reaction common definition is the reaction of finely ground reactive silicate and to lesser extent reactive aluminates with calcium hydroxide (portlandite) that has been produced by the hydration of the cement anhydrous phases. The products of the pozzolanic reaction are Calcium-Silicates-Aluminates gel hydrates.

Fine limestone is also commonly added to cement and it is established that limestone additions up to 5% can react entirely with cement and enhance most properties. It forms carbonates-AFm ( $C_2ACH_1$ , and/or  $C_2AC_{0.5}H_{1.5}$ ) and stabilizes ettringite, the highest water binding calicoaluminate cement hydrate ( $C_6A_3H_{12}$ ). The total volume of bound water increases and the pore filling by the hydrates is enhanced [Lothenbach & Matschei, 2007]. It is effective to improve the durability and has slight beneficial effect on the mechanical properties, especially at early age.

Nevertheless beyond 5%, limestone usually acts as inert filler. Use of limestone is extremely interesting because of its low price, ease of grinding, worldwide availability and clean environmental aspect (no  $CO_2$  production).

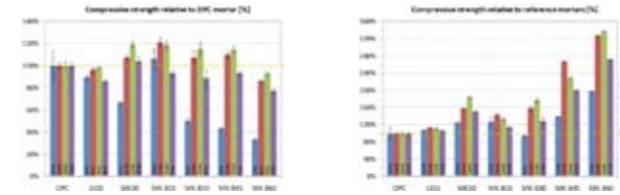
### OBJECTIFS OBJECTIVES

In this study we investigate the properties of blends with coupled additions of metakaolin and limestone, with the idea that the extra reactive alumina provided by the metakaolin will react with more limestone, allowing good properties to be maintained to higher levels of substitution. This approach has recently been applied using blends of fly ash and limestone [De Weerd, 2011].

### RESULTATS RESULTS

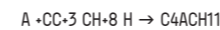
On the next figure are given the mechanical results obtained in Lausanne with very high quality industrial metakaolin. On the left side are given the relative values obtained by the blends compared with the OPC mortar, on the right the relative values to their references substituted mortars (inert quartz used instead of blended materials). Blends with substitution as high as 45% have similar or better compressive strengths than OPC reference at 7 and 28 days, while with 60% substitution the strength reaches 93% of the OPC at 28 days. Blending limestone and clays showed clearly to be effective. Compared to quartz references with similar fineness, the strengths obtained are much higher. Furthermore, at constant metakaolin content, the replacement of 15% OPC by limestone has nearly no detrimental effect on the compressive strength.

We could as well experimentally show by X-Ray Diffraction that the initial hypotheses concerning the possible synergy in the blend were confirmed; with stabilization of ettringite with simultaneous formation of growing amount of carboaluminates hydrates as well as strätlingite ( $C_2ASH_6$ ). The Thermogravimetry analysis has also demonstrated that the formation of these hydrates was consuming portlandite that provide a source of calcium ions to react with both the aluminates



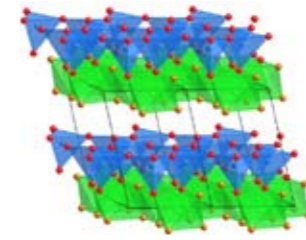
Figures 1: Compressive strength of blends obtained in Lausanne, normalized to the strength of pure OPC (first graph) and to the quartz reference (second graph) mortars at 1, 7, 28 & 90 days.

from the metakaolin and the carbonates from the limestone to form the carboaluminates hydrates.



### CONCLUSIONS CONCLUSIONS

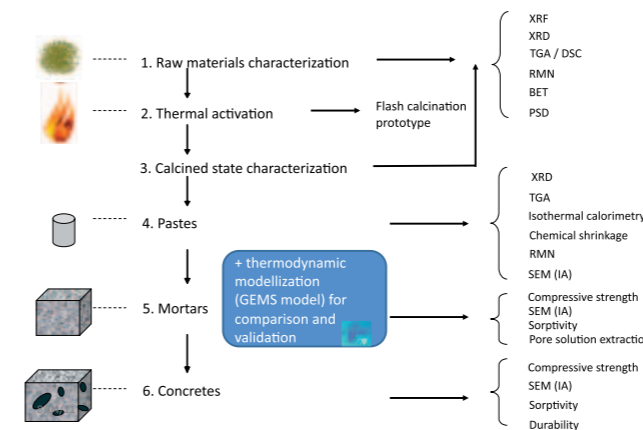
- Mechanical properties are not impaired at substitution levels as high as 45% at 7 days and later. The early age mechanical strength in this blend system are maintained due to the fast kinetics of the synergic reaction, provided by the fineness of the highly reactive metakaolin, as well as the initial fast dissolution of the carbonates that are consumed in the reaction.
- Phase assemblage is modified. Pozzolanic reaction is revisited:
  - Portlandite is virtually all consumed: non-solely by forming extra C-A-S-H gel but also large amount of carbonates AFm phases, strätlingite and ettringite phases.
  - A low-cost concrete with low clinker content is achievable by using local clays and adapt this blending.



Structure of the kaolinite. Alternating layers of one sheet of aluminate octahedra (green) sharing oxygen / hydroxyl group (red) with silicate tetrahedra (blue)

### TRAVAUX FUTURS FURTHER WORK

- Characterize reactivity and kinetics of the metakaolin for a better understanding of the ternary system ( $^{27}Al$  &  $^{28}Si$  NMR, SEM).
- Comparison of phase assemblage with thermodynamic calculations and phase stability (Pore solution measurements), for a consequent optimization of the system by varying the  $CO_2/SO_2/Al_2O_3$  ratios.
- Durability investigation of the system. Portlandite depletion implies threatening due to carbonation. Resistance to sulfates and marine salts is also investigated to fulfill the requirements adapted to the Cuban climatic conditions.
- Adaptation of the blends formulation to the local Cuban clay to transfer the knowledge gained in the project into application.



**AUTEUR AUTHOR**

Amélie Bazzoni



Dec. 2010-	Thesis Early Hydration of tricalcium silicate. Laboratory of construction materials - EPFL, Lausanne (CH)
2008-2010	Master in Materials Science and Engineering - EPFL, Lausanne (CH), School of engineering (STI) Specification: Structural materials for use in transport, energy and infrastructure
Spring 2010	Master Thesis Plasma nitriding of CoCrMo alloy for improving tribocorrosion performance. Tribology Lab - NTNU (Norwegian University of science and technology), Trondheim (Norway)
2009	Minor in Management of Technology and Entrepreneurship Program, College of Management of Technology (EPFL)
2005-2008	Bachelor in Materials Science and Engineering (STI, EPFL)

**MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS**

CRYSTAL DEFECTS

ALITE

TEM

EARLY HYDRATION

FIB 3D TOMOGRAPHY

**EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM**



Director : Prof. Karen Scrivener



Co-director : Dr. Marco Cantoni



With support of the Swiss National Foundation

**CONTEXTE CONTEXT**

Concrete is by far the most used material in the world (1m<sup>3</sup> or 2 tons being produced per person per year worldwide). Even if the associated CO<sub>2</sub> emissions are lower than alternative materials, due to the huge volumes of cement produced it accounts for some 5-8% of manmade CO<sub>2</sub>. Furthermore, demand is forecast to double or treble by 2050, due to growing world population and development.

Improvements in sustainability must be made in order to keep safe buildings and reduce as possible the CO<sub>2</sub> emissions. However, there is no single solution to lower CO<sub>2</sub> emissions.

This is a great challenge, as concrete is a complex material currently relying on a largely empirical database for use. It is imperative to move towards a more scientific basis. These developments permit a use based on the prediction of properties from microstructure. This project lies in such an approach; using an integrated modelling and experimental approach to determine the kinetics and microstructural development of the hydration reactions and then using this microstructure to predict behaviour.

**OBJECTIFS OBJECTIVES**

This thesis has as an objective to better understand mechanisms of hydration at early age. Recent work in geochemistry [1] has shown that the mechanism of dissolution of minerals changes significantly with the undersaturation of the solution and the defect density of the crystal. Based on a model proposed by P. Juilland in his thesis [2] mechanism of dissolution and growth will be further investigated.

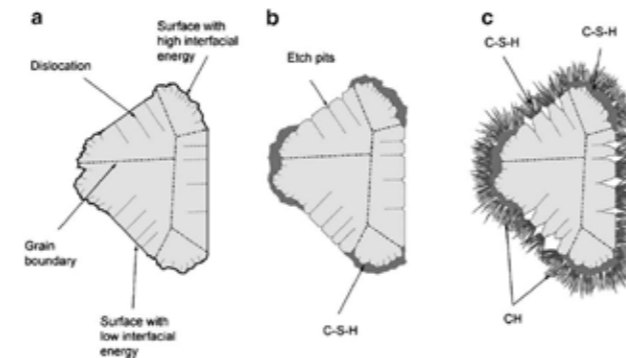


Figure 1: hydration scheme at early age of reaction. (a) Alite grain in cross section. (b) When the alite grain is put in contact with water some primary metastable hydrates are assumed to precipitate. (c) When supersaturation with respect to stable hydrates is reached stable nuclei of C-S-H and CH start to grow, which mark the end of the induction period and the beginning of the acceleration period.

Different steps of early hydration mechanisms are studied benefitting from the modern electron microscopy techniques, such as transmission electron microscopy (TEM) and focus ion beam (FIB).

In a first part the kind and density of crystallographic defects in tricalcium silicate phase will be determined and correlated with the slow down in the induction period. In a second part an understanding of the mechanism of C-S-H growth will be deepened, since it regulates the kinetics of hydration. And finally the nucleation and growth process of CH and C-S-H will be correlated with the onset of the acceleration period.

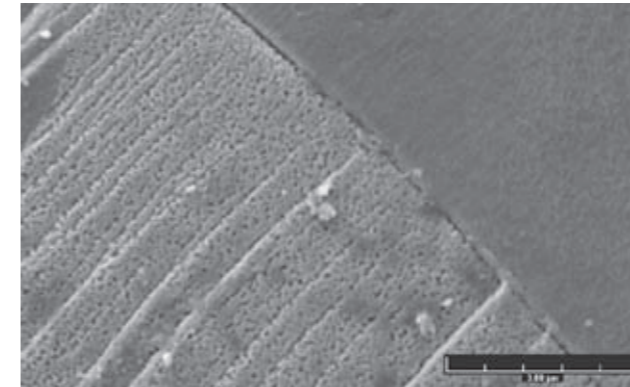


Figure 2: Alite immersed during 2 minutes in deionised water. The left part of the grain exhibits etch pits, while the other one not at all.

**METHODOLOGIE METHODOLOGY**

**Models**

Several models have been proposed to explain the mechanism of hydration at early age. In this thesis the focus lies on the crystal dissolution theory:

*The formation of crystallographically controlled etch pits is a prominent feature of mineral surfaces. The existence of these etch pits indicates that the process at the surface of certain minerals controlled the kinetics of dissolution and the diffusion plays a secondary role.*

The early dissolution behavior is dramatically affected by the defect density of the crystal. For concentrations far from equilibrium, the rate of dissolution slows drastically as there is no longer enough energy to nucleate etch pits at dislocations and dissolution proceeds by slow step retreat.

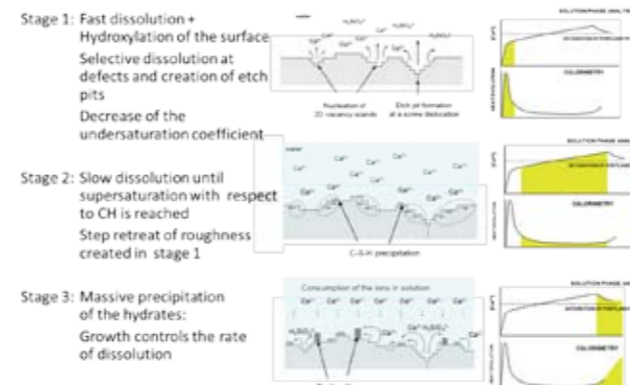


Figure 3: Julland [2009] Interpretation of the mechanism of early hydration according to dissolution theory.

**Techniques**

In this thesis besides traditional characterization techniques of cement (Calorimetry, XRD) two microscopy techniques will be used. The Transmission electron microscopy (TEM) to characterise crystallographic defects and the Focus ion beam (FIB) to study 3D growth of hydrates.

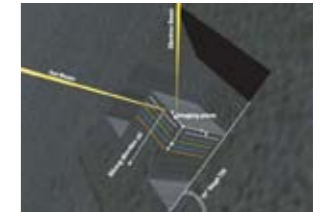


Figure 4: Holzer et al. [2004] Schematic illustration of a sample cube and geometrical relationships of the imaging plane with electron and ion beam.

A major limitation of most microscopical techniques is that the microstructure can only be imaged in 2 dimensions. In this project FIB serial sectioning will be applied to study the growth mode and space filling of hydrates. A 3D nanotomography will allow an study of the 3D growth mode of hydrates at the surface of the alite grains.

**RESULTATS ATTENDUS EXPECTED RESULTS**

The study of the crystal of alite with a TEM microscope will be performed in order to reproduce results of Groves in terms of crystal structure. Further investigation will be led in order to determine dislocation density. Different samples with different defects densities will be prepared and compared.

Formation of hydration products will be followed with FIB and evidenced by 3D tomography. Juilland evidenced the etch pits formation on alite surface after 7 hours of hydration. In this project surface modification will be followed at different hydration times and then C-S-H formation, growth and morphology will be studied.

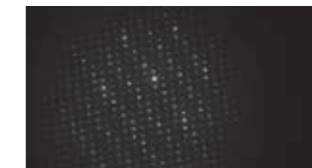


Figure 5: Groves & Hudson [1982] Buxtonite alite showing extra reflection due to twinning.



Figure 6: Juilland [2009] FIB reconstruction of an alite surface hydrated in paste for 7 hours. Dimension of the box: 1.75µm x 1µm x 400nm

**References**

[1] Lasaga A.C. and Lüttge, A., Science, 291:2400-2404, 2001  
 [2] Juilland, Early hydration of cementitious systems, thèse EPFL, 2009  
 [3] Holzer L. et al., Journal of Microscopy, 216:84-95, 2004  
 [4] Hudson K.E. and Groves G.W., Cem Conc Res, 12: 61-68, 1982

**CINETIQUE D'HYDRATATION DU CIMENT :  
INFLUENCE DES ADDITIONS MINERALES  
KINETICS OF CEMENT HYDRATION :  
INFLUENCE OF MINERALS ADDITIONS**

**AUTEUR AUTHOR**

Elise Berodier



2011 PhD student in the Laboratory of building Materials EPFL Lausanne. Thesis included in Nanocem Network  
2010 Engineering School in Materials Sciences of Barcelona (UPC) - Spain  
2009 European School of Engineering and Materials Science (EESIM) - France  
2008 Bachelor in Materials Sciences (EEIGM) - France

**MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS**

HYDRATION KINETICS

SMC'S

FILLER EFFECT

**EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM**



Prof. Karen Scrivener  
Partenaire : Nanocem  
Université en collaboration : Aberdeen

**OBJECTIFS OBJECTIVES**

Slag, fly ash, silica fume are by-products from iron production or coal combustion and now are widely used in concrete. These materials, called supplementary cementitious materials (SCMs) are substitute to Portland cement providing a reducing of the environmental impact of cement.

Although these blended cements have been investigated notably due to their great enhancement of several properties, the hydration process in such systems remains complex to understand. The main difficulty is the dependency of the mechanisms: the hydration of cement and the reaction of the SCMs themselves would occur simultaneously and also each one could affect the reactivity of the other. Nevertheless, it is well known the SCMs have a significant impact on the hydration kinetics of cement whereas its reaction is slower than the reaction of the clinker phases.

The purpose of this thesis is to elucidate the mechanisms due to the addition of SCMs. In order to simulate the impact of these additions on the hydration kinetics and the microstructure.

**ETAT DES LIEUX STATE OF THE ART**

Influence of additives on cement hydration has been widely studied and reported in literature. An experimental study conducted by V. Kocaba [Ph.D thesis] show distinctly the influence of silica fume and slags blended with Portland cement on cement hydration [figure 1]. The impact of the microsilica filler used shows a pronounced impact on the acceleration and deceleration period of the heat evolution profile. Using slag (low SiO2) with slightly lower specific surface area than silica fume, only the hydration of the aluminat phase was affected which was detected as a shoulder peak after the silicate peak [figure 2]. Moreover, it was noted that these effects were dependent on the cement composition. These findings confirmed the influence of SCMs in terms of both physical (surface area) and chemical effect (pore-solution chemistry). However, the mechanisms driving the changes were not delineated clearly in the original study.

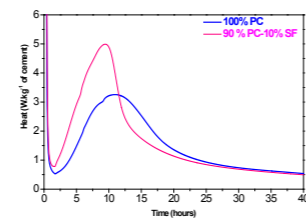


Figure 1: V. Kocaba [2009] Heat evolution of 90% Portland cement and 10% of Silica fume. Significant effect on the acceleration and deceleration period.

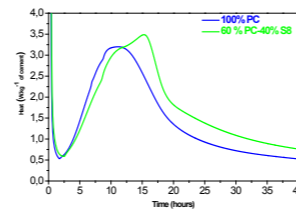


Figure 2: heat evolution of 60% Portland cement and 40% of Slag. The major impact is on the peak attributed to aluminat phase.

In order to singularly focus on physical effect, Portland Cement (PC) blended with quartz was investigated. Arguably due to its crystallinity, quartz is assumed to be chemically inert. The results display [figure 3] a delay in the deceleration period. This is in accordance with Gutteridge<sup>1</sup> who found even inert materials can affect the hydration of clinker phases. This is usually referred as a "filler effect", which primarily increases the surface area and provides additional nucleation sites for the products. As such, two mechanisms are assumed to contribute to the filler effect<sup>2</sup>.

The first one is the extension of available space. As the filler does not produce hydrates, there is more space available for hydrated products to nucleate and grow.

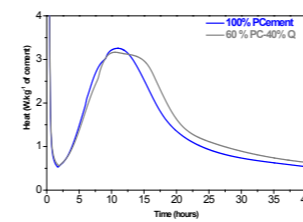


Figure 3: V. Kocaba [2009] Heat evolution of 60% Portland cement and 40% of Quartz, supposed chemically inert. The deceleration period is delayed compare to plain cement hydration.

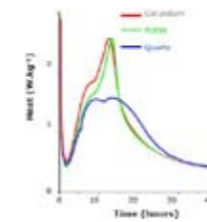


Figure 4: G. Le Saout, Ibaouli, [2006] Effect of various filler on the cement hydration.

The second mechanism would be the enhancement of heterogeneous nucleation on the SCMs particles surface as foreign materials which catalyze the nucleation process by reducing the energy barrier. In other words, the fine particles of SCMs would act as nucleation sites for hydrates of the clinker phases.

In this thesis, these mechanisms will be further examined to identify which chemical as well as physical effects from the minerals additions can influence the hydration of clinker phases.

Another point is the major impact on the aluminat hydration in some blended cements. The hydration products of the aluminat phase lead to a second or a shoulder peak in calorimetry after the main silicate peak. This peak is greatly enhanced in the case of slag [figure2] and also with some additions of fillers such as rutile, corundum [figure 4] which are not expected to react. Several researchers have noted a similar effect, and attributed the influence as a manifestation of early reaction of the slag itself. However, it has been reported that the extent of the reaction of the aluminat phase in slag blended with cement is the same than in the case of plain cement<sup>3</sup>. Therefore, it can be hypothesized that slag or other filler would enhance the nucleation during the aluminat reaction rather than react themselves. So, that provides some questions to consider: why rutile and corundum do not have the same effect on hydration kinetics? Which mechanisms impact the aluminat reaction?

**METHODOLOGIE METHODOLOGY**

The different phases of the thesis are outlined in the figure below.

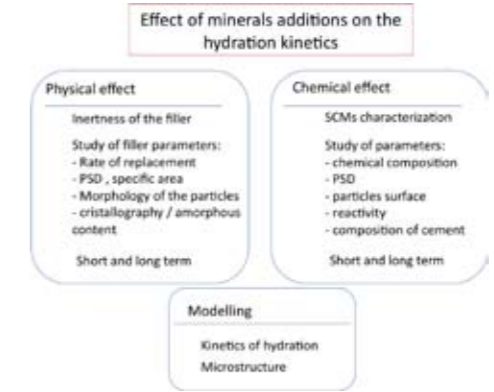


Figure 5

The first part is dedicated to the study of inert filler in order to determine the physical effect of the minerals additions. This leads to the second part that will be focused on the chemical effect. Towards this end, different mineral compositions will be investigated up to more complex cementitious materials such as slag, fly ash and silica fume.

Based on the results of the previous parts, the third ones will identify the role of SCMs in blended cements and will explain the mechanisms occurring. Therefore we will be able to simulate the impact of SCMs using a numerical model and describing the effect of the additives in a microstructural form.

**RESULTATS ATTENDUS EXPECTED OUTLOOKS**

The systematic investigation of parameters will provide better mechanistic understanding of blended cementitious systems. A clarification of some controversial points is expected, especially about the features of minerals additions which would influence the kinetics.

**References**

- Gutteridge, *The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement*, Cem. Concr. Res. 1990.
- Lotenbach et al, *Supplementary cementitious materials*, Cem. Concr. Res. (2010).
- Kocaba, *Development and Evaluation of methods to follow microstructural development of cementitious systems including slags*, PhD Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (2009).

# HYDRATATION DES SYSTEMES A BASE DE CIMENT D'ALUMINATE DE CALCIUM AVEC SULFATES DE CALCIUM ET MATERIAUX CIMENTERAIRES DE SUBSTITUTION

## HYDRATION OF CALCIUM ALUMINATE CEMENT BASED SYSTEMS WITH CALCIUM SULFATES AND SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS

### AUTEUR AUTHOR

Julien Bizzozero



October 2010 PhD in Materials Science, Laboratory of construction materials Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL)

2005-2010 Bachelor and Master in Materials Science and Engineering Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL) Orientation: Structural materials for use in transport, energy and infrastructure Minor: Management of Technology and Entrepreneurship

2001-2005 Federal Diploma (specialization in physics and applied mathematics) Secondary School of Lugano 2, Switzerland

### MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

CALCIUM ALUMINATE CEMENT

EXPANSION

HYDRATION

SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS

### CONTEXTE CONTEXT

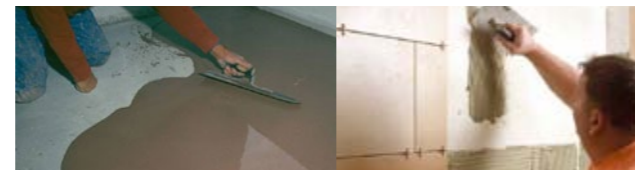
Cement is the most widely used material in the world, its annual production is of about 2 billion tons. This increasing need in concrete is responsible of 5 to 8% of global manmade CO<sub>2</sub> emissions [1] [2].

The different ways to reduce these emissions are: to optimize the cement manufacturing process, to add supplementary cementitious materials (SCMs) in order to reduce the clinker content or to use alternative raw materials (less CaCO<sub>3</sub>). Calcium aluminate cement (CAC) can respond to these needs because it contains less limestone. During the clinker production, the de-carbonation of limestone, leads to emissions of carbon dioxide:



Additions of SCMs can reduce the clinker content in the final binder.

The main properties of systems composed of calcium aluminate cement and calcium sulfates are rapid strength development. This is a very important property for building chemistry applications like self-leveling compounds, tile adhesives and repairing mortars. For example after the application of a self-leveling compound it is possible to walk on it after 1 day if it contains no CAC, with CAC it is possible to walk after 4 hours [3]. Another important property for these applications is the dimensional stability. In fact during the setting, the mortar can shrink and this generally causes cracks. With expansive systems it is possible to compensate this shrinkage in order to avoid cracks.



### OBJECTIFS OBJECTIVES

The aim of this study is to follow the hydration, to analyze the microstructure and to understand the principles of the dimensional stability of systems composed of calcium aluminate cement and calcium sulfate with or without the addition of SCMs (different types: silica fume, fly ash, ground granulated blast furnace slags (GGBFS), metakaolin, limestone and pozzolan).

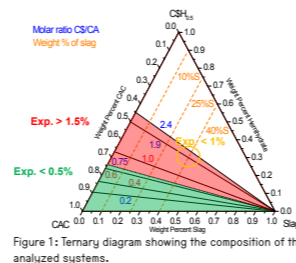


Figure 1: Ternary diagram showing the composition of the analyzed systems.

### METHODOLOGIE METHODOLOGY

This thesis will be developed on these 4 axes:

1. Understanding of the expansion of binary systems composed of calcium aluminate cement and calcium sulfates.
2. The SCMs will be added to the binary systems in order to analyze and understand the hydration of these ternary systems. At the beginning slag (GGBFS) will be used.

3. The durability of the ternary systems will be studied on long term.
4. The last part of this thesis is the study of the functionalities of these systems for a practical context.

The main used characterization techniques are isothermal calorimetry, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, mercury intrusion porosimetry, 1H NMR, expansion measurement and mechanical tests.

### RESULTATS PRELIMAIRES ET DISCUSSION PRELIMINARY RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 shows the expansion profile for different binary and ternary systems containing CAC, calcium sulfate (here is hemihydrate or plaster) and slag. The expansion increases with calcium sulfate content. By increasing the slag content there is a reduction of the overall expansion. This is probably due to dilution effect.

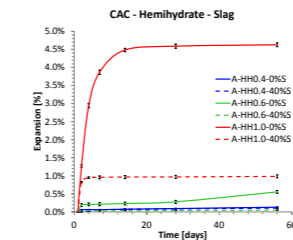


Figure 2: Expansion for different binary and ternary systems.

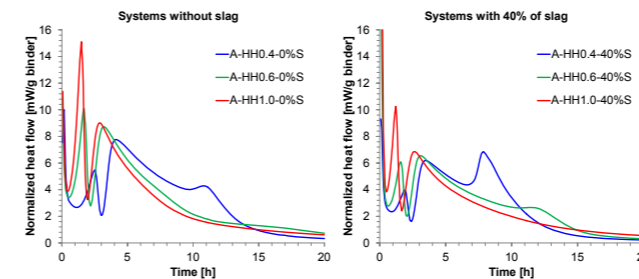


Figure 3: Isothermal calorimetry curves done at 20°C.

Figure 3 shows the hydration kinetics of the systems without and with slag. These plots show the exothermic peaks of the hydration reaction in function of the time. With an increase in calcium sulfate, there is an acceleration of the kinetics. With slag there is a slight acceleration of the reactions and the third peak of the HH0.4 system is amplified. The reason of the acceleration due to slag additions is probably that there are more nucleation sites or more surface for hydrates precipitation.

X-ray diffraction is used to analyze the crystalline phases. Figure 4 shows two diffractograms of systems having a ratio of calcium sulfate to monocalcium aluminate (C#/CA) of 0.4 and 1 both with 40% of slag. It is interesting to notice the presence of strätlingite (C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>) after 7 days

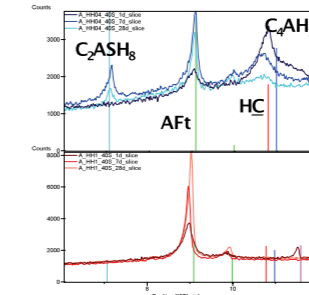


Figure 4: X-ray diffraction pattern.

for the systems HH0.4. When more ettringite is formed, it is the case for the HH1.0 systems, there is no formation of strätlingite after 28 days. This phase forms with the amorphous silica contained in the slag.

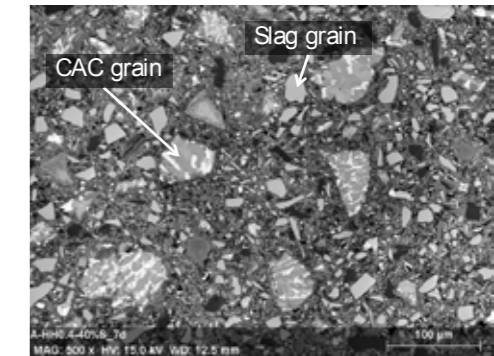


Figure 5: Backscattered electron image of cement paste at 7 days.

Figure 5 is a backscattered electron image taken with a scanning electron microscope on a sample containing CAC, hemihydrate and slag. The CAC grains can be well seen as well as the slag grains. The hemihydrate particles are not visible because they already dissolved. With this technique, SEM, it is possible to perform image analysis on the different grey levels which correspond to different phases. This is useful to quantify the reaction of slag which is amorphous and cannot be detected by XRD analysis.

### CONCLUSIONS ET TRAVAUX FUTURS CONCLUSIONS AND FURTHER WORK

- > The expansion is enhanced by higher calcium sulfate content, in this case hemihydrate or plaster. There is a threshold, presented in Figure 1, between low expansive and high expansive systems. This threshold is around a molar ratio of C#/CA of 0.7.
- > The hydration kinetics are affected by the presence of slag. With addition of 40%wt of slag there is an acceleration of the overall reactions and the third peak is amplified.
- > XRD analyses show that there is formation of strätlingite in the systems containing less hemihydrate. This point has to be studied in more details.

#### Further work

- > Understand the mechanisms of expansion
- > Identify the role of slag at early age hydration (filler effect?) and at longer ages
- > Quantification of the degree of hydration of slag (SEM-BSE-Image Analysis)

#### References

- [1] Gartner, E., Industrially interesting approaches to «low-CO<sub>2</sub>» cements. Cement and Concrete Research, 2004, 34(9): p. 1489-1498.
- [2] Darroft, J.S., et al., Sustainable development and climate change initiatives. Cement and Concrete Research, 2008, 38(2): p. 115-127.
- [3] Kighelman, J., Hydration and structure development of ternary binder system as used in self-leveling compounds, Thèse N°3777, EPFL, 2007.
- [4] Scherer, G.W., Stress from crystallization of salt. Cement and Concrete Research, 2004, 34(9): p. 1613-1624.

# ACTIVATION THERMIQUE ET MECANIQUE DES SOLS ARGILEUX POUR LA SUBSTITUTION DU CIMENT THERMAL AND MECHANICAL ACTIVATION OF CLAYEY SOILS FOR CEMENT REPLACEMENT

## AUTEUR AUTHOR

Rancés Castillo Lara



His work is related with investigation of eco-materials and their production at local level, focus on low cost housing in Cuba and other countries in South America. He has contributed to the Network EcoSouth in social housing projects.

As member of the work team "Ecomaterials in social housing projects" was awarded with the "World Habitat Award 2007" by the British foundation "Building & Housing Foundation" together with the Habitat section of the United Nations.

Born in Cuba in 1981. He obtained his civil engineering degree in 2004 at the Central University of Las Villas. Since then he has worked as lecturer in the Department of Civil Engineering of the Construction Faculty of this university. He is also associate researcher at the Centre for Research & Development of Structures and Materials (CIDEM).

Since 2006 is member of the joint research program "Ecomaterials for Low-cost housing" between FNS-EP-FL-UCLV. In 2008 he made a research stay in the LMC, EPFL, for the study of calcined clays as supplementary cementitious materials. Recently defended his PhD thesis entitled "High reactivity pozzolans from thermal and mechanical activation of low purity grade kaolinitic clays".

## MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

POZZOLANS

CALCINED CLAYS

POROSITY

SORPTIVITY

## EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM

In Cuba:  
Prof. Fernando Martirena, Rancés Castillo, Adrian Alujas

In Switzerland:  
Prof. Karen Scrivener, Rodrigo Fernández, Mathieu Antoni

## OBJECTIF OBJECTIVE

Analyze the mechanical properties and microstructure changes in pastes and mortars by replacing 30% of ordinary Portland cement in weight by a pozzolanic mineral admixture, from the calcination of clayey soil.

## CONTRIBUTIONS PRINCIPALES MAIN CONTRIBUTIONS

- > The use of local materials, in this case a clayey soil with a kaolinite mineral of low degree purity as a natural source for the production of highly reactive pozzolan.
- > The improvement of environmental performance of concrete due to the reduction of ordinary Portland cement clinker consumption, together with the increasing of compressive strength and durability and the efficient use of alternative raw materials.

## INTRODUCTION INTRODUCTION

Nowadays the cement industry looks for the replacement of cement clinker by other supplementary cementitious materials (SCM) due to economic and environmental reasons. The search for new alternative cementitious materials is necessary, mostly in developing countries, where materials requiring high technological costs are very limited.

Calcined clay in form of metakaolin are such an alternative, they received a special attention in the recent years in the literature. When added to mortar and concrete, calcined clays provide improved mechanical behavior as well as improved durability.

This work studies a clay soil from the central region of Cuba as a natural source for the production of highly reactive pozzolan. This soil contains kaolinite as the main clay mineral. Two processing procedures of the soil have been evaluated: without sedimentation (clayey earth: T120) and with sedimentation (sedimented clay: AS-900), both have been calcined at 900 °C and ground until achieving similar grain size. A sample of sugar cane straw ash (SC) has also been used for comparison with an already characterized pozzolan. A calcium carbonate filler (F) is used, with equal percent of substitution, as reference mix of equal amounts of cement.

## RESULTS RESULTATS

The grains size distribution of the processed materials has been measured. Finer materials than the ordinary Portland cement (CP N3) have been obtained achieving average particle size D50: SC 5.49 µm, T120 3.83 µm, AS-900 7.47 µm and F 13.01 µm. The study shows that grinding has a major influence on reactivity of both processed materials. The reactive pozzolans, finely ground, first act as filler, which enhances the cement hydration process. When 30% of cement is replaced by tested pozzolans, the compressive strengths of mortars are similar to the reference at 7 days. Later on, the pozzolanic reaction takes place and compressive strengths at 28 and 60 days were higher than reference (Figure 1). The grinding of the pozzolans shows to have a major influence on the compressive strength behavior (Figure 2).

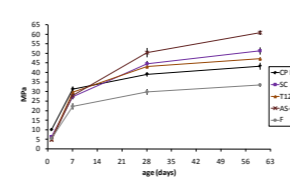


Figure 1: Compressive strength in mortars.

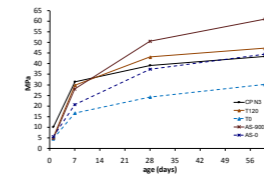


Figure 2: Effect of the grinding process on compressive strength.

Refinement is evident in the internal structure of pores in pastes made from these pozzolans on these measurements of mercury intrusion porosity (MIP). (Figure 3)

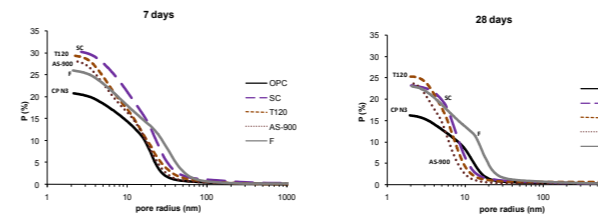


Figure 3: Porosity by mercury intrusion in pastes at 7 and 28 days.

To assess the transport phenomena in the material, sorptivity of mortars has been evaluated. Clayey soils substituted systems showed a reduction of their values from 28 days (Figure 4). This study leads to a reduction of more than 60% of capillary porosity in mortars made of sedimented clay compared to pure Portland reference (Figure 5).

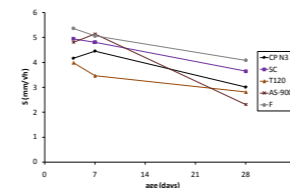


Figure 4: Sorptivity in mortars.

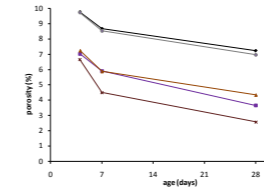


Figure 5: Capillary porosity in mortars.

## PERSPECTIVES OUTLOOKS

A way to reduce the costly energy consumption associated to the clay activation would be the employment of a more efficient calcination process. We investigated the solid fuel block (SFB), a densified block of intimately mixed biomass from agro-industrial processes and clays. The SFB enables a calcination process around 900°C that is economically more viable and less dependent on external energy source. A key factor is the use of appropriate technologies to enable an efficient burning process, such as continuous vertical kiln (VSBK) for the production of bricks. We demonstrated that the ashes collected from the SFB bur-

ning have a potential pozzolanic behavior, which could be used after grinding as cement replacement. A possible scenario for the application of current results of this work is the use of calcined clay for concrete hollow block production at local level. (Figure 6)

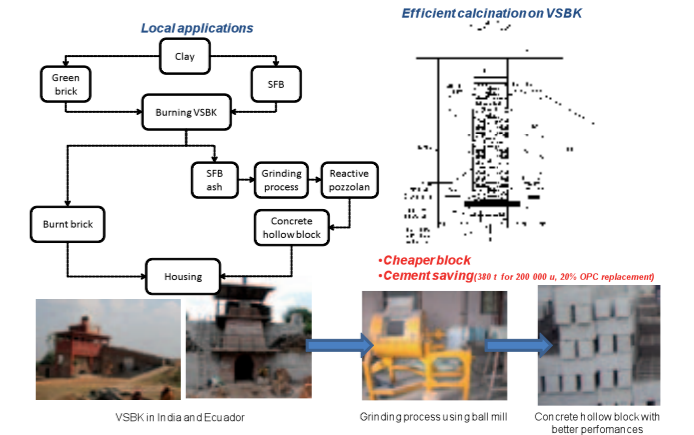


Figure 6: Global conception of local application.

## CONCLUSIONS CONCLUSIONS

When finely ground, calcined soils and clays at 900 °C can achieve remarkable pozzolanic activity. This can enlarge the field of applications of possibilities to implement the production of reactive pozzolans from local clayey materials.

The process of thermal activation of the clays can be done efficiently by burning of solid fuel block. The vertical shift brick kiln technology ensures a controlled combustion process. Clay calcined by this process, after adequate grinding process, can be used as supplementary cementitious material in the manufacture of concrete hollow blocks.

**MECANISMES CONTROLANT LA REACTION ALCALI GRANULAT EN PRESENCE D'ADDITIONS MINERALES**  
**THE MECHANISMS CONTROLLING ALKALI-SILICA REACTION WITH THE USE OF SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS**

**AUTEUR AUTHOR**

Théodore Chappex



2008-2011 PhD in Material Science and Engineering, EPFL Lausanne  
 2008 Master in Material Science and Engineering, EPFL Lausanne  
 2003 Maturité fédérale, Kollegium Brig

**MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS**

ASR  
 ALKALI  
 SILICA  
 DURABILITY  
 AGGREGATES

**EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM**



Prof. Karen Scrivener  
 Financial support by Sika

**INTRODUCTION INTRODUCTION**

A majority of dams in Switzerland and a lot of large concrete structures were built decades ago implementing the technologies available at the point. Today, many structures exhibit durability problems, often symptoms of alkali silica reaction (ASR), like for example, the dam of the figure 1. ASR appears by the reaction of alkaline pore solution of the concrete, and the amorphous silica composing certain type of aggregates. A hygroscopic gel is formed. ASR causes aggregates expansion and concrete deterioration, sometimes leading to the irreversible destruction of structures.



Figure 1: ASR affected dam in the Swiss Alps

An expedient solution would be to use non-reactive aggregates, but this is often not feasible because of unavailability of non-reactive aggregates or the constraint of using local aggregates for environmental reasons. In Switzerland the majority of the aggregates are observed to show some signs of alkali reactivity. It has been widely shown that the best way to avoid problems is through the use of supplementary cementitious materials (SCM) in blended cements, like slags and pozzolans. The problem is that the amount of SCM necessary is specific to each aggregate type and needs to be determined by tedious testing, whose applicability to field conditions is questionable. Indeed the most efficient tests of reactivity take a year to yield reliable results, which is often far too long to pre-test a concrete formulation. Accelerated expansion tests with metakaolin and silica fume are presented in the figure 2. This project aims to identify the fundamental mechanisms by which SCMs prevent deleterious ASR and so permit faster and more reliable methods to identify durable combinations for concrete.

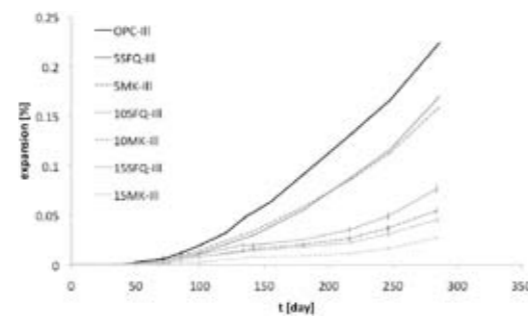


Figure 2: Expansion versus time of a reactive Swiss Alps aggregate - 38°C, 0.6M NaOH solution

Accelerated expansion tests of different metakaolin (MK) and silica fume (SF) blended mortars are proposed in the picture 2. It appears that the higher is the substitution level, the lower is the expansion over the time.

The addition of SCM in reactive concrete basically corresponds to the addition of silica and alumina in the system. To understand the implied mechanisms, the influences of these both additions are studied separately in this work.

**AJOUT DE SILICE SILICA ADDITION**

The silica present in SCMs has an influence on the hydration products composition of the cement paste. It appears that an increase of the substitutions level of SCM in the paste increases the silicon content of the C-S-H product, leading in a lower concentration in sodium and potassium of the pore solution over the time. The alkalis are fixed on the silanol sites of the C-S-H phase. The lower alkalinity of the pore solution results in a lower dissolution of the reactive phases in the aggregates.

Pastes containing silica fume and metakaolin were studied in term of hydrate phases compositions and pore solution concentrations, obtained by high-pressure extraction. It appears that an increase of the substitutions level of SCM in the paste increases the silicon content of the C-S-H product, leading in a lower concentration in sodium and potassium of the pore solution over the time. The alkalis are fixed on the silanol sites of the C-S-H phase. The lower alkalinity of the pore solution results in a lower dissolution of the reactive phases in the aggregates.

This is the first mechanism reducing ASR with the use of SCMs.

**AJOUT D'ALUMINE ALUMINA ADDITION**

This study proposes a new mechanism to explain the control of ASR by the use of aluminium rich SCMs.

These SCMs increase the aluminium ions concentration in the pore solution. Aluminium species are incorporated on the silica surface of the reactive aggregates and limit the dissolution of amorphous silica. This results in a lower reactivity of the aggregates. Even less than one atomic layer of aluminium incorporated on the silica surface is enough to significantly reduce silica dissolution.

In order to show the effect of aluminium species in solution on the degradation of reactive aggregates, they were put in solutions corresponding to the cement paste pore solution. Image analysis obtained by SEM able to define a reacted fraction of the aggregates. The results are proposed on the figure 3.

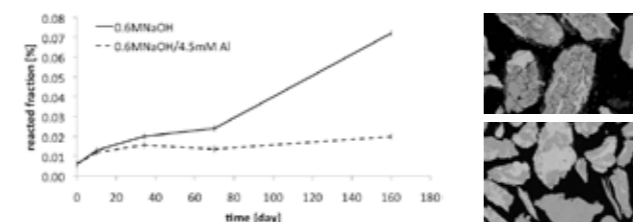


Figure 3: Reacted fraction analysis over the time of the swiss reactive aggregate at 60°C in a simulated pore solution with and without 4.5 mM of aluminium. The aggregates states for the two different conditions are proposed on the right

It was confirmed that aluminium species in the pore solution have an inhibiting effect on the deterioration of reactive aggregates.

In order to understand this mechanism, the reacting phase of the aggregate were isolated. Amorphous silica samples were put in solutions similar to concrete. The samples were observed by scanning electron microscope with secondary electrons, in order to have information about the surface dissolution over time. It appears that the increase of aluminium concentration in the solution lowers the dissolution of silica at a given time. An example of the different surfaces states is proposed on the figure 4.

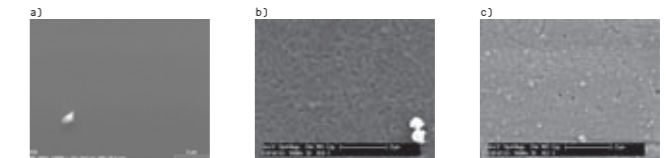


Figure 4: Fused silica surface: a) reference, b) after 90 days in a classic pore solution, c) after 90 days in a 2.5mM Al pore solution - Silica surface presents less dissolution pits in the aluminium containing solution

The quantification of the incorporation is presented on the graphic of figure 5. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) revealed that the aluminium species are chemisorbed as inner sphere complex on the silica surface.

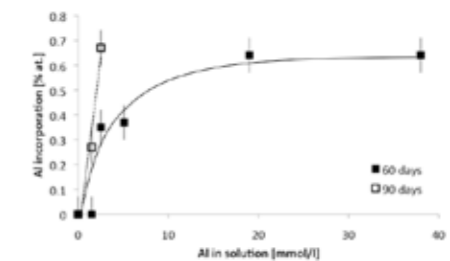


Figure 5: Adsorption isotherm of aluminium on the silica surface

**CONCLUSION CONCLUSION**

This study gives new insight into the mechanisms behind the control of ASR by SCMs. The knowledge of these mechanisms will be able to model the behaviour of SCM additions with given aggregates regarding ASR. The possibility to predict a minimum amount of a known SCM in a concrete would minimize costs, optimize mechanical properties and durability of concretes for which the use of reactive aggregates cannot be avoided.

**MODELISATION DU RETRECISSEMENT AUTOGENE PRECOCE DE LA PATE DE CIMENT EN DURCISSEMENT**  
**MODELLING AUTOGENOUS SHRINKAGE OF HARDENING CEMENT PASTE AT EARLY AGE**

**AUTEUR AUTHOR**

Quang Huy Do



2009 Master degree in Computational Mechanics  
 2001 Bachelor's degree in Civil Engineering

**MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS**

AUTOGENOUS SHRINKAGE  
 MODELLING  
 CEMENT HYDRATION  
 EARLY AGE

**EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM**

Prof. Karen Scrivener  
 Shashank Bishnoi



This work is supported by the Swiss National Science Foundation

**CONTEXTE CONTEXT**

Autogenous shrinkage is a consequence of self-desiccation of cement paste and directly influenced by the drying out process of the capillary porosity starting from larger pores to finer pores in the hardening microstructure. Therefore the evolution of the pore network controls autogenous shrinkage. It has been recently found that the use of high-performance concrete with low w/c ratio and addition of silica fume can have significant autogenous shrinkage. Due to condition of aggregate restraint, autogenous deformation induces tensile stresses in cement paste. If the tensile stresses developed exceed the tensile strength, early age micro-cracking occurs and therefore reduces durability of concrete.

In traditional concrete, this deformation is negligible compared i.e. drying shrinkage. However, recently with the use of high-performance concrete with low water / cement ratio and addition of silica fume, autogenous shrinkage has become significant, which induces micro-cracking and reduces strength of concrete, therefore the knowledge of these phenomena are increasingly important to improve the quality of cementitious material.

**OBJECTIFS OBJECTIVES**

The main objective of this research is to develop a numerical simulation to predict evolution of autogenous shrinkage of hardening cement paste at early age. The simulation will go directly from an existing hydration model of microstructure through the mechanisms to the macroscopic result of autogenous shrinkage.

**METHODOLOGIE METHODOLOGY**

The present study uses the flowchart of the modelling process shown in Figure 2, in which the mechanism of capillary tension is adopted since this mechanism is convenient for quantification of autogenous shrinkage.

A modelling framework, called *mic*, has been developed to enable simulations of complex particulate growths, in particular the microstructural evolution of hydrating cement paste. The microstructures generated by *mic* can be used to obtain important information that is the input of the autogenous shrinkage simulation.

Due to simplicity and efficiency of numerical implementation, the voxel approach is used to characterize the pore structure. The numerical solution has to be good enough to capture fine capillary pores in real-time analysis and the numerical algorithm has to be less sensitive to pixel resolution.

Based on result of the pore size distribution and the calculated chemical shrinkage, the Kelvin's radius where the location of meniscus formed is determined. Therefore the development of capillary pressure can be calculated.

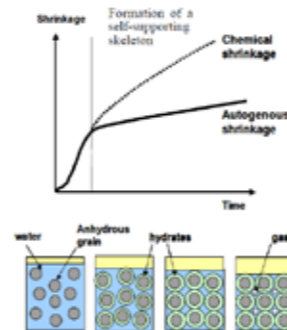


Figure 1: Schematic diagram of autogenous shrinkage during hydration (from T. Nawa)



Figure 2: Flowchart of modelling of autogenous shrinkage

The elastic properties of the modelled microstructure are determined by application of Finite Element Method and numerical homogenization on the representative microstructure volume consisting of the solid spherical particles and porous spaces is meshed into discrete linear hexahedral elements. The viscoelastic behaviors of hardening cement paste then can be modelled by using the viscoelastic constitutive law instead of the elastic constitutive law.

Knowing the capillary pressure and the mechanical properties, autogenous strain can be calculated as the average hydrostatic strain. The combinations of autogenous shrinkage with thermal dilatation and microcracking effects will be studied.

**RESULTATS RESULTS**

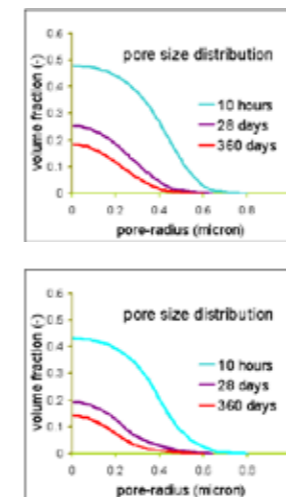


Figure 3: Flowchart of modelling of autogenous shrinkage

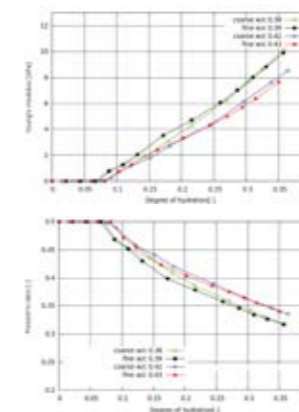


Figure 4: Flowchart of modelling of autogenous shrinkage

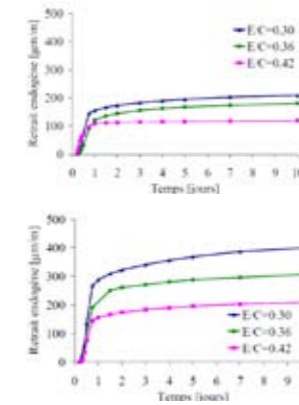


Figure 4: Flowchart of modelling of autogenous shrinkage

**TRAVAUX FUTURS FUTURE WORKS**

- > Model autogenous shrinkage in varying temperature condition.
- > Model autogenous shrinkage including the effect of thermal deformation.
- > Model autogenous shrinkage including the effect of creep behavior of cement paste.
- > Model autogenous shrinkage taking into account microcracking in the microstructure.

**ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REACTION DES SILICES  
ALCALINES SOUS CONTRAINTE TRI-AXIALE  
NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF ALKALI-SILICA REACTION  
UNDER TRI-AXIAL STRESS**

**AUTEUR AUTHOR**

Alain Giorla



2009 (Dec) PhD in Materials Science, Laboratory of construction materials, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL)

2006-2009 Master in Engineering, Ecole Centrale de Nantes (ECN), France  
Orientation: Computer Sciences  
Minor: modeling of composite materials

2004-2006 Preparatory Course in Physics and Chemistry, Lycée Janson de Sailly, France

2004 Scientific Baccalauréat (specialization in Mathematics and Physics)

**MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS**

ALKALI-SILICA REACTION

CRACKS AND DAMAGE

FINITE ELEMENTS METHOD

**EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM**

Pr. Karen Scrivener



Financial support from the Swiss Federal Office for Energy

**INTRODUCTION INTRODUCTION**

Alkali-Silica Reaction (ASR) is a durability issue which may affect concrete in structures, notably dams, bridges and tunnels (Figure 1). Structures subject to ASR slowly swell over the years, and progressively develop cracks due to internal stresses. The service life of those structures is reduced, and it is thus critical, for safety and economical reasons, to be able to predict the evolution of these structures.

ASR is caused by the reaction between alkali ions from the cement pore solution, and amorphous silica contained in the aggregates. This reaction forms a gel inside the aggregates. Water molecules are adsorbed in the gel, which results in localized expansions and cracks, which then lead to a macroscopic expansion and damage.

This reaction is influenced by many parameters, like the temperature, the relative humidity, or the aggregate type. It is difficult to relate the experiments in the lab to real structures, because of size effects or internal stresses, induced by the self-weight of the structure or by live loads (for bridges).

Under uni-axial load, the expansion is reduced or even negated when the load level is high enough. However, this causes a transfer of the expansion to the lateral direction, as well as an increase of the number of cracks. The cracks also tend to orient themselves in the direction of the load. The way the expansion is transferred or how the internal damage is increased is still not well understood.

This study aims at understanding the relation between the imposed expansion, the internal damage, and the applied load. This relation will be explored with an experimental program and a numerical analysis.

**EXPERIMENTATIONS TRI-AXIALES TRI-AXIAL EXPERIMENTS**

To investigate the effect of multi-axial stress on the ASR, we need to be able to control the stress in different directions. Tri-axial cells used in soils and rocks mechanics allow such control (see Figure 2). A creep frame is used to maintain the vertical load, while the sample is immersed in pressurized water.

The pressurized water will present the same alkali concentration as the concrete pore solution in order to avoid the leaching of the ions, and to bring a constant amount of ions to the system. Furthermore the experience will be conducted at 38°C. This temperature accelerates the reaction without changing further the concrete microstructure. Even though, the reaction may take one year to reach its final stage.

The reaction will be continuously monitored via fiber-optic strain gauges directly cast in the concrete. The fiber-optic sensors and wires have to be resistant to temperature, to the high alkali concentration, and to the water pressure. Furthermore, extracting the wires from the cell is a real technical challenge.

Reactive and non-reactive samples will be placed in various stress states. The non-reactive samples will allow us to extract the elastic and visco-elastic deformations from the total deformation. The internal damage will be evaluated at the end of the reaction. Reactive samples will also be cast to get the free expansion. Those samples can be more easily tested for the internal damage, either via mechanical testing or via SEM image analysis.

**ANALYSES NUMERIQUES NUMERICAL ANALYSIS**

For safety and economical reasons, we need to be able to predict the evolution of a structure subject to ASR. This prediction can only be achieved via the pro-

per simulation tools. A previous study has shown that the stress does not stop or slow down the chemical reaction in itself. This, added to the fact that the expansion is related to the advancement of the reaction as measured by SEM image analysis, supports the hypothesis that the expansion and the internal damage are a consequence of the amount of gel formed, regardless of the conditions in which it has been formed.

On a modeling perspective, this hypothesis allows us to separate the process by which the gel is formed, and the mechanical effects of the reaction. This way, we can limit ourselves in a first approximation to the prediction of the expansion and the internal damage as a function of the advancement and the reaction.

The expansion and the damage is controlled by the concrete microstructure. Extended Finite Element Method (XFEM) is used to describe concrete at the mesoscopic level (aggregates in cement paste). These simulations use the XFEM framework AMIE, previously developed at the LMC to study the mechanical effects of ASR.

AMIE can be used to study various hypothesis. For example, we can show the difference between high reactive aggregates, which react at the surface, and slow-reacting aggregates, which react in small pockets found in the aggregates, and which are more common in real structures (Figure 3).

Because of the large size difference between the aggregates and the pocket zones, it would be too expensive to mesh explicitly the gel zones. By using XFEM, we can describe these zones without meshing them. This way, we also avoid the cost of remeshing the zones when they grow.

This model can capture the free expansion of mortar, as well as some effects like size effects. However, the model can not catch yet the concrete behaviour, because of the large width of the aggregate particle size distribution.

In order to estimate the concrete behaviour, a two-step strategy will be developed:

1. **Crack propagation in the aggregate.** Aggregates are simulated independently from one each others. In this configuration, the gel zones are described using XFEM, and the damage in the aggregate is exactly taken into account. From these simulations we extract an homogenized behaviour of the aggregate as a function of aggregate size, aggregate shape, and number of zones.
2. **Crack propagation in the cement paste.** The concrete is simulated at the mesoscopic level using cement paste and the homogenized aggregates as previously characterized. This procedure allows to save the extra cost of the small pockets. At this step, we may need to artificially initiate cracks at the boundary of the aggregate to represent the crack propagation from the aggregate to the cement paste.

**PERSPECTIVES PERSPECTIVES**

This study will bring insights on how the expansion and the internal damage induced by the ASR are related to the applied load. Experimental evidences will be used to calibrate and validate a macroscopic law for concrete affected by ASR under various loads.



Figure 1: dam affected by ASR (Isee, Switzerland)



Figure 2: tri-axial cell

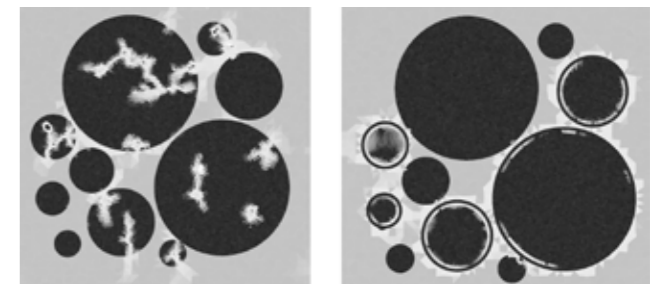


Figure 3: low reactive aggregates (left) vs high reactive aggregates (right)

**CARACTERISATION DES MICROSTRUCTURES :  
METHODES DE MESURE DE LA POROSITE  
MICROSTRUCTURE CHARACTERISATION :  
POROSITY MEASUREMENT METHODS**

**AUTEUR AUTHOR**

Arnaud Muller



- 2008-2009 Master in Science and Engineering (MSc) Research topic: calcium aluminate cements (conversion and strength) Laval University, Québec (Canada)
- 2006-2008 Master 1 and 2 IUP Génie civil et infrastructures Joseph Fourier University, Grenoble (France)
- 2005-2006 Licence 3 (Bachelor's Degree) IUP Génie civil et infrastructures Joseph Fourier University, Grenoble (France)
- 2003-2005 University Degree in Technology Department Civil Engineering Robert Schuman University, Strasbourg (France)
- 2002-2003 Scientific Baccalauréat (Advanced Level), option Physics and Chemistry Lycée Blaise Pascal, Colmar (France)

**MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS**

POROSITY

CHARACTERISATION

WATER

DRYING

**CONTEXTE CONTEXT**

Concrete is the most widely used construction material in the world. This big interest is linked to its price, its mechanical performances and its in situ casting possibilities (in any geometry).

Concrete works are generally designed and used for 100 years but a fraction of them require maintenance or reconstruction far before predicted servicing. Damages observed are often due to the penetration of an external agent into the concrete, which modify the initial material state either by chemical or volumetric changes. The ability of the material to withstand these phenomena is called durability.

The penetration of an aggressive element into concrete is conditioned by its accessible porosity, closely associating durability and pore network. Since the beginning of the 21st century, much research was focused on characterisation of the porosity of cementitious materials for which many techniques have been developed. We have gained much knowledge and we currently have a good understanding of the different types of porosity and its development.

In the literature, three types of porosity are considered. Gel pores (few nanometres wide, figure 1) are mostly the intrinsic porosity of the C-S-H hydrates, capillary pores (few micrometres) are the remaining spaces, which aren't cement grains or hydrate products, and finally compaction/air voids (few millimetres).

Porosity and more particularly capillary pores are influenced by the amount of water in the fresh mix. Powers was one of the first who described this phenomenon (figure 2).

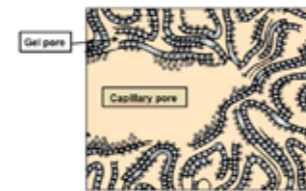


Figure 1: Gel pore and Capillary pore (Powers, 1958)

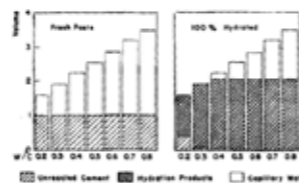


Figure 2: Porosity evolution with the amount of water (Powers, 1958)

Porosity can be expressed in many ways. The first basic value is the relative pore volume (in %), which represent the volume fraction of non-solid elements (figure 3.a). Combined with pore size distribution (figure 3.b), it gives good information on the porosity of the material.

However, some concepts linked to the transport properties of the materials also need to be considered.

The connectivity is probably one of the most important; a non-connected pore network does not carry ionic species as well as a connected one, even if the pore volume is higher. Connectivity may be represented as on figure 3.c. In the same way, tortuosity is defined by the shortest path an element has to take to cross the material relative to its thickness (figure 3.d).

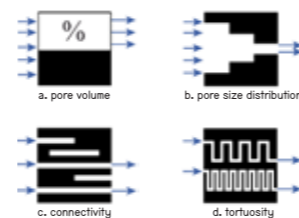


Figure 3: Representation of the main measurable characteristics of porosity (from F. Lory)(Powers, 1958)

All these characteristic values can be measured by different techniques, which have their advantages, disadvantages, artefacts and degree of precision. The most used are Scanning Electron Microscopy (SEM), water or gas sorption and Mercury Intrusion Porosity (MIP).

As these techniques all require dried samples, the drying step can seriously affect the porosity of the material. First, when liquid water progressively goes out of the pores, the meniscus generates stresses on the surrounding solid (figure 4) and the phase morphologies can change. Then, when remaining water molecules adsorbed on the solid surface leave it, a drying shrinkage occurs, creating damage. And finally, when the drying is almost completed, water exits the C-S-H hydrates and this finer morphology collapses.

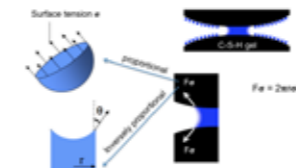


Figure 4: Meniscus stresses on the solid surface

**OBJECTIF ET METHODOLOGIE OBJECTIVE AND METHODOLOGY**

The first objective of my thesis is to compare the pore networks across a wide range of cementitious materials (figure 5) and create a first database, which will act as a basis for comparison for the following steps of the thesis. The current trend in concrete about CO<sub>2</sub> emissions reduction is to substitute a part of the cement by supplementary cementitious materials (SCMs). Hydration might be completely modified as well as the pore network. The different Transcend mixes go in this direction and move away from the C-S-H system, orienting observations around the capillary pores. This first database done with classic porosity measurement methods (figure 5.a) will also be shared in the Transcend student network for the modelling projects.

As explained before, drying has a huge impact on porosity and after this step we don't know how far are results from reality. Recently, a new technique has been developed, which allow to observe water in pores. This method uses the water molecular relaxation time to determine the pore size in which it stays. Avoiding the impact of drying, the Nuclear Magnetic Resonance (NMR) has a huge potential. The "Resin exchange" method also seems to be less damaging for a SEM analysis.

So the second objective of my thesis is therefore to compare traditional porosity measurement methods with "less damaging" techniques like NMR or "Resin exchange" (figure 5.b).

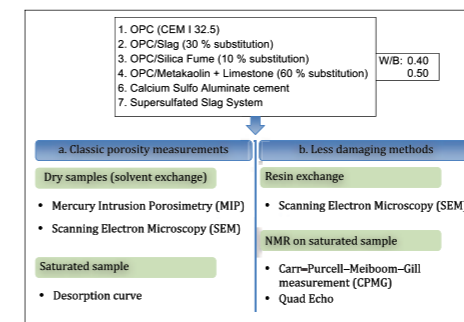


Figure 5: Thesis plan

**RESULTATS ATTENDUS EXPECTED RESULTS**

A better understanding of effects of SCMs on porosity is expected. In the same way, I expect a difference between classical and less damaging porosity measurements and aim to define a better protocol to measure porosity in cementitious materials.

**References**

Kalliopi K. Aligizaki (2006) - Pore structure of cement-based materials (Testing, interpretation and requirements)  
 Jennings (2010) - Effect of drying on early age morphology of CSH as observed in SEM  
 Kropa & Trettin (2006) - The influence of different drying methods on cement paste microstructures as reflected by gaz adsorption  
 Gallé (2001) - Effect of drying on cement-based materials pores structure as identified by MIP

# EFFET D'AJOUTS DE SUBSTITUTION SUR L'HYDRATATION DES SYSTEMES TERNAIRES CIMENTAIRES

## EFFECT OF FILLER ADDITIONS ON HYDRATION OF TERNARY BINDER SYSTEMS

### AUTEUR AUTHOR

Cedric Patapy



2010 Scientific collaborator (EPFL-Lausanne)  
 2010 PhD in Ceramic materials and surface treatments (University of Limoges-France)  
 2007 Engineer ENSCI (Limoges-France)

### MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS

TERNARY BINDERS  
 HYDRATION  
 KINETICS  
 RAPID SETTING TIME

### OBJECTIFS OBJECTIVES

Ternary binder systems (Portland Cement (PC) - Calcium Aluminate Cement (CAC) - Calcium sulfate), appear to be one of the most complex cementitious system due to the high interactions between components during hydration reactions (1). Depending on the content of cement (PC and CAC) and admixtures, they can be applied either for self leveling or wall repairs, thanks to high workability after contact with water and rapid setting time and hardening properties in less than one hour.

Few studies have been performed to understand accurately the effect of the different binder components and admixtures on mechanisms of hydration and associated final properties (like mechanical strength). Besides, one interesting approach to reduce the cost and the environmental impact of CO<sub>2</sub> emissions is to decrease the content of PC in binder formulations. Different "fillers" such quartz (silica) or limestone (CaCO<sub>3</sub>) can be used to replace this Portland Cement. This project aims to determine the influence of PC replacement on mechanisms of hydration.

Glossary: C = CaO / A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / S = SiO<sub>2</sub> / F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / H = H<sub>2</sub>O / \$ = SO<sub>3</sub>

### ASPECTS EXPERIMENTAUX EXPERIMENTAL ASPECTS

Two different industrial formulations have been used in this project. If we focus on binder composition, the first one is CAC dominated whereas the second one contains more PC. Different admixtures are added to the system like water reducing agents, viscoplasticizer or defoamer.

Kinetics of hydration are recorded using calorimetry technique (heat generated by the formation of hydrates). It allows to follow the effect of PC replacement on the extent of the reaction. Products of hydration can be examined by X-Ray Diffraction (on fresh paste or freeze drying samples depending on the age of hydration) and SEM examination in BSE-mode, completed with EDX analysis.

### RESULTATS RESULTS

#### 1. Microstructure

Both types of ternary binders (CAC or PPC dominated systems), present a typical "ettringite" microstructure when hydrated (figure 1). Anhydrite grains of OPC and CAC are surrounded by different type of hydrates and porosity. Artificial microcracks appear around ettringite due to the drying process before sample observations.



Figure 1: Formation of "ettringite" type microstructure after 1 day of hydration.

EDX analysis of hydrates shows the presence of Ettringite (C<sub>7</sub>A<sub>3</sub>C<sub>3</sub>H<sub>32</sub>) intermixed with AH<sub>3</sub> and monosulfoaluminate (figure 2).

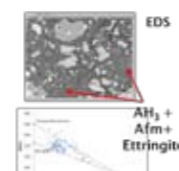
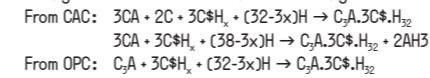
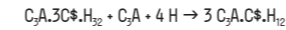


Figure 2: EDX analysis exhibiting the presence of monosulfoaluminate, ettringite and AH<sub>3</sub> hydrates.

Ettringite is formed from CAC and PC following the reactions:



Monosulfoaluminate can be formed from the conversion of ettringite in presence of aluminate phase. For example in PC hydration:



These systems present a rapid setting and hardening time (typically below one hour) due to the quick formation of ettringite and then densification of the material. EDX observations using Scanning electron Microscopy show the appearance of the C<sub>3</sub>A<sub>2</sub>C<sub>3</sub>H<sub>12</sub> phase intermixed with AH<sub>3</sub>.

EDX probe analysis in hydrates zone confirms the presence of Monosulfoaluminate intermixed with ettringite.

#### 2. Effect of PC replacement by fillers

Two different types of fillers have been selected for their inertness and their low cost: quartz (SiO<sub>2</sub>) and limestone (CaCO<sub>3</sub>). Particle size distributions have been chosen to correspond approximately to the one of cement grains. Effect of replacement on the process of hydration has been tested on both PC and CAC dominated mixtures.

#### 2.1. CAC dominated systems

Systems with and without PC replacement present relatively similar curves of heat evolution. Both quartz and CaCO<sub>3</sub> replaced systems exhibit a larger extent of reaction (cf. width of the peak of hydration), which is typically consequence of the so-called "filler" effect. This is due to extra space availability (less cement for the same volume of binder) and new sites of heterogeneous nucleation provided by filler grains.

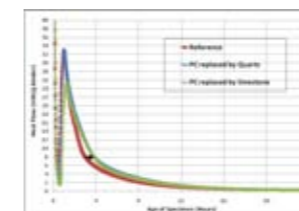


Figure 3: Influence of PC substitution by fillers in CAC dominated systems after 1 day of hydration.

Thermodynamic calculations have been performed using GEMS software to determine the impact of quartz and limestone additions the type and content of hydrates formed (2). Ettringite, monosulfoaluminate, AH<sub>3</sub> (and potentially CSH) are the main hydrates in the reference composition, similar to the situation observed when OPC is replaced by quartz. When OPC → limestone, monosulfoaluminate is progressively replaced by monocarboaluminate or ettringite.

Compared to quartz, the addition of limestone increases the total volume of hydrates but unreacted CaCO<sub>3</sub> persists in the system. When increasing the replacement content, more ettringite is formed due to the release of SO<sub>4</sub> from the monosulfate. To have full calcite consumption, the optimum is at 30% of replacement.

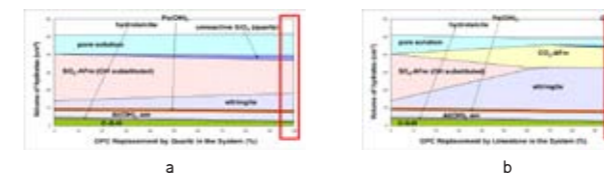


Figure 4: Influence of the replacement of PC by quartz (a) or limestone (b) on the content of the different unreacted and formed components (Thermodynamic calculations using GEMS)

PC replacement in CAC dominated systems appears as a promising approach to obtain same kinetics of hydrate formation. Moreover, the presence of calcium carbonate leads to the formation of monocarboaluminate, which can be appreciable for mechanical properties. More investigations are needed to study the influence of such replacement for properties in service (strength, permeability,...).

#### 2.2. PC dominated systems

In the same way as the previous system, heat evolution curves have been obtained for PC dominated systems using quartz or limestone fillers. The main peak of hydration occurs early for reference mixture (less than one hour) compared to systems where OPC is replaced. Then, it can be deduced that systems where OPC is completely replaced by such fillers will present longer setting time compared to the reference system, which is not acceptable for rapid setting applications.

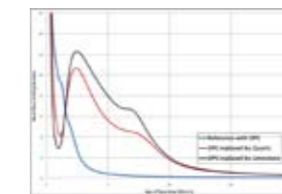


Figure 5: Delayed hydrates formation when PC is replaced by fillers.

Different solutions have been tested to accelerate the kinetics of hydration. A first approach was investigate the effect of alkali elements (present in OPC) on the kinetics. Two different treatments (NaOH & KOH) have been tested on filler compositions, using saturation concentration. Even if, acceleration of the reaction can be observed, the kinetics is still inferior to the reference composition.

Finally, two different approaches were preferred:

- > The use of lithium salts as an accelerator. This compound is quite expensive, but the low dosage (0.12%) could be the solution of the kinetics problem. In fact, very similar heat curves are obtained, when added. If we look at porosity distribution, the mixture containing lithium salts exhibit coarser pores and higher cumulative porosity than the reference mixture. This could lead to lower mechanical properties

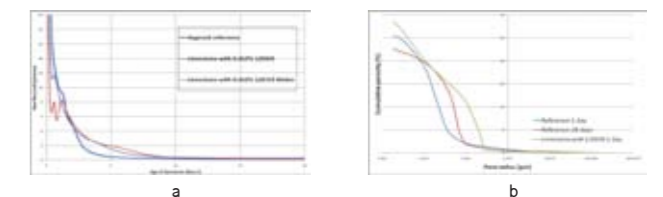


Figure 6: Influence of lithium salts on kinetics and porosity of mixtures using fillers.

- > The partial replacement of OPC. Even a low replacement level (25%) induces a delay in the occurrence of hydration which is not satisfying.

### CONCLUSION CONCLUSION

First investigations to replace PC by fillers are very promising. CAC dominated systems with a complete substitution of PC present very similar properties in hydration occurrence. The potential formation of new hydrates like monocarboaluminate when adding limestone must be taken into account for final properties. Hydration is dramatically delayed in PC dominated systems. The use of lithium salts appear as a good solution to obtain similar kinetics than original systems. The study focuses on kinetics of hydration and microstructure development. More investigations are needed to evaluate the impact of such replacement on used properties like setting time, mechanical properties or shrinkage evolution during hydration.

**HYDRATATION DU SYSTEME C<sub>3</sub>A – SULFATE DE CALCIUM SEUL  
ET EN PRESENCE DE SILICATE DE CALCIUM**  
**HYDRATION OF C<sub>3</sub>A WITH CALCIUM SULFATE ALONE  
AND IN THE PRESENCE OF CALCIUM SILICATE**

**AUTEUR AUTHOR**

Alexandra Quennoz



2007-2011 PhD in Material Science and Engineering, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland.  
2005-2007 MSc in Material Science and Engineering, specialization in Structures, Energy and Transports, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland  
2002-2005 BSc in Material Science and Engineering, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland

**MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS**

CEMENT EARLY HYDRATION

C<sub>3</sub>A

GYPSUM

MODEL CEMENTS

HYDRATION KINETICS

MICROSTRUCTURE

**EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM**



EPFL-STI-IMX

Prof. Karen Scrivener



Financial support from the Swiss National Science Foundation

**OBJECTIFS OBJECTIVES**

Cement is mainly composed of calcium silicate, calcium aluminate and calcium sulfate phases. When mixed with water all these phases react to form products that lead to the setting of the cement paste. Understanding the chemical reactions that cause this material to harden is of interest for both academia and industry.

From an industrial standpoint, there is a growing wish for the development of more sustainable materials. Indeed, concrete is by far the most used material in the world and due to the huge volumes, cement production accounts for some 5 to 8% of manmade CO<sub>2</sub>. Concrete is a complex material, currently relying on largely empirical knowledge for use. More complete understanding of the basic mechanisms of hydration is therefore needed to provide a rational basis for the development of mix design as well as the selection of mineral additions

From an academic point of view the complexity of the hydration reactions of the cement phases offers interesting challenges in experimental and modeling methods. One of the main centers of interest is the development of a model that can predict properties from the microstructure.

Alite hydration has been intensively studied in the past. Even though alite does not completely represent the hydration of Portland cement, it has often been studied in a first approach to simplify the investigations of cement hydration as it is the major compound of cement and dominates the early hydration. The role of the aluminate and sulfate phases on cement hydration now need to be further understood. Although C<sub>3</sub>A represent less than 10% of the Portland cement it can have a significant role in the early hydration. C<sub>3</sub>A is a highly reactive material that can influence the rheology and the setting time of cement. In order to regulate its reaction calcium sulfate is added. The understanding of the C<sub>3</sub>A-gypsum reaction is therefore crucial for the comprehension of the early hydration of cement.

The aim of this thesis is to generate basic knowledge on the tricalcium aluminate (C<sub>3</sub>A) - calcium sulfate reaction and study its interactions with alite when hydration occurs in multi-phase systems

**METHODOLOGIE METHODOLOGY**

In this work, pure clinker phases were synthesized at high temperature. Model systems of different compositions were prepared and their hydration studied in terms of kinetics, phase assemblage and microstructural development. The simple system C<sub>3</sub>A-gypsum with different gypsum addition was studied first. In a second step, alite was added to the systems and the effect of the interactions that occurs between the cement phases during the hydration were investigated.

The data generated by this thesis were also used for the development and the validation of the model mic as developed in the work of A. Kumar (EPFL, LMC).

**RESULTATS RESULTS**

This work confirmed the findings of previous studies on the mechanism that controls C<sub>3</sub>A-gypsum hydration during the first stage of the reaction when sulfate ions are present in solution. The role of the specific surface area of C<sub>3</sub>A as well as the high activation energies calculated for the C<sub>3</sub>A-gypsum systems show that the C<sub>3</sub>A dissolution is controlling the hydration rate during the first stage of the reaction.

The new contribution of this work is mainly in the second stage of the reaction, after the depletion of gypsum. The results obtained by in-situ XRD showed that the dissolution of C<sub>3</sub>A and ettringite to form monosulfoaluminate is a rapid reaction that takes place right after gypsum consumption (Figure 1). This reaction is characterized by a sharp exothermic peak on the heat evolution profile.

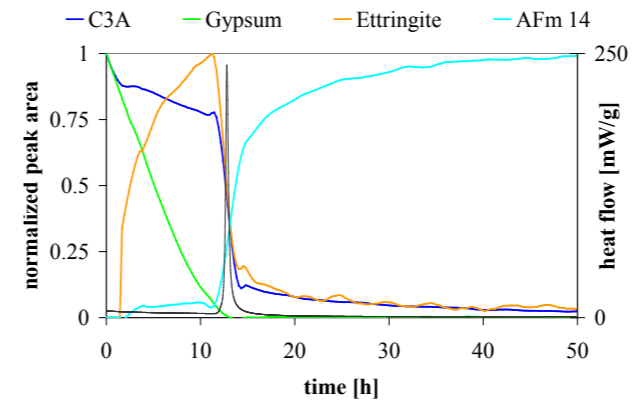


Figure 1: Evolution of the phase assemblage and calorimetric curve for a C<sub>3</sub>A-gypsum system

acterized by a sharp exothermic peak on the heat evolution profile. The acceleration of the reaction rate during this period was shown to be highly influenced by the specific surface area of the reacting C<sub>3</sub>A particles. The activation energy calculated for the second stage of the reaction confirmed that the reaction is surface controlled. The deceleration period was shown to be controlled by a space filling effect due to impingement of the AFm platelets.

The microstructural study of C<sub>3</sub>A-gypsum systems showed that the AFm phase that form after gypsum depletion precipitate as platelets in the space between the grains, but also as a dense hydrate that grows within the C<sub>3</sub>A grain boundaries. The presence of this hydrate, which composition is close to the one of the AFm platelets that forms in the matrix, becomes less obvious at later ages. An in-situ recrystallization or a conversion into matrix hydrate or hydrogarnet can be hypothesized. Hydrogarnet was also observed at later ages in some systems. This phase precipitated at the original grain boundaries as a rim around hydrating C<sub>3</sub>A grains (Figure 2).

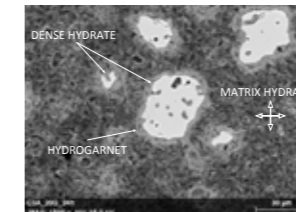


Figure 2: Microstructure of a C<sub>3</sub>A-gypsum paste after 1 day of hydration

When C<sub>3</sub>A-gypsum hydration occurs in the presence of alite, some of the features observed in plain C<sub>3</sub>A-gypsum system are subject to change. First of all, the heat evolution profile is significantly modified as three exothermic peaks that can be attributed to the aluminate reaction

could be observed instead of one in C<sub>3</sub>A-gypsum systems (Figure 3). Peak A1 (in Figure 3) can be attributed to a second formation of ettringite. The in-situ XRD measurements showed that the dissolution of C<sub>3</sub>A and ettringite after the depletion of gypsum occurs at slower rate compare to the C<sub>3</sub>A-gypsum systems. Moreover these dissolutions do not occur simulta-

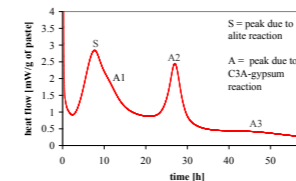


Figure 3: Heat evolution profile of a model cement composed of alite-C<sub>3</sub>A-gypsum

neously. This work clearly shows that while C<sub>3</sub>A starts to dissolve right after the depletion of gypsum, ettringite continues to form during a few hours. This second formation of ettringite is due to the reaction of C<sub>3</sub>A with the sulfate ions that were adsorbed on C-S-H. The analysis of the chemical composition of C-S-H at different ages showed that some of the sulfate ions adsorbed on C-S-H at early ages can be released to form more ettringite after the depletion of gypsum. Peak A2 is the main aluminate peak that can be compared to the peak observed in plain C<sub>3</sub>A-gypsum systems. The third exothermic peak was attributed to a second formation of monosulfoaluminate due to space constrain as this peak is sensitive to changes in w/c ratio.

The activation energies calculated for ettringite formation in the alite-C<sub>3</sub>A-gypsum systems show that the reaction is surface controlled as in C<sub>3</sub>A-gypsum systems. The fundamental mechanisms of the reaction are therefore not modified in the presence of alite.

Although alite is the major phase, its hydration kinetics is also modified when hydration occurs in the presence of C<sub>3</sub>A-gypsum (Figure 4). Depending on the undersulfated or properly sulfated nature of the systems different effects were observed (systems where the aluminate reaction occurs before the silicate one are called undersulfated). Whereas the alite is slowed down in the case of undersulfated systems, the reaction rate in the acceleration period is higher for properly sulfated systems. This modification of the growth of C-S-H may be explained by the adsorption of sulfate ions on C-S-H when hydration occurs in the presence of calcium sulfate.

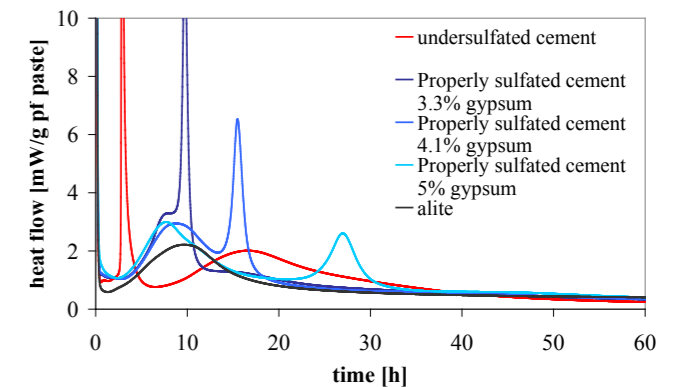


Figure 4: Heat evolution curves of different model cement compared to alite

**CONCLUSIONS CONCLUSIONS**

This work provided new insights on C<sub>3</sub>A-gypsum hydration, especially on the microstructural development and mechanisms that control the hydration rate during the second stage of the reaction, after the depletion of gypsum.

It was also shown that the kinetics of C<sub>3</sub>A-gypsum hydration is significantly modified in the presence of alite mainly due to the adsorption of sulfate ions on C-S-H and to the reduction of the space available for the reaction.

**CARACTERISATION CHIMIQUE ET MORPHOLOGIQUE DU C-A-S-H DANS LES CIMENTS CONTENANT DES ADDITIONS MINERALES**  
**CHEMICAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISATION OF C-A-S-H IN CEMENTS CONTAINING SCM'S**

**AUTEUR AUTHOR**

John Rossen



- 2010 (spring) Master thesis (EPFL-UCLV): Ternary cement blends based on metakaolin and limestone (LMC - Laboratory of Construction Materials)
  - Joint research with UCLV University in Santa Clara, Cuba
- 2008-2010 EPFL (STI), Master in Materials Science and Engineering
  - Orientation: Structural materials for use in transport, energy and infrastructure
  - Specialization in Management of technology and entrepreneurship
- 2005-2008 EPFL, School of engineering (STI)
  - Bachelor in Materials Science and Engineering
- 2001-2005 Maturité fédérale, with merit, Collège Calvin in Geneva
  - Specialisation in Physics and applied mathematics (SD) and Chemistry (CD)

**MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS**

C-S-H

SUBSTITUTION

MODELLING

THERMODYNAMICS

**EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM**

Joint research between:

- > LMC (Laboratory of Construction Materials, Lausanne)
- > EMPA (Swiss Federal Laboratories for Mat. Science and Technology, Dübendorf)
- > ICB (Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, Dijon, France)
- > PSI (Paul Scherrer Institute, Villigen)

Supervisors:

- > Prof. Karen Scrivener (Thesis director)
- > Dr. Barbara Lothenbach (Thesis co-director)

Partners:

- > Prof. André Nonat and Christophe Labbez (ICB)
- > Dr. Barbara Lothenbach and Emilie L'Hôpital (Empa)
- > Dr. Dmitrii A. Kulik
- > Dr. Sergey Churakov
- > Dr. Luis Pegado (PSI)



**CONTEXTE CONTEXT**

In efforts to reduce the environmental impact associated to the production of Ordinary Portland Cement (OPC), the industry seeks to replace some of the raw clinker with limestone or other reactive additives which are often by-products of other heavy industries. Commonly used SCMs (Supplementary Cementitious Materials) include slags, calcined clays like metakaolin, silica fume, fly ash and natural pozzolana. However, blending greatly alters the mechanisms of formation, the amount and the composition of the cement hydrates, particularly that for calcium silicate hydrates (C-S-H in cement notation). As C-S-H may even incorporate amounts of aluminium in such systems (Figure 1), we therefore use the general C-A-S-H notation.

C-A-S-H is the most present hydrate in cement and determines most of the properties of the final concrete material because it conditions how space is filled during the formation of the porous structure which holds concrete together. Being able to understand its composition and morphology is therefore crucial to predict its mechanical performance and durability.

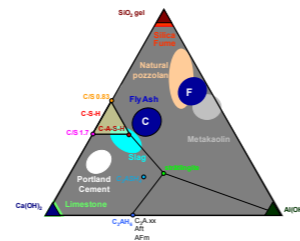


Figure 1: Basic phases in cementitious systems and composition of Supplementary Cementitious Materials (SCM's).

**C-A-S-H C-A-S-H**

We know that the composition and structure of C-A-S-H is determined by the Ca/Si, the Al/Si ratio, but also the alkalinity of the system (N<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> activities), the presence of anions (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, OH<sup>-</sup>) and temperature. Pardal et al. (2009) have shown that C-A-S-H from blended systems often has a nanocrystalline structure which resembles tobermorite. Recent studies have also shown that when environmental conditions are known (concentrations or activities of the different components and temperature) it is possible to predict the formation not only of C-A-S-H but of all the phases present in cement as a function of concentration of elements, time or temperature for example. An example of such thermodynamic modelling is given in Figure 2 using GEMS (Gibbs Energy Minimization Selector Software developed at PSI) on an OPC blend containing a variable amount of slag (Lothenbach et al., 2011). Although such modelling has proven to be powerful, it still lacks some integration of some mechanisms taking place in blended systems. Also, we need a comprehensive database to calibrate the model according to the reality of hydrated cement blends.

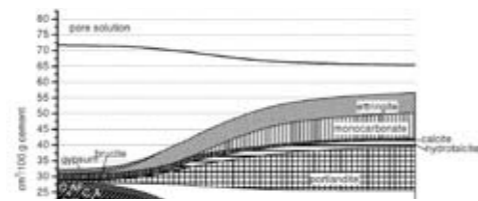


Figure 2: Modelled changes in hydrated Portland cement upon blending with blast furnace slag, assuming complete reaction of the Portland cement. Volume expressed as cm<sup>3</sup>/100g unhydrated cement. From Lothenbach et al. (2011).

**METHODOLOGIE METHODOLOGY**

To develop a comprehensive model several groups are collaborating to bring different sets of expertise into the project as shown in Figure 3. Thermodynamic (geochemical) modelling is required for determination of the stable phases and amount of porosity of the system, while molecular simulations to provide an understanding of the morphology of C-A-S-H and incorporation of aluminium.

Creating a quality database requires the simultaneous study of three different kinds of samples which make the link between ideal solutions and reality. First there are synthesised C-A-S-H produced in diluted conditions. Then there are pure phase samples which are made from the main components of cement taken separately and blended together to resemble a real cement blend without suffering from its inherent impurities. Finally there are reference systems, i.e. OPC blended with SCMs. The sub-project at EPFL will focus on the latter.

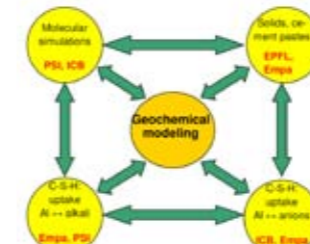


Figure 3: Development of a geochemical C-A-S-H model within the Sinergia project.

As we are interested in equilibrium phase composition, the idea is to produce long term samples with variable compositions to cover a wide range in the ternary diagram (Figure 1) and alkali and anion concentrations. They will hydrate for approximately several years at different constant temperatures. Hydration is then stopped for observation with various experimental techniques. The objective is to obtain information on the chemical composition of the phases, i.e. what and how much has formed, and also the morphology of the C-A-S-H (in terms of porosity as well).

Quantitative measurements of the different phases which form are provided by X-Ray Diffraction with Rietveld analysis (XRD-Rietveld) and Thermogravimetric Analysis (TGA) measurements. Scanning Electron Microscopy (SEM) allows us to study a polished section of an anhydrous or dried hydrated sample. Coupled with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS) it is possible not only to acquire an image of chemical contrast but also to determine the precise chemical composition of the different phases. When deemed necessary, it will be possible to analyse the very position of silicon and aluminium atoms in the structure of C-A-S-H using Magic Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance (MAS-NMR) measurements on solid hydrated samples. Also, Transmission Electron Microscopy coupled with EDS (TEM-EDS) gives us the opportunity to determine the shape of C-A-S-H which is not apparent in SEM. Porosity of C-A-S-H will be studied using proton NMR on hydrating samples.

**RESULTATS ATTENDUS EXPECTED RESULTS**

Dr. Vanessa Kocaba recently showed (Figure 4) that in slag blends, the Ca/(Si+Al) ratio in outer C-S-H decreases significantly for slag blends, from 2.0 to 1.5, thus showing the influence of blending on the formation of the hydrate. Now hydrated for several years, selected samples from this project will be studied to assess the evolution of the system, and provide some first experimental data for the project. We expect a stabilisation or slight decrease in the Ca/(Si+Al) ratio.

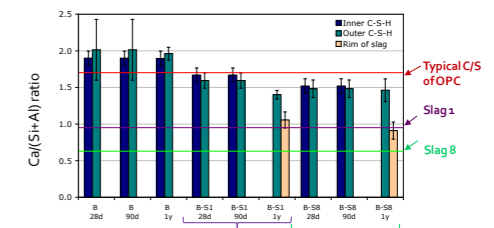


Figure 4: Ca/(Si+Al) Outer C-S-H is shown for OPC (B) and two blends with a slag 1 and slag 8, at 28, 90 days and 1 year. From Vanessa Kocaba.

Recent studies like those made by Richardson and colleagues have shown by TEM that the morphology of C-S-H varies according to its location within a cement paste. When it forms in an original alite grain it has a fine and dense homogeneous morphology, as seen in the Inner Product (Ip C-S-H) in Figure 5. When it forms outside the grain, the Outer Product (Op C-S-H) has a more fibrillar morphology. While this example is for a blend of OPC with 30% fly ash, the nature of the blend may also influence the stable morphology of C-S-H which may exhibit a more foil-like morphology in certain systems. We expect to show variations in morphology on selected systems and link this to aluminium uptake, silica and alkali concentration.

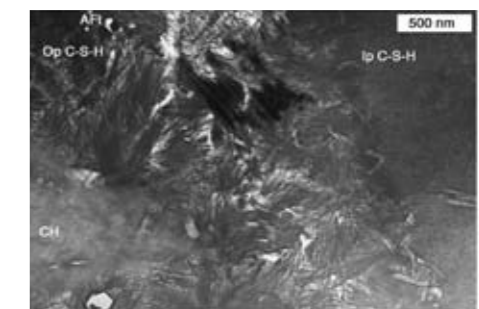


Figure 4: Ca/(Si+Al) Outer C-S-H is shown for OPC (B) and two blends with a slag 1 and slag 8, at 28, 90 days and 1 year. From Vanessa Kocaba.

**PERSPECTIVES PERSPECTIVES**

If the project is successful, the model will be powerful and accurate enough to describe most blended systems. Also, knowledge exchange will also be possible with ongoing projects in other Universities and push further our understanding of these novel cementitious systems.

**References**

Pardal, X., Pochard, I. & Nonat, A. *Experimental study of Si-Al substitution in calcium-silicate-hydrate (C-S-H) prepared under equilibrium conditions*. Cement and Concrete Research 39 (2009) 637-643

Richardson, I.G. *The calcium silicate hydrates*, Cement and Concrete Research 38 (2008) 137-158

Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., Scrivener, K. *Influence of limestone on the hydration of Portland cements*. Cem. and Conc. Research 38 (2008) 848-860

**EXPANSION ET MODIFICATIONS MICROSTRUCTURELLES  
DES MORTIERS SOUMIS A DES ATTAQUES AU SULFATE**  
*THE EXPANSION AND MICROSTRUCTURE CHANGES  
OF MORTARS IN SULFATE ATTACK TESTS*

**AUTEUR AUTHOR**

Cheng Yu



2009-      PhD in LMC, IMX, EPFL  
2007-2009    Master in Material Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, China  
2003-2007    Bachelor in Material Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, China

**OBJECTIF OBJECTIVE**

Sulfates present in groundwater or soils surrounding a concrete structure may pose a threat to its long-term durability. The interaction between cement hydration products and sulfate ions leads to the formation of a reaction front within the porous material. The formation of ettringite, gypsum and thaumasite (in some cases), causes expansion and structural softening.

Supplementary cementitious materials (SCMs), especially slags, which are widely used in field constructions, are usually treated as sulfate resistant. However, the deterioration mechanism of slag-blended cement subject to sulfate attack still remains unclear and needs further study.



This work intends to find out the relationship between expansion and microstructure changes of cementitious materials under sulfate attack. The effect of slag addition on sulfate resistance is also discussed.

**METHODOLOGIE METHODOLOGY**

1. A series of sulfate resistance tests was proposed. Mortar samples with different size, different proportions were exposed to various concentrations of sodium sulfate solution. The linear expansion was measured every other week, accompanied with the solution renewing.

2. The qualitative elemental mappings of sample at certain age were obtained by SEM, and a code for image analysis has been developed to extract quantitative profiles from the mappings.

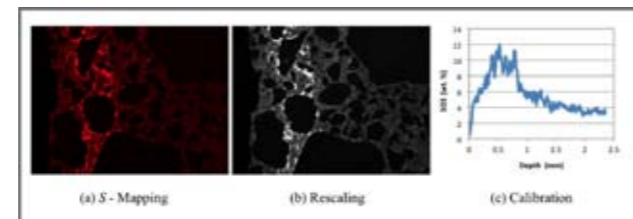


Figure 1: Method of S profile quantification from SEM-mappings

**MOTS-CLES BETON CONCRETE KEYWORDS**

SULFATE ATTACK

SLAG

SEM-MAPPING

INGRESS

**EQUIPE DE RECHERCHE RESEARCH TEAM**



Prof. Karen Scrivener

Links with other universities: College of Material Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, China

**RESULTATS RESULTS**

**1. Effect of size**

Prism with smaller size shows more expansion, as there is less core material to restrain the expansion of the surface regions. Nevertheless, the sulfate ingress profiles are almost identical for the different mortar sizes.

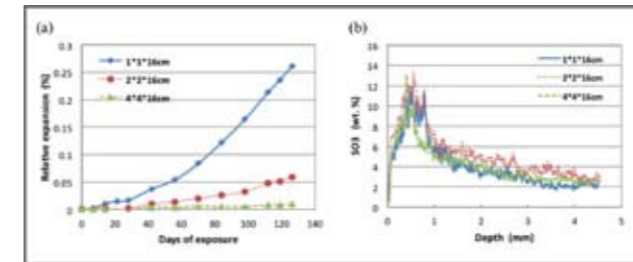


Figure 2: PC mortars with different size in 3g/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: (a) Linear expansion; (b) Sulfate profiles acquired by mapping methods after 120d exposure.

**2. Effect of concentration**

The solution concentration has no significant effect on the sulfate penetration depth. While, the high concentration of sulfate solution may increase the crystallisation pressure of the ettringite and so promote the onset of cracking earlier.

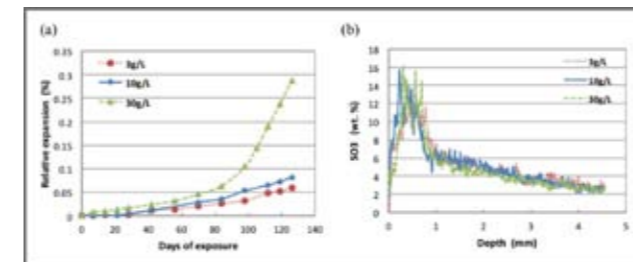


Figure 3: PC mortars (2\*2\*16cm) in 3g/L, 10g/L and 30g/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions: (a) Linear expansion; (b) Sulfate profiles acquired by mapping methods after 120d exposure.

**3. Effect of slag addition**

Compare to pure Portland cement, the slag blends reduce the amount of sulfate penetration, and the amount of expansion up to 120 days. There is reduced penetration in the 70% blend, despite a higher porosity compared to the 40%.

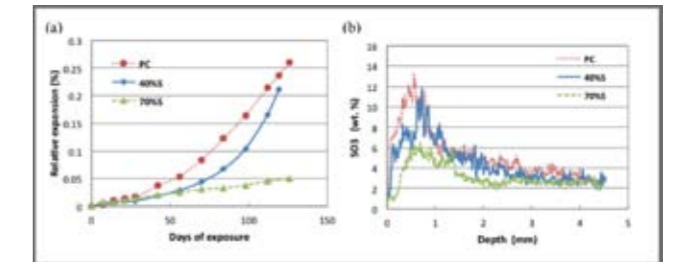


Figure 4: Mortars of PC, 40%Slag and 70%Slag (1\*1\*16cm) in 3g/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution: (a) Linear expansion; (b) Sulfate profiles acquired by mapping methods after 120d exposure.

**CONCLUSION CONCLUSION**

The sulfate ingress depth in PC mortars is not strongly related to the size of prisms or, surprisingly, to the concentration of the sulfate solution. Nevertheless, the linear expansion is strongly affected by both size and solution concentration. Higher solution concentration may affect the crystallisation pressure of the ettringite and so promote the onset of cracking earlier. It seems that the expansion is related to the mechanical properties of sample itself as well as the chemical or physical parameter applied in testing.

The slag blends show a positive influence on sulfate resistance up to 120d. The existing data also supports the idea that penetration of sulfate is more controlled by chemical reaction with the hydrates than by diffusion of sulfate through the pore structure. However, the test for long-term behaviors is still ongoing.

Colloque béton 2011, "Le béton, matière en devenir"

**ENAC**  
FACULTE ENVIRONNEMENT NATUREL,  
ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

**IBETON**  
LABORATOIRE DE  
CONSTRUCTION EN BETON

**LAURE**  
LABORATOIRE D'ARCHITECTURE URBAINE  
ET REFLEXION ENERGETIQUE

**LESO-PB**  
LABORATOIRE D'ENERGIE SOLAIRE  
ET DE PHYSIQUE DU BATIMENT

**LMC**  
LABORATOIRE DES MATERIAUX  
DE CONSTRUCTION

**STI**  
FACULTE DES SCIENCES ET  
TECHNIQUES DE L'INGENIEUR

**LTH**  
LABORATOIRE DE THEORIE  
ET D'HISTOIRE

**SSIE**  
SECTION SCIENCES ET INGENIERIE  
DE L'ENVIRONNEMENT

**IPTEH**  
INSTITUT DES POLITIQUES TERRITORIALES  
ET D'ENVIRONNEMENT HUMAIN

Elément SA 

 **PRELCO**

 **CREABETON**

 **ARCHIZOOM**

 **sia**  
INSTITUT FEDERAL DE RECHERCHE ET D'INNOVATION  
EN RECHERCHE EN RECHERCHE ET EN INNOVATION  
EN RECHERCHE EN RECHERCHE EN RECHERCHE  
EN RECHERCHE EN RECHERCHE EN RECHERCHE

Maquette : Emy Amstein, LAURE

Impression : mai 2011, Reprographie EPFL

