

ESTP

PARIS

L'ÉCOLE DES GRANDS PROJETS

INSTITUT DE RECHERCHE EN CONSTRUCTIBILITÉ

RAPPORT ANNUEL DE RECHERCHE

2016



L'éditorial

L'Institut de Recherche en Constructibilité est la marque d'une forte ambition de la part de l'ESTP Paris : le développement et le transfert des compétences à travers la formation afin d'accompagner les changements de la profession. Ce qui constitue un challenge pour l'ensemble des acteurs de ce laboratoire de recherche.

L'école se veut celle des futurs responsables de projet contributif de notre environnement construit. À ce titre, son originalité réside dans l'objet même qui est complexe, au carrefour de nombreuses disciplines, tant des sciences de l'ingénieur que des sciences humaines. C'est la raison du choix de la constructibilité dont l'objectif est de garantir la « bonne facture » des ouvrages sans se substituer aux différents savoirs. Sur le plan académique, cela signifie un champ transversal qu'il s'agit d'affirmer et de conforter.

Cette mise en perspective sous-entend une transformation des pratiques professionnelles qui doivent s'adapter pour être pérennes face aux différentes évolutions : transition énergétique, transition numérique, transition écologique et auxquelles il faut ajouter un besoin de solvabilité. Dans cette nouvelle chaîne de valeurs, l'important est de finaliser et d'aligner chacune des actions. La recherche entreprise à l'IRC doit y contribuer elle aussi et s'orienter vers des démarches dites de « recherche-action ».

Il s'agit donc d'un programme qui se doit d'être progressif, mais aussi déployé dans la durée. Ce fascicule en est une première étape et traduit la volonté de participer à cet effort collectif.



CHRISTOPHE GOBIN

Président du Conseil
de la recherche de l'ESTP Paris

“ L'école se veut celle des futurs responsables de projet contributif de notre environnement construit. C'est la raison du choix de la constructibilité dont l'objectif est de garantir la « bonne facture » des ouvrages sans se substituer aux différents savoirs. ”

Sommaire

9 **1** L'ÉCOSYSTÈME DE LA RECHERCHE DE L'ESTP PARIS

- 13 Les chiffres clés de la recherche sur la période 2015-2016
- 14 La thématique de Constructibilité
- 15 Les Chaires d'Enseignement et de Recherche
- 15 La Chaire Génie Civil Nucléaire (GCN)
- 16 La Chaire Ingénierie des Bétons (IdB)



17 **2** LES PROJETS DE RECHERCHE

19 **ÉCHELLE 1 : LA CONSTRUCTIBILITÉ DES ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION**

SOLS

- 21 Érosion interne des ouvrages hydrauliques et d'infrastructures
- 22 Traitement et valorisation des sols et sédiments pollués

MATÉRIAUX ROUTES ET CHAUSSÉES

- 23 Maîtrise de la mise en œuvre des matériaux bitumineux à la suite des abaissements de température
- 24 Problématiques liées au recyclage des enrobés bitumineux
- 25 Étude du mûrissement et du vieillissement des enrobés à l'émulsion de bitume

MATÉRIAUX CIMENTAIRES

- 26 Matériaux nanostructurés pour matériaux de construction innovants.
- 27 Valorisation des matériaux locaux biosourcés pour le génie civil
- 28 Hydratation du béton recyclé
- 29 Faisabilité de réutilisation des bétons de démolition de plus de 50 ans (IdB)
- 30 Écaillage des bétons avec sels de déverglaçage : influence des paramètres de formulation et de l'amplitude du cycle thermique (IdB)
- 31 Durabilité des bétons : conditions de stabilité des produits de carbonatation des matériaux cimentaires (IdB)
- 32 Performances rhéologique et mécanique des mélanges à basse teneur en clinker : substitution du clinker par des coproduits ou d'additions minérales (IdB)
- 33 Ouvrabilité des matériaux cimentaires : développement d'une approche globale de caractérisation (IdB)

THÈSES

- 34 Liste des thèses de doctorat en cours à l'échelle du matériau
- 34 Nouvelle thèse : « Optimisation d'une méthode de production de fines pouzzolaniques par Mécano-Alkali-Activation et de leur ouvrabilité dans les matériaux cimentaires »





35

ÉCHELLE 2 : LA CONSTRUCTIBILITÉ DES OUVRAGES

GÉNIE CIVIL ET NUCLÉAIRE

- 36 Dynamique transitoire
- 38 Analyse des structures sous séisme
- 40 Dispositions constructives

CONSTRUCTION DURABLE

- 42 Constructibilité et commissionnement des systèmes de ventilation : qualité du climat intérieur et efficacité de ventilation
- 43 Constructibilité et évaluation de la performance des nouveaux composants d'enveloppe du bâtiment

BIM

- 44 Comaintenance des tunnels en utilisant le BIM
- 45 Liste des thèses de doctorat en cours à l'échelle des ouvrages

THÈSES

- 45 Nouvelle thèse : « Méthode d'ingénierie pour l'étude du tassement et du risque de liquéfaction des digues sous séisme »
- 46 Nouvelle thèse : « Évaluation de la performance systémique d'un bâtiment en phase de programmation : constructibilité et intégration de volumes fonctionnels »

47

ÉCHELLE 3 : LA CONSTRUCTIBILITÉ DES SYSTÈMES

BIM

- 49 Modélisation 3D de l'expansion urbaine : application au modèle Sleuth
- 50 Fusion des modèles BIM sous format IFC

RISQUES

- 51 Management des risques projets et portefeuille de projets en construction
- 52 Gestion de chantiers de construction en prenant en compte les risques et les catastrophes naturels
- 54 Homogénéité des espaces urbains et évacuation de la foule en utilisant le BIM et le SIG

RÉSILIENCE

- 56 Modélisation et optimisation multicritères des projets d'aménagement face aux risques d'inondations urbaines
- 57 Études de faisabilité et dimensionnement d'ouvrages hydrauliques pour la gestion d'inondation : Approche Numérique et Expérimentale
- 58 Développement numérique de la méthode « Smoothed Particle Hydrodynamics » basée sur des Calculs Haute Performance : application à des problèmes multiphysiques en génie civil

THÈSES

- 59 Liste des thèses en cours
- 59 Nouvelle thèse : « Analyse systémique des facteurs de risques aux interfaces fonctionnelles du bâti : modélisation en termes de critères de constructibilité et de performances d'usage »



61 **3** LA VALORISATION DE LA RECHERCHE

- 63 Les événements de l'année organisés par l'IRC
- 64 Le séminaire de la Constructibilité
- 66 Les publications dans des journaux à comité de lecture
- 67 Les contributions à des conférences internationales

69 **4** LES STAGES DE RECHERCHE

- 71 Liste des stages Master de l'année 2015-2016
- 72 Liste des Projets Industriels d'Entrepreneuriat et de Recherche encadrés par l'IRC en 2015-2016





L'ÉCOSYSTÈME DE LA RECHERCHE DE L'ESTP PARIS

L'écosystème de la recherche de l'ESTP Paris

▶ **L'Institut de Recherche en Constructibilité (IRC) a été créé en 2009 par l'École Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie de Paris (ESTP Paris).** L'IRC est complètement intégré à l'ESTP Paris et s'inscrit dans son statut d'établissement d'enseignement supérieur privé d'intérêt général (EESPIG), reconnu par l'État depuis 1921, géré par une association sans but lucratif régie par la loi du 1^{er} juillet 1901. L'ESTP Paris est membre associé de la Communauté d'universités et d'établissements université Paris-Est (Comue UPE).

▶ **L'IRC, centre de recherche et de compétences du domaine de la construction, déploie deux missions principales** avec l'objectif de devenir un centre d'excellence en recherche et en enseignement pour la constructibilité :

- ▶ le développement de connaissances dans les domaines du bâtiment et des travaux publics ;
- ▶ l'initiation et la formation à la recherche par la recherche dans ces mêmes domaines.

▶ **L'IRC a été évalué en 2014 par le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (HCERES), validant son statut d'unité de recherche liée à un établissement d'enseignement supérieur dans les domaines de la construction.** En 2015, l'IRC devient équipe d'accueil de l'école doctorale

Sciences, ingénierie et environnement (SIE) de l'université Paris-Est qui regroupe des recherches à caractère fondamental et appliqué, théorique, numérique ou expérimental, avec comme principal objectif de répondre à des enjeux sociétaux majeurs tels que : l'énergie, notamment renouvelable, les nouveaux matériaux, les structures innovantes, les questions liées à la qualité de l'environnement. L'IRC est en conséquence intégré à un réseau de 17 entités de recherche, regroupant 600 chercheurs et près de 300 doctorants.

▶ **L'IRC se compose d'une cinquantaine de collaborateurs :** 20 enseignants-chercheurs, 3 enseignants-chercheurs HDR, et du personnel technique et administratif. Le laboratoire accueille une vingtaine de doctorants et environ 35 stagiaires de master ou TFE recherche, et il encadre une trentaine de projets d'innovation d'entrepreneuriat et de recherche par an.

▶ **L'IRC présente l'avantage de regrouper des Enseignants-Chercheurs issus des nombreux domaines de la construction :** matériaux, génie civil et structures, génie mécanique, génie hydraulique, génie thermique, maquette numérique, SIG, management des risques. Afin de mettre à profit ces connaissances



multidisciplinaires internes, des sujets de recherche transverses sont favorisés et un fonctionnement en mode projet est utilisé. Ainsi sont mises en œuvre des études croisées touchant par exemple les réseaux de la voirie des villes et la maintenance des chaussées, les structures du génie civil nucléaire et les matériaux cimentaires, la maquette numérique de la ville et les informations sémantiques qu'elle pourrait contenir.

► **L'IRC possède des structures de recherche propres sur le campus de Cachan de l'ESTP Paris.** Une dizaine de laboratoires sont ainsi partagés entre activités de

recherche et activités d'enseignement afin de favoriser les échanges entre enseignants-chercheurs et élèves de l'école : matériaux cimentaires, matériaux routiers, géomatériaux, hydraulique, mécanique, topographie, mesure physique, efficacité énergétique.

Ces espaces disposent de moyens expérimentaux de mise en œuvre, d'essai, de mesure et de caractérisation utilisés pour la formation lors des séances de travaux pratiques par les élèves de l'ESTP Paris. L'IRC a par ailleurs acquis des outils scientifiques avancés utilisables transversalement dans tous les domaines d'étude. Parmi les plus novateurs et intéressants pour le domaine de la construction, notons : un érodimètre EFA pour caractériser les phénomènes d'érosion, un analyseur par diffractométrie de rayons X (DRX), un spectromètre infrarouge, un analyseur thermogravimétrique couplé à un calorimètre à balayage différentiel (TGA/DSC), des mesures par granulométrie laser, une station météorologique, un cloud et des stations de calcul [...].

Les approches expérimentales, en laboratoire ou in situ, sont complétées par des simulations numériques. Les sujets d'étude, inscrits dans la constructibilité, portent sur les matériaux de construction innovants dans leur environnement, la performance des procédés et des structures de construction, ou encore sur l'étude d'outils de représentation, d'interopérabilité ou d'amélioration du processus de production.

► **La gouvernance de l'IRC s'inspire des grands instituts de recherche modernes.** Sous l'impulsion du directeur de l'IRC, en relation avec la direction de l'école et les directions des études, des relations internationales et des entreprises, les enseignants-chercheurs définissent les objectifs de recherche dans un plan pluriannuel. Un Conseil de la recherche, constitué d'experts, de professionnels et de personnalités académiques du secteur, se réunit au minimum deux fois par an pour proposer des orientations stratégiques et thématiques. Des instances internes permettent de conduire les projets, d'impliquer et d'informer le personnel.

► **L'IRC contribue à trois projets collaboratifs nationaux** (« Multirecyclage des enrobés tièdes », « Durée de vie des chaussées », « Modélisation des informations interopérables pour les infrastructures durables »). Il est partenaire du projet FUI 19 « Risk Intelligence And Decisions » (RID), labellisé par Advancity, et participe activement aux travaux de recherche de l'institut pour la transition énergétique Efficacity.

► **L'écosystème de l'IRC s'intègre dans celui de l'ESTP Paris.** Ainsi, de nombreux partenariats existent avec :
► les entreprises de la construction et de l'énergie ;
► les fédérations et associations nationales des métiers de la construction ;
► les laboratoires de recherche académiques du secteur (Ifsttar, Navier, ENS, Ensam...).

Les chiffres clés de la recherche sur la période 2015-2016

44
membres

2
postdoctorants,
5 techniciens et
personnel administratif

25
projets de
recherche

31
stages de
master d'une
durée moyenne
de quatre mois

2
chaires d'enseignement-
recherche, Génie civil
nucléaire (2009)
et Ingénierie des bétons
(2014)

1
conférence
internationale (Edubim)
organisée à l'ESTP
Paris, 6 séminaires
de recherche dont
3 ouverts à
nos partenaires

8
laboratoires
d'enseignement et de
recherche sur une surface
de plus de 1 200 m²

4
partenaires
académiques
internationaux
en codirection
de thèse

20
enseignants-chercheurs,
3 enseignants-chercheurs
habilités à diriger
des recherches (HDR)

20
partenaires parmi
les plus grands
comptes
et industriels
de la construction,
finançant à 75 %
les travaux
de recherche de l'IRC

1,8
budget de
recherche d'environ
1,8 million d'euros

17
thèses en cours,
4 thèses soutenues
en 2015-2016,
4 thèses démarrées
en 2015-2016

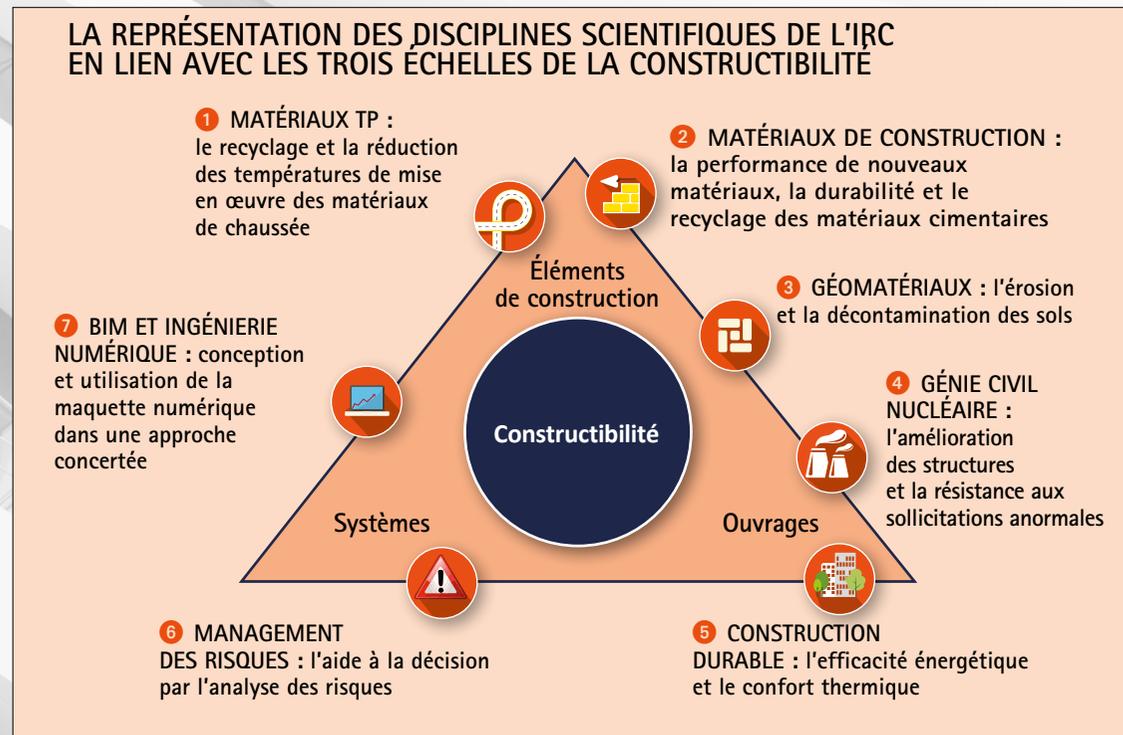
29
projets d'innovation
d'entrepreneuriat et de
recherche (Pier) encadrés
par les EC de l'IRC –
regroupant près de
60 élèves ingénieurs
de l'ESTP Paris

La thématique de constructibilité

La constructibilité est le champ disciplinaire commun à tous les travaux développés au sein de l'IRC.

Définition

- La constructibilité est une démarche innovante qui vise à assurer l'optimisation de la conception et de la réalisation d'un projet de construction, de déconstruction ou d'aménagement, afin d'en garantir et de maintenir ses performances d'usage.
- Ainsi la constructibilité vise à fournir une assurance raisonnée quant à l'atteinte des objectifs de tout projet de construction sur son cycle de vie. Son objectif est de garantir et de maintenir les performances d'usage attendues par les utilisateurs finals.



Principes

- La constructibilité ne se substitue pas aux diverses disciplines.
- La constructibilité facilite la transversalité des différentes expertises.
- La constructibilité concerne l'amont des projets et non l'aval puisqu'elle l'anticipe.
- La constructibilité s'applique à toutes les échelles du cadre bâti.

Architecture

- La constructibilité se caractérise par une grille de lecture systémique de chaque projet qui concerne toutes les parties prenantes.
- Elle croise les trois étapes du cycle de vie du projet (cahier des charges, projétation, mise en œuvre) avec les trois composantes principales (consistance/performances, procédés mobilisés, procédure/écosystème).
- Elle s'assure de la cohérence des outils mobilisés pour instruire chaque moment du projet.
- Elle doit permettre de mesurer la performance à chacune des étapes de la chaîne de valeurs du projet.

On distingue trois échelles de dimension croissante : depuis l'élément de construction jusqu'au bâtiment et à l'infrastructure.

Les projets de recherche de l'IRC présentés dans ce rapport d'activité s'inscrivent dans chacune de ces trois échelles.

Les chaires d'enseignement et de recherche

L'ESTP Paris bénéficie de deux chaires formation-innovation recherche :

- ▶ la chaire Ingénierie des bétons (IDB). Liées par des conventions de recherche avec des partenaires et par des contrats avec des entreprises, les chaires élaborent des programmes d'enseignement et de recherche pour accompagner la prospective de la thématique définie.

Les chaires d'enseignement-recherche de l'ESTP Paris ont quatre objectifs principaux :

- ▶ développer à l'ESTP Paris l'enseignement (initial et continu) et la recherche dans la discipline de la chaire ;
- ▶ renforcer le corps enseignant et les moyens pédagogiques ;
- ▶ favoriser les contacts des étudiants de l'ESTP Paris avec les professionnels et leur information sur les divers métiers ;
- ▶ valoriser l'activité de la chaire et ses partenaires par des actions de communication.

Les travaux scientifiques de chacune des chaires de l'ESTP Paris s'inscrivent dans la constructibilité. On s'intéresse plus particulièrement à l'élément de construction dans le cadre de la chaire IDB et à l'échelle du bâtiment dans le cadre de la chaire GCN, cependant, comme l'approche le suggère, des changements d'échelle sont également appréhendés. Les chaires ainsi que les travaux s'y rapportant sont décrits dans les sections suivantes.

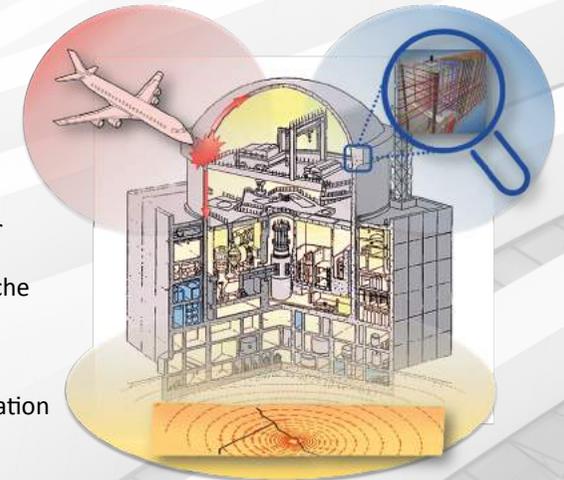
La chaire Génie civil nucléaire (GCN)

GCN La chaire Génie civil nucléaire (GCN), constituée à l'ESTP Paris en 2009 autour des parties prenantes du secteur, est la première structure dédiée à la formation et à la recherche en génie civil nucléaire.

Volet enseignement : le programme d'enseignement de 210 h est destiné aux étudiants français et étrangers de formation initiale de niveau master (cours en anglais). Il est proposé aux élèves ingénieurs de l'ESTP Paris en option de 3^e année. Des professionnels partenaires assurent l'enseignement. Un master international GCN a démarré à la rentrée 2015.

Volet recherche : la recherche en GCN est coordonnée au travers du pôle de recherche prénormatif en construction nucléaire (Renon). Ce pôle de recherche, pour l'amélioration des codes et normes de génie civil qui impactera favorablement la constructibilité des structures nucléaires, a été mis en place conjointement avec l'IFSTTAR et les partenaires souhaitant le rejoindre. Dans ce cadre, la deuxième thèse de doctorat relative au GCN a été soutenue en janvier 2016 et cinq thèses sont actuellement en cours.

Il convient de noter également que le pôle RENON auquel la recherche



PARTENAIRES

AREVA, EDF, EGIS INDUSTRIES, NUVIA STRUCTURE, RAZEL-BEC, SPIE BATIGNOLLES, TRACTEBEL ENGINEERING, IFSTTAR (RENON).

CONTACTS

Directeur Renon :
Pierre Labbé
→ pierre.labbe@edf.fr

Directeur adjoint
Guillaume Hervé-Secourgeon
→ gherve@estp-paris.eu

Enseignant-chercheur :
Christophe Rouzard
→ crouzard@estp-paris.eu

du master vient s'adosser à vocation de constituer un vecteur de dissémination internationale des innovations françaises et des solutions techniques proposées par notre industrie. Il pourra aussi s'appuyer sur les actions de communication et de dissémination de la chaire GCN telles que les conférences Tince (technological innovations in nuclear civil engineering) et la section technique génie civil et architecture de la Sfen qui a opportunément été recrée.

Ce pôle de recherche doit, par ces travaux, alimenter des dossiers robustes de démonstration des propositions d'évolution des normes sur des sujets divers et défendre la construction « à la française ».

Pour répondre à ces objectifs, RENON est bâti à ce jour autour de trois thématiques principales :

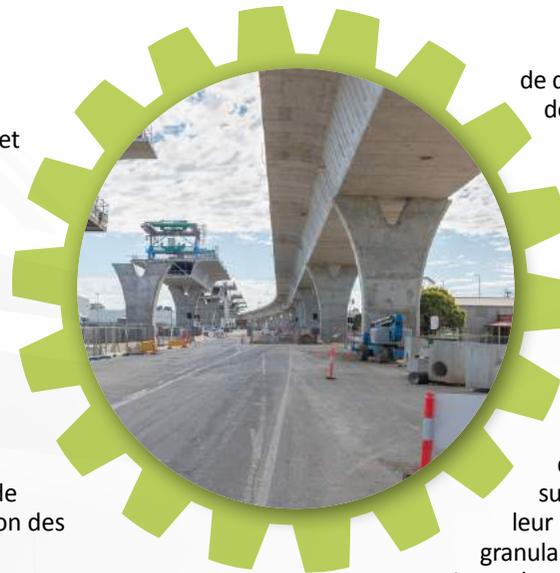
- la dynamique transitoire des structures : impact et explosion,
- l'analyse des structures sous chargement sismique,
- l'optimisation des méthodes de dimensionnement et la qualification de procédés et matériaux de construction innovants.

La chaire Ingénierie des bétons (IdB)



La chaire Ingénierie des bétons (IdB) a été créée en 2014 sous l'impulsion de l'industrie cimentière.

Objet et orientations de la chaire : le projet scientifique de la chaire Ingénierie des bétons vise à positionner l'ESTP Paris comme un acteur et un partenaire privilégié pour l'industrie cimentière. Les objectifs de la chaire sont



de développer une expertise dans la maîtrise des propriétés de nouveaux bétons et de leurs applications au travers de la mise en place d'un programme pédagogique nouveau et d'un programme de recherche.

Volet enseignement : le programme de cours spécifique à la chaire comprend un ensemble de modules approfondissant les notions correspondant à la maîtrise par les élèves ingénieurs de 1^{re} année des connaissances dans le domaine des ciments et bétons. Un nouveau programme de travaux pratiques portant entre autres sur la rhéologie des mortiers et bétons et leur mise en œuvre, les notions d'empilement granulaire, l'exothermie des ciments et bétons, a été mis en place à partir de la rentrée 2015.

Volet recherche : le programme de recherche proposé est en adéquation avec les attentes de l'industrie cimentière partenaire portées par les associations représentatives de la filière (Atilh, Cimbeton, EFB). Un laboratoire Ingénierie des bétons a été ouvert à l'ESTP Paris où se dérouleront les activités de la chaire. Il est relié à l'Institut de recherche en constructibilité et accueille des stagiaires en master II, TFE, et des étudiants en doctorat, sur des thématiques telles que :

- formulation et durabilité des bétons à base de ciments multiconstituants,
- constructibilité et approche performantielle de la durabilité des bétons,
- dispositions constructives et nouvelles propriétés d'usage des bétons (thermiques, environnementales et sanitaires),
- recyclage des bétons : étude de carbonatation et impact sur la lixiviation des métaux lourds,
- traitement et stabilisation des sols à base de liants hydrauliques routiers.

PARTENAIRES

VICAT, EQIOM, LAFARGE, CALCIA, EPS, KEPS, SIGMA BÉTON, CONDENSIL, OMYA, ARGECO, EFB, ATILH, CIMBETON.

CONTACTS

Responsable du laboratoire IdB :
Johan Colin
→ jcolin@estp-paris.eu

Enseignante-chercheuse
déléguée IdB :
Patricia Bredy Tuffe
→ pbredytuffe@estp-paris.eu

Directrice EFB
Sandrine Mansoutre
→ s.mansoutre@efbeton.com

Directeur de la recherche Atilh :
Horacio Colina
→ h.colina@atilh.fr



LES PROJETS DE RECHERCHE



La constructibilité des éléments de construction

Objectifs

Accompagner et faciliter la mise au point du couple matériau/contexte ou d'éléments de construction (composants ou équipements) compte tenu de leur contexte d'utilisation.

Mots clés

Analyse fonctionnelle, analyse du cycle de vie, prise en compte des critères sociétaux (recyclage), établissement des performances intermédiaires, modélisation process, prototypage, critères normatifs (essais), économie circulaire, analyse de la valeur, « commissioning » (recette)

Axes scientifiques

Les activités de recherche regroupées sous ce thème portent sur les sols, les matériaux routiers et les matériaux cimentaires. Elles peuvent être étendues à tous types de matériaux de construction rentrant dans une démarche de constructibilité, élargissant les possibilités d'action de l'IRC à l'ensemble des éléments rentrant dans un projet de construction. L'approche de constructibilité implique la prise en compte de l'étude du comportement et des performances des matériaux dans leur environnement, de l'optimisation de leur processabilité et ouvrabilité, ainsi que de leur cycle de vie et de leur empreinte environnementale.

Objets d'étude



Les géomatériaux

Études portant sur les ouvrages en terre et les interactions sol/structures. Elles ont pour but la caractérisation des géomatériaux rencontrés dans divers environnements par l'utilisation de méthodes géotechniques, physiques ou hydrauliques et l'étude des performances des ouvrages dans un objectif d'amélioration et d'optimisation de la conception, de la construction et de la maintenance des ouvrages. Les travaux concernent deux principaux axes : l'érosion interne et l'affouillement d'ouvrages hydrauliques, le traitement et la valorisation des sols et des sédiments pollués.



Les matériaux de chaussées

Les objectifs sont la valorisation de matériaux alternatifs pour les bitumes, que ce soit à l'échelle du liant bitumineux, des granulats ou des matériaux bitumineux au sens large, et les économies d'énergie et de ressources naturelles en technique routière, notamment par l'abaissement des températures de fabrication et de mise en œuvre. Ces deux axes répondent aux préoccupations industrielles et scientifiques, avec une forte orientation vers le développement durable et la constructibilité, en alliant l'optimisation de la mise en œuvre (ouvrabilité), les performances finales et la durabilité des matériaux bitumineux, recyclés ou non, à chaud, tièdes et à l'émulsion de bitume.



Les matériaux cimentaires

De nouveaux matériaux de substitution au ciment sont à l'étude, réduisant les émissions de CO² des processus de production actuels, ainsi que la durabilité de matériaux renforcés en fibres naturelles ou encore la formulation de béton produit à base de matériaux de déconstruction pour garantir un impact environnemental limité.

Érosion interne des ouvrages hydrauliques et d'infrastructures

Contexte

L'érosion interne est l'une des principales causes de détérioration et de rupture d'ouvrages hydrauliques tels que les barrages en terre et les digues. Les processus érosifs touchent également d'autres types d'ouvrages, comme les remblais d'infrastructures de transport ou les fondations de pile de pont. Comprendre, modéliser et anticiper les phénomènes qui fragilisent ces ouvrages est un des objectifs majeurs des travaux de recherche menés par l'équipe Géomécanique et constructibilité de l'IRC. Ainsi, à travers une approche multiéchelle expérimentale et de modélisation, les phénomènes d'érosion interne sont étudiés afin de renseigner sur l'aptitude des géomatériaux utilisés et en particulier différents types de sols, à être mis en œuvre dans des conditions optimales en termes de performances d'usage et de sécurité des ouvrages.

Actions de recherche

Lancée en 2008 à l'IRC et faisant appel à plusieurs disciplines, notamment la géotechnique et l'hydraulique souterraine, la thématique de l'érosion interne dans les ouvrages hydrauliques a été l'objet de deux thèses soutenues en 2014 (Tarek

Karoui) et en 2015 (Radja Elandaloussi) ainsi que de plusieurs stages. Divers types d'expérimentations sont utilisés. En plus des équipements de géotechnique, l'équipe de recherche dispose d'un équipement unique en France, un érodimètre EFA (erosion fonction apparatus), qui permet de reproduire le phénomène d'érosion de surface et de simuler par exemple l'érosion des digues par surverse.

L'érosion par suffusion, caractérisée par le détachement et le transport de particules fines au travers d'une matrice de sol, est étudiée grâce à un dispositif dans lequel un écoulement hydraulique est établi dans des colonnes de sol à différents gradients hydrauliques. Certaines recherches ont été entreprises dans le cadre du projet national Erinoh (Érosion interne dans les ouvrages hydrauliques). Un « guide essai » a été publié en 2016.

Des travaux entrepris en 2015-2016 dans le cadre d'un postdoctorat et d'un stage de master, dans la continuité de la thèse de Radja Elandaloussi, ont porté sur l'étude des performances par rapport à l'érosion interne par suffusion d'un traitement à la chaux de sols grossiers contenant un faible pourcentage d'argile. Les résultats de ces travaux confirment l'intérêt du traitement à la chaux de ce type de sol pour prévenir des risques d'érosion interne : fracturation hydraulique mais pas de suffusion à des gradients hydrauliques supérieurs à 10 pour un sol traité

à 3 % de chaux, contre une suffusion observée à partir d'un gradient hydraulique de 3 pour les sols non traités [1]. Une campagne d'essais triaxiaux a mis en évidence un comportement (dilatant ou contractant) fortement dépendant du traitement à la chaux, mais elle ne permet pas encore de conclure d'une façon certaine sur l'évolution de la cohésion. Une poursuite de ce travail est envisagée.

D'autres études ont porté sur la résistance à l'érosion de surface de sols traités à la chaux [2] ou au ciment (projet d'étude de quatre mois), ainsi que sur les corrélations de résultats d'essais d'érosion à l'EFA avec les propriétés géotechniques des sols (stage d'initiation à la recherche de cinq semaines).

Productions scientifiques

- ▶ [1] R. Elandaloussi, A. Bennabi, J.-C. Dupla, A. Benamar, P. Gotteland, « Lime treated of slightly clayey coarse soil for the control of internal erosion by suffusion », 8th International Conference on Scour and Érosion (ICSE 2016), 12-15 septembre 2016, Oxford (Royaume-Uni).
- ▶ [2] A. Bennabi, G. Herrier, D. Lesueur, « Lime treated soil erodibility investigated by EFA erosion testing », 8th International Conference on Scour and Érosion (ICSE 2016), 12-15 septembre 2016, Oxford (Royaume-Uni).



PARTENAIRES

FNTP, UNIVERSITÉ DU HAVRE, ENPC.

CONTACTS

Abdelkrim Bennabi
→ abennabi@estp-paris.eu

Emma Florens
→ eflorens@estp-paris.eu

Traitement et valorisation des sols et sédiments pollués

Contexte

Chaque année en France, 50 millions de mètres cubes de sédiments portuaires et 6 millions de mètres cubes de sédiments fluviaux, dont une grande partie est fortement polluée, font l'objet d'une intense activité de dragage.

La contamination de ces sédiments est liée aux activités industrielles et urbaines qui au cours du siècle dernier ont introduit une multitude de polluants (métaux lourds, hydrocarbures, HAP, PCB...) menaçant la faune et la flore. Il en est de même pour les sols dont la contamination par des produits issus d'épandages, de stockages ou de fuites d'installations peut avoir des incidences sur l'environnement. Alors que la réponse au questionnement sur le devenir des sédiments portuaires dragués ne consistait qu'en un simple relargage en mer, aujourd'hui le respect de l'environnement prend une place de plus en plus importante. Il exige un effort soutenu de recherche qui réduira les teneurs en polluants des sédiments contaminés à un niveau acceptable pour qu'ils soient, éventuellement, réutilisés en tant que matériaux routiers ou matériaux de construction.

Actions de recherche

La thématique du traitement et de la valorisation des sols et sédiments pollués fait l'objet de recherches à l'IRC depuis au moins huit ans. En plus de nombreux stages (master et travaux de fin d'études), une thèse réalisée dans le cadre d'un partenariat ESTP Paris-GCU (Glasgow Caledonian University) a été soutenue en 2013 (Panagiotis Fotis). Une deuxième thèse, au sein du même partenariat, est en cours d'achèvement (Theodora-Dafni Stavra, soutenance prévue fin 2016-début 2017). Les travaux réalisés en 2015-2016 (thèse de Theodora-Dafni Stavra et deux stagiaires de master) ont porté sur l'application d'une méthode de traitement ayant pour objectifs la diminution de la teneur en métaux lourds et la valorisation de sédiments pollués. La technique de traitement par solidification/stabilisation, utilisant une zéolite naturelle capable de fixer des métaux lourds, la clinoptilolite, a été appliquée sur des sédiments naturels et artificiels. Grâce aux essais de lixiviation, de résistance à la compression simple et de caractérisation physico-chimique (DRX, fluorescence X, ATG...), les performances du traitement ont pu être évaluées, tant du

point de vue environnemental que du point de vue mécanique, tout en se souciant de vérifier l'ouvrabilité des sédiments traités en cas d'utilisation comme matériaux de construction. Les travaux ont porté entre autres sur l'identification des minéraux formés, des mécanismes réactionnels et des cinétiques de traitement.

Productions scientifiques

- [1] N. Hytiris, P. Fotis, T.-D. Stavra, A. Bennabi, R. Hamzaoui, « Leaching and mechanical behaviour of solidified/stabilized nickel contaminated soil with cement and geosta », International Journal of Environmental Pollution and Remediation, vol. 3, (2015) 1-8.
- [2] N. Hytiris, P. Fotis, T.-D. Stavra, A. Bennabi, R. Hamzaoui, « Solidification/stabilization of heavy metal contaminated soil/sediment treated with clinoptilolite and geosta », Proceedings of the 2nd International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering (ICASTE 16), Ottawa (Canada), 5-6 mai 2016.



PARTENAIRE

GLASGOW CALEDONIAN UNIVERSITY.

CONTACTS

Abdelkrim Bennabi

→ abennabi@estp-paris.eu

Rabah Hamzaoui

→ rhamzaoui@estp-paris.eu

Maîtrise de la mise en œuvre des matériaux bitumineux à la suite des abaissements de température

Contexte

Le développement, depuis une dizaine d'années, des techniques « tièdes » avec des matériaux bitumineux permet un gain énergétique et des réductions des émissions de gaz à effet de serre bénéfiques tant pour les ouvriers que pour les usagers. En revanche, elles ont suscité des questionnements quant à la mise en œuvre, étape importante et essentielle, dans la chaîne d'élaboration d'un revêtement bitumineux pour les infrastructures routières. Sa bonne réalisation, liée plus particulièrement à la maniabilité et la compactabilité des matériaux, est indispensable pour garantir la durabilité dans le temps. Anticiper leur bonne détermination, c'est se prémunir d'un éventuel problème de malfaçon et répondre à une démarche de constructibilité.

Actions de recherche

La problématique de maniabilité (définie comme la facilité de mise en œuvre non mécanisée sur chantier) est liée principalement à des réalisations ou à des finitions manuelles. Cette thématique, étudiée depuis 2008 au laboratoire Matériaux de chaussées de

l'IRC, a conduit à une thèse soutenue en avril 2016 [3]. Elle s'appuie sur une approche expérimentale multiéchelle – à savoir le liant bitumineux et le mastic (fines + liant), facteurs influents majeurs, mais aussi l'enrobé bitumineux –, l'utilisation de matériaux réels et modèles, sur une large gamme de températures, une approche rhéologique par des mesures de viscosité dynamique mais aussi technologique à l'échelle de l'enrobé, avec l'étude du maniabilimètre normalisé de la profession routière. Dans notre domaine d'études, outre le caractère newtonien bien connu des bitumes, celui plus surprenant et non newtonien des mastics a été mis en évidence. Le travail mené a montré l'intérêt de l'utilisation des huiles au silicone. Il a conduit à la détermination de la maniabilité des enrobés par un mode opératoire maîtrisé et à la définition de trois types de comportement [1]. Des outils plus classiques utilisés dans les laboratoires routiers ont également été étudiés, montrant leurs limites [2]. Ces travaux vont être poursuivis par une adaptation du maniabilimètre sur asphalte coulé. Il convient de bien distinguer la maniabilité (non caractérisée et non spécifiée dans la formulation des enrobés à chaud) de la compactabilité (première étape indispensable de validation d'une formulation en laboratoire). En partenariat avec les entreprises Ingevity et Malet, une étude a été

menée sur l'utilisation de la classique presse à cisaillement giratoire (PCG) normalisée en Europe, pour définir des critères adéquats permettant de mesurer l'effet de l'abaissement de température sur la compactabilité (calculs de compaction energy index, détermination de ratios de performance et de giration). Les résultats obtenus ont permis de définir les méthodes les plus sélectives et les plus pertinentes et de comparer différents procédés tièdes entre eux [3].

Productions scientifiques

- ▶ [1] A. Fabre des Essarts, « Étude du comportement des enrobés bitumineux aux températures de mise en œuvre », thèse de doctorat soutenue le 12 avril 2016, Université Paris-Est.
- ▶ [2] A. Fabre des Essarts, A. Dony, S. Faucon-Dumont, V. Gaudefroy, J.-N. Roux, « Evaluation of tools for measuring the workability of bituminous asphalts », Eurasphalt & Eurobitume Congress, juin 2016, Prague (République tchèque).
- ▶ [3] A. Dony, L. Ziyani, « Incidence des abaissements de températures sur la mise en œuvre de matériaux bitumineux », communication acceptée au congrès Infra 2016, Montréal (Canada).



PARTENAIRES

IFSTTAR, NAVIER, INGEVITY, MALET.

CONTACTS

Anne Dony
→ adony@estp-paris.eu
Layella Ziyani
→ lziyani@estp-paris.eu

Problématiques liées au recyclage des enrobés bitumineux



Contexte

Le recyclage des chaussées est une technique pratiquée depuis des décennies afin d'économiser les ressources naturelles non renouvelables et de répondre aux exigences actuelles du développement durable. Bien que le recyclage soit de mieux en mieux maîtrisé, des questions d'ordre scientifique et technique demeurent, notamment la combinaison du recyclage avec l'abaissement des températures de fabrication ou la durabilité des enrobés recyclés. Il est nécessaire de répondre à ces problématiques liées au recyclage, pour garantir la bonne constructibilité des enrobés contenant des agrégats, matériaux issus du recyclage.

Actions de recherche

La thématique du recyclage des enrobés est étudiée à l'IRC depuis 2008. Elle reste actuellement une préoccupation majeure pour la communauté routière. C'est dans ce contexte que le projet national (PN) Mure (Multirecyclage et enrobés tièdes) a démarré en mars 2014 afin d'apporter des solutions au couplage entre le recyclage et la technique des enrobés tièdes et à l'évaluation du potentiel de multirecyclage des enrobés.

Le GT1 (groupe de travail) de ce PN, piloté en partie par l'ESTP Paris, doit définir un procédé de vieillissement accéléré d'enrobés à l'échelle industrielle et reproductible pour obtenir des agrégats d'enrobés (AE) représentatifs. Auparavant, une méthode commune de caractérisation du vieillissement des enrobés par spectroscopie infrarouge a été proposée à tous les partenaires du PN, puis a été valorisée au niveau international [1]. Le GT4, dans lequel le laboratoire Matériaux routiers de l'IRC est fortement impliqué, a pour mission de définir un ensemble de procédures et de tests adaptés à la caractérisation physique et chimique d'un échantillon d'agrégats d'enrobés et de ses constituants, en particulier le liant hydrocarboné. Pour ce faire, un travail bibliographique substantiel [2] a été réalisé afin de passer en revue toutes les techniques d'extraction et de récupération du liant provenant des AE, et notamment leurs risques sanitaires et environnementaux. Une autre action majeure réalisée a porté sur la durabilité des enrobés neufs et recyclés. L'objectif était de déterminer l'effet des conditions climatiques et du taux de recyclage sur la tenue à l'eau. Le travail de recherche a été mené à deux niveaux. À l'échelle du liant, un protocole a été établi en laboratoire sur des plaques soumises à différentes conditions climatiques (20 °C,

40 °C et cycles de gel/dégel). À l'échelle de l'enrobé, la tenue à l'eau d'enrobés neufs et recyclés a été évaluée via les essais Duriez aux mêmes conditions climatiques qu'à l'échelle du liant. Les liants testés aux deux échelles ont été récupérés et caractérisés aux niveaux conventionnel, rhéologique et physico-chimique. Les résultats ont permis de mettre en évidence l'effet des conditionnements à 40 °C et des cycles de gel/dégel sur les caractéristiques des liants. L'exploitation des résultats obtenus aux deux échelles a permis de valider l'intérêt d'une nouvelle approche rhéologique, au moyen de paramètres tels que R-value et crossover frequency.

Productions scientifiques

- [1] A. Dony, L. Ziyani, I. Drouadaine, S. Pouget, S. Faucon-Dumont, D. Simard, V. Mouillet, J.-E. Poirier, T. Gabet, L. Boulange, A. Nicolai, C. Gueit, « Mure National Project : Ftir spectroscopy study to assess ageing of asphalt mixtures », Eurobitume & Eurasphalt Conference, juin 2016, Prague (République tchèque).
- [2] L. Ziyani, L. Boulange, A. Nicolai, V. Mouillet, « Solvent extraction and bitumen recovery in road technology and first chemical risk assessments », en cours de soumission.

PARTENAIRES

MURE (PROJET NATIONAL),
POLITECNICO DI MILANO.

CONTACTS

Anne Dony
→ adony@estp-paris.eu
Layella Ziyani
→ lziyani@estp-paris.eu

Étude du mûrissement et du vieillissement des enrobés à l'émulsion de bitume

Contexte

La technique des enrobés à l'émulsion de bitume est développée depuis quelques décennies pour les couches de base et de roulement, mais aussi en couche mince pour l'entretien des chaussées. En comparaison avec la méthode traditionnelle (dite des enrobés à chaud), elle présente l'avantage de réduire la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre lors de la fabrication et lors de la mise en œuvre, garantissant ainsi la sécurité des ouvriers dans le respect du développement durable. Les enrobés à l'émulsion sont évolutifs dans le temps : ils n'acquies leurs propriétés mécaniques finales qu'après leur mûrissement, c'est-à-dire le départ complet de l'eau. Cependant, la cinétique de mûrissement est difficile à prévoir, car elle dépend de nombreux paramètres. De plus, les enrobés subissent tout au long de leur vie différentes sollicitations liées, entre autres, au trafic routier, à la température et aux rayons UV. Celles-là induisent à long terme le vieillissement du liant. Il est donc nécessaire de simuler en laboratoire les phénomènes de mûrissement et de vieillissement des enrobés à l'émulsion afin de mieux prédire leur comportement sur un chantier et de garantir leur constructibilité.

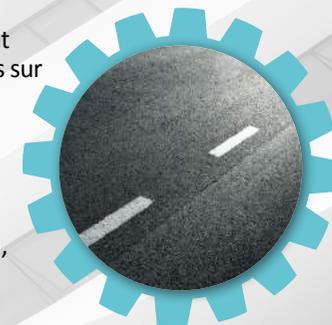
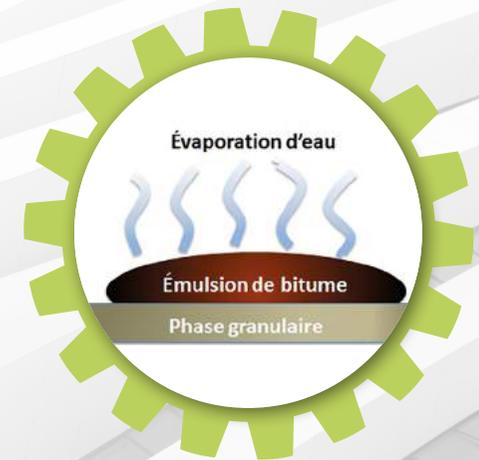
Actions de recherche

La thématique des enrobés à l'émulsion de bitume est étudiée depuis 2014 au laboratoire Matériaux de chaussées de l'IRC. Elle a été lancée par une thèse réalisée à l'École de technologie supérieure (ETS) de Montréal portant sur les enrobés coulés à froid (ECF), technique d'entretien de chaussée utilisant l'émulsion [1]. En 2015-2016, dans le cadre de cette thèse, une action a été entreprise sur le vieillissement UV de ces ECF, et notamment son importance par rapport à un vieillissement thermique. Des essais de vieillissement sur émulsion de bitume et sur ECF ont été effectués en parallèle, à une même température (44 °C) et sur des durées similaires, dans des enceintes UV (financement : Fondation ESTP Paris) et thermique. Une caractérisation par des outils conventionnels, rhéologiques (Kinexus pro +, Fondation ESTP Paris) mais aussi spectroscopiques (méthode harmonisée PN Mure [2]) a permis de comparer les évolutions et montre la nécessité d'approfondir les essais et de prolonger les durées d'exposition. Une approche sur les ECF contenant des matériaux recyclés est en cours. Une autre activité démarrée en 2016 est l'étude de la cinétique de mûrissement des bétons bitumineux à l'émulsion (BBE) pour couche de roulement.

Une première étape expérimentale a permis de valider une émulsion fabriquée à l'IRC au moyen d'un moulin colloïdal et d'une formule de BBE. Des corps d'épreuve d'enrobés ont été confectionnés et mûris selon deux conditionnements différents en température et en humidité relatives mais représentatifs du climat français. Le suivi de la perte en eau des échantillons par pesée a montré l'influence des conditions climatiques et de la géométrie des échantillons sur la cinétique de mûrissement. Les résultats ont aussi mis en évidence l'effet de ces facteurs sur la résistance en compression des BBE.

Productions scientifiques

- ▶ [1] A. Garfa, O. Sanou, A. Dony, L. Ziyani, A. Carter, W. Zaouali, V. Charton, « Effect of aging on binder characteristics of virgin and recycled microsurfacing Materials », Isap Symposium, juillet 2016, Jackson Hole (États-Unis).
- ▶ [2] A. Dony, L. Ziyani, I. Drouadaine, S. Pouget, S. Faucon-Dumont, D. Simard, V. Mouillet, J.-E. Poirier, T. Gabet, L. Boulange, A. Nicolai, C. Gueit, « Mure National Project : Ftir spectroscopy study to assess ageing of asphalt mixtures », Eurasphalt & Eurobitume Congress, juin 2016, Prague (République tchèque).



PARTENAIRES

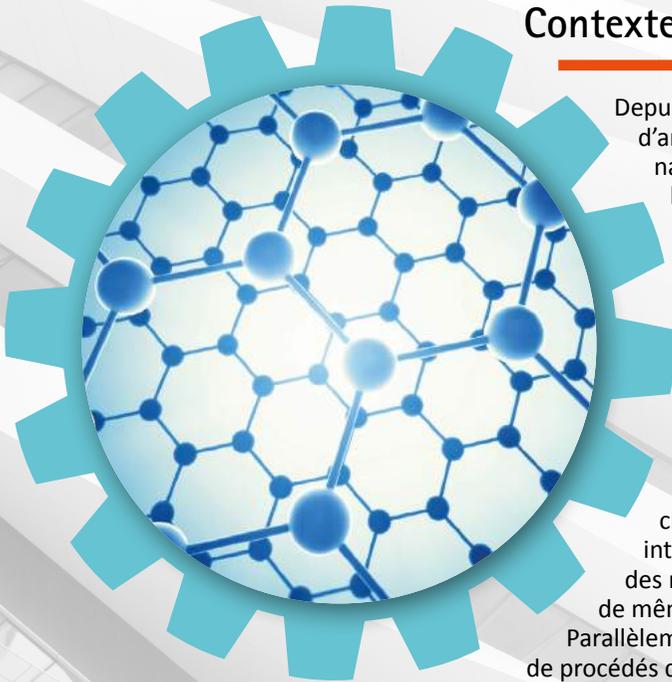
ETS, PROBINORD.

CONTACTS

Anne Dony
→ adony@estp-paris.eu

Layella Ziyani
→ lziyani@estp-paris.eu

Matériaux nanostructurés pour matériaux de construction innovants



Contexte

Depuis une quarantaine d'années, les matériaux nanostructurés font l'objet d'un intérêt grandissant et ouvrent de nouveaux champs d'application. La taille nanométrique des cristallites et le volume important d'interfaces confèrent au matériau des propriétés physico-chimiques plus intéressantes que celles des matériaux massifs de même composition.

Parallèlement, le développement de procédés de synthèse de ces matériaux, telle la mécanosynthèse, a connu un véritable essor. En effet, sous l'action de chocs répétés, les solides broyés peuvent développer une structure d'équilibre métastable et des propriétés remarquables. Cette technique rencontre un véritable succès avec plusieurs types de matériaux, notamment avec les matériaux de génie civil.

PARTENAIRES

FONDATION ESTP PARIS,
LEGEM SAINT-NAZAIRE,
INRA NANTES.

CONTACT

Rabah Hamzaoui
→ rhamzaoui@estp-paris.eu

Actions de recherche

L'objectif de ce travail est la proposition d'un matériau de construction innovant respectant l'environnement. L'approche consiste à substituer le clinker dans les ciments par des produits pouzzolaniques (laitiers, métakaolin, cendres volantes, fumées de silice...) ou naturels (calcaire, kaolinite) activés mécaniquement avec des alcalins. Cette alkali-activation des pouzzolanes par voie mécanique va déclencher rapidement des réactions pouzzolaniques avec le ciment hydraté. Des formulations de mortier et de béton à base de ces ciments sont proposées ainsi que la solidification et la stabilisation de sols pollués par ces pouzzolanes modifiées.

Productions scientifiques

► [1] R. Hamzaoui, O. Bouchenafa, S. Guessasma, N. Leklou, A. Bouaziz, « The sequel of modified fly ashes using high energy ball milling on mechanical performance of substituted past cement », *Materials and Design*, vol. 90, 15 janvier 2016.



- [2] R. Hamzaoui, F. Muslim, S. Guessasma, A. Bennabi, J. Guillin, « Structural and thermal behavior of proclay kaolinite using high energy ball milling process », *Powders Technology*, vol. 271, février 2015.
- [3] R. Hamzaoui, S. Guessasma, « Nanomaterials obtained by planetary ball mill and their applications in civil engineering », *Mechanics of Sustainable Structural Materials at the ASCE Engineering Mechanics Institute Conference*, 16-19 juin 2015, Stanford University (États-Unis).
- [4] R. Hamzaoui, S. Guessasma, A. Bennabi, « Kaolinite obtained by ball milling as a potential substituent for cement : mechanical performance effect on mortar based cement and milled kaolinite », *CIGOS PARIS*, 11-12 mai 2015, ENS Cachan (France).

Valorisation des matériaux locaux biosourcés pour le génie civil

Contexte

La valorisation des déchets d'origine végétale et de sous-produits issus de l'industrie sidérurgique sont des alternatives prometteuses dans le secteur de la construction. Les fibres synthétiques habituellement utilisées pour renforcer les matrices minérales sont, en général, d'origine organique, comme les fibres de polypropylène ou de polyester. Les fibres d'acier, de fonte, de verre ou de carbone sont privilégiées pour améliorer considérablement les caractéristiques mécaniques des liants, des mortiers et des bétons. La laine de verre, les panneaux en polystyrène seuls ou combinés avec une matrice minérale ou organique sont autant de matériaux recommandés pour assurer l'isolation thermique des constructions. Cependant, la fabrication de ces renforts fibreux ou l'industrialisation de produits finis servant à l'isolation thermique nécessitent, d'une part, des investissements parfois très coûteux et, d'autre part, peuvent nuire à l'environnement par le dégagement de gaz polluants. Certaines productions de fibres synthétiques et artificielles peuvent constituer un risque avéré pour la santé. En combinant tous les aspects environnementaux, économiques et de durabilité, la recherche, dans le secteur du

génie civil, s'oriente vers des matériaux et des renforts biosourcés, en substitution ou en complément aux matériaux et aux renforts synthétiques et artificiels existants. Ces matériaux biosourcés peuvent répondre à la demande croissante et spécifique du secteur de la construction. On parle de « biocomposites » pour des matériaux constitués avec au moins un composant biologique pour le renfort, le liant, la charge ou les additions incorporées dans la matrice afin de lui conférer des caractéristiques complémentaires. Pour renforcer une matrice minérale, plusieurs sortes de fibres naturelles ont été proposées comme substituants aux fibres synthétiques et artificielles, notamment le chanvre, le lin, le jute (en Europe), ou le palmier dattier, l'alfa et le palmier nain (en Afrique). Les fibres végétales sont composées chimiquement en majorité de cellulose, d'hémicellulose et de lignine.

Actions de recherche

L'objectif de ce travail consiste à utiliser des matériaux biosourcés issus de productions locales. Une étude sur le chanvre a pour but de trouver le pourcentage optimal de fibres de chanvre, de chènevotte ou du mélange des deux afin d'améliorer les propriétés mécaniques et thermiques du biocomposite.

Une seconde étude, en collaboration avec l'université de Biskra, en Algérie, traite de l'utilisation des tiges de palmier. L'ensemble de ces résultats sera appliqué à la fabrication de bétons fibrés.

Productions scientifiques

- ▶ [1] S. Abdelaziz, S. Guessasma, A. Bouaziz, R. Hamzaoui, Johnny Beaugrand, Adam Abdulfatah Souid, « Date palm spikelet in mortar : Testing and modelling to reveal the mechanical performance », *Construction and Building Materials*, vol. 124, 15 octobre 2016.
- ▶ [2] N. Mostefai, R. Hamzaoui, S. Guessasma, A. Aw, H. Nouri, « Microstructure and mechanical performance of modified hemp fibre and shiv mortars : discovering the optimal formulation », *Materials and Design*, vol. 84, 5 novembre 2015.
- ▶ [3] S. Guessasma, R. Hamzaoui, H. Nouri, « Modelling of damage in natural fiber modified mortars », 8th Rilem International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements, 7-9 juin 2016, Nantes (France).
- ▶ [4] N. Mostefai, R. Hamzaoui, S. Guessasma, « Effect of fly ashes on the mechanical performance of hemp modified mortar », CIGOS PARIS, 11-12 mai 2015, ENS Cachan (France).



PARTENAIRES

INRA NANTES, ENS CACHAN,
UNIVERSITÉ DE BISKRA.

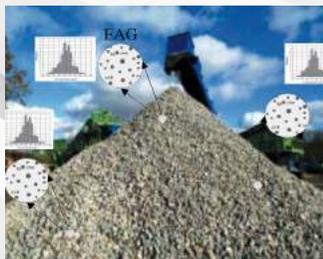
CONTACT

Rabah Hamzaoui
→ rhamzaoui@estp-paris.eu

Hydratation du béton recyclé

Contexte

Figure 1 :
Volume stochastique représentatif.



Une quantité croissante de matériaux recyclés sera utilisée dans la fabrication des bétons dans un futur proche. Il est connu que l'interfacial transition zone (« ITZ »), issue d'un gradient d'hydratation autour des grains, joue un rôle primordial dans la résistance du béton. Cette étude théorique, couplant simulation et expérimentation, traite de la compréhension des phénomènes impliqués dans cette zone critique et de leurs applications aux bétons recyclés.

Actions de recherche

L'évolution de l'ITZ a été modélisée selon la loi d'Arrhenius pendant les phases d'hydratation du matériau. Cette théorie a été appliquée au béton recyclé, notamment un mortier à granulats recyclés. La loi d'Arrhenius modifiée a été implantée dans le logiciel Comsol MP dans un cas à symétrie sphérique et des essais

numériques suivis d'expérimentations ont été pratiqués pour la vérification de la théorie [1].

Dans un premier temps, nous avons défini un volume qui pourrait représenter un ensemble de granulats recyclés. Il s'agit du « volume stochastique représentatif-EAG » (voir fig. 1), décrit par une loi de distribution gaussienne. Par suite, les caractéristiques thermiques des mortiers, la conductivité thermique, la capacité calorifique ainsi que la chaleur de l'hydratation, dégagée 28 jours après le malaxage, ont été mesurées. Le champ de température et le champ d'hydratation ont été calculés suivant la loi d'Arrhenius.

La figure 2 montre le gradient d'hydratation du « volume stochastique représentatif-EAG » d'un mortier recyclé. La valeur d'hydratation est bien plus importante à l'extérieur de la sphère par rapport

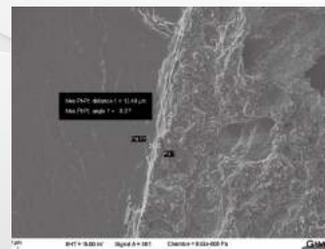


Figure 3 : Observation du décollement de la pâte de ciment dans la zone ITZ.



au cœur. Cela nous donne une indication de la variation du module de Young entre le cœur et l'extérieur. L'observation de l'ITZ a été réalisée par une méthode non destructive dite de réplique. L'évolution de l'état de la zone est ainsi suivie en fonction du temps. L'ITZ reste étroite et le décollement de la pâte de ciment n'est pas observé, malgré le gradient important de l'hydratation (voir fig. 3). Ce résultat est très différent du comportement d'un mortier naturel. Finalement, l'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) montre qu'il y a une « mauvaise hydratation » par la formation anticipée des ettringites. En conclusion, la théorie de la loi d'Arrhenius n'est pas adaptée au béton recyclé.

Production scientifique

► [1] J. Jeong, H. Ramezani, N. Leklou, « Why does the modified Arrhenius' law fail to describe the hydration modeling of recycled aggregate ? », *Thermochimica Acta*, vol. 626, janvier 2016.

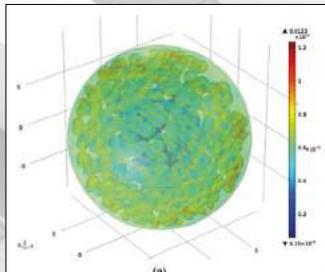


Figure 2 :
Présentation du gradient d'hydratation dans un mortier recyclé.

CONTACT

Jena Jeong
→ jjeong@estp-paris.eu

Faisabilité de réutilisation des bétons de démolition de plus de 50 ans (IdB)

Contexte

Le recyclage des bétons de démolition constitue un enjeu économique et environnemental majeur de notre époque. Ces matériaux contiennent potentiellement des métaux lourds dont les taux peuvent être suffisamment élevés pour qu'ils soient toxiques pour l'être humain et l'environnement dans lequel ils sont présents (comme déchets ou matériaux recyclés). La faisabilité de leur recyclage passe nécessairement par une étude approfondie de l'impact environnemental.

Il a été reporté que plusieurs bétons de démolition des années 50-60 sont susceptibles de contenir des teneurs importantes de chrome et plus précisément du chrome hexavalent. Cet élément qui présente des caractéristiques de mobilité, de solubilité rapide et de toxicité constitue un danger pour l'environnement et l'être humain. Il a fait l'objet de plusieurs études. Par ailleurs, la directive européenne EU 2003/53/CE a fixé la teneur maximale du chrome hexavalent dans les ciments utilisés de nos jours à 2 mg/kg alors que des valeurs excédant les 100 mg/kg ont été reportées.

Actions de recherche

L'étude consiste à caractériser et à comprendre le pouvoir de stockage et de relargage des bétons de démolition par lixiviation des métaux lourds de la matrice cimentaire. L'influence de la carbonatation

des bétons étudiés est prise en compte. Les essais de lixiviation seront principalement réalisés sur des matrices monolithiques, afin de comprendre le mécanisme du relargage du chrome hexavalent de la matrice cimentaire carbonatée ou non, et comparés à des essais sur d'autres formes de matrices, broyées et granulaires.



PARTENAIRES

ÉCOLE FRANÇAISE DU BÉTON (EFB), ENS CACHAN.

CONTACTS

Rabah Hamzaoui

→ rhamzaoui@estp-paris.eu

Abdelkrim Bennabi

→ abennabi@estp-paris.eu

Johan Colin

jcolin@estp-paris.eu

Patricia Bredy Tuffe

→ pbredytuffe@estp-paris.eu

Oumeima Benmaaouia

→ obenmaaouia@estp-paris.eu



Écaillage des bétons avec sels de déverglaçage : influence des paramètres de formulation et de l'amplitude du cycle thermique (IDB)

Contexte

La thématique de durabilité est un axe important de recherche dans le cadre du développement de la chaire Ingénierie des bétons de l'ESTP Paris. Les bétons soumis à une ambiance hivernale rigoureuse – un environnement de gel sévère, des conditions de saturation forte ou modérée avec ou sans la présence de sels de déverglaçage – voient leur durabilité affectée. La résistance et

la tenue des bétons soumis à ces environnements agressifs dépendent des caractéristiques physico-chimiques des matériaux de base, de la sévérité de l'exposition au gel et de la fréquence d'utilisation des sels fondants. Pour une meilleure durabilité, il est donc important de comprendre les mécanismes de base et les facteurs d'influence associés à ce phénomène de dégradation des bétons.

Actions de recherche

L'action des cycles de gel/dégel peut produire deux types de détérioration du béton : la fissuration interne et l'écaillage des surfaces en présence des sels fondants. Deux principaux essais permettent de caractériser la résistance au gel en présence de sels du béton : l'évaluation du réseau de bulles d'air dans la pâte cimentaire et l'essai performantiel d'écaillage. L'objectif de cette recherche est de contribuer à la mise au point de cet essai normalisé et de valider les

conditions expérimentales de sa réalisation sur plusieurs types de formulations de bétons. Des paramètres de formulation tels que la nature du ciment, la présence ou non d'adjuvants entraîneurs d'air, l'humidité relative et l'amplitude du cycle thermique seront investigués afin d'évaluer leur impact sur la résistance des bétons soumis aux cycles de gel/dégel.

Nous avons testé trois cycles thermiques ($-20/+20$, $-10/+10$ et $-5/+5$) et deux types de ciment : un CEM I et un CEM III/A. Nous avons travaillé sur la base de deux formulations de béton avec et sans adjuvant entraîneur d'air afin de pouvoir comparer la résistance de chaque formulation de béton. La recherche consiste à déterminer la localisation de la détérioration, si elle existe. Un suivi du phénomène d'écaillage et un prélèvement des écailles permettront à partir d'investigations physico-chimiques (analyses thermogravimétriques et diffraction de rayons X) de comprendre les mécanismes associés à cette éventuelle dégradation.



PARTENAIRE

ATILH.

CONTACTS

Johan Colin

→ jcolin@estp-paris.eu

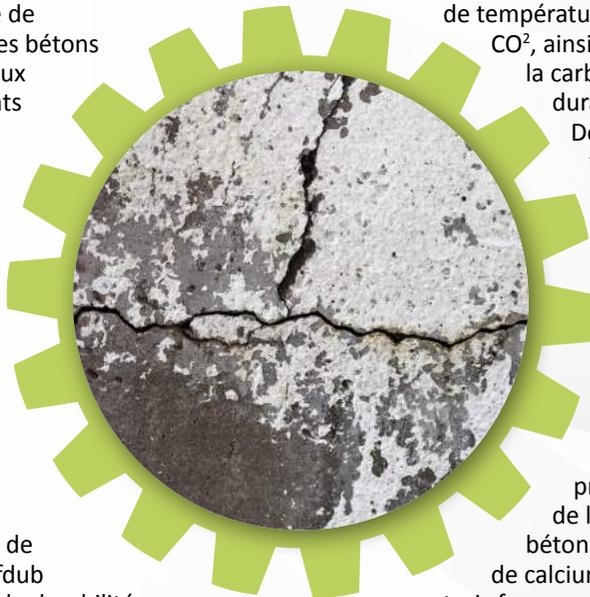
Patricia Bredy Tuffe

→ pbredytuffe@estp-paris.eu

Durabilité des bétons : conditions de stabilité des produits de carbonatation des matériaux cimentaires (IdB)

Contexte

Au sein de la chaire d'enseignement et de recherche Ingénierie des Bétons, le phénomène de carbonatation, cause majeure de dégradation des bétons et des matériaux traités aux liants hydrauliques, est largement étudié par le biais de thèses et d'actions de recherche conduites dans le cadre de stages de master. Ces travaux s'appuient sur ceux du projet de recherche Perfdub (Performance de durabilité des bétons) qui aborde entre autres la carbonatation et les différents modes opératoires pratiqués en France et au niveau européen de l'essai de carbonatation accéléré.



Actions de recherche

Le laboratoire IdB approfondit la stabilité des produits formés par carbonatation des bétons en fonction des conditions de température et du taux de CO_2 , ainsi que l'impact de la carbonatation sur la durabilité des bétons. Deux types de formulation des bétons à base de CEM I et CEM III sont en cours d'étude et soumis à l'essai de carbonatation accéléré en choisissant trois taux de CO_2 : 3 %, 10 % et 50 %. Les produits formés lors de la carbonatation des bétons sont le carbonate de calcium présent sous trois formes cristallographiques – la calcite, l'aragonite et la vatérite. Nous nous intéressons à la formation et à la stabilisation de l'aragonite et de la vatérite à pression et température ambiantes en fonction de la teneur

en CO_2 de l'atmosphère d'essai. La présence de constituants principaux du ciment autres que le clinker (laitiers, cendre...) est également envisagée. Des investigations physico-chimiques seront menées afin d'identifier les conditions de formation et de stabilisation.

PARTENAIRE

ATILH.

CONTACTS

Johan Colin
→ jcolin@estp-paris.eu

Patricia Bredy Tuffe
→ pbredytuffe@estp-paris.eu



Performances rhéologique et mécanique des mélanges à basse teneur en clinker : substitution du clinker par des coproduits ou d'additions minérales (IdB)

Contexte

Dans le cadre de son engagement concernant les gaz à effet de serre, l'industrie cimentière a déjà diminué ses émissions en améliorant le rendement énergétique de ses fours par la réduction de la consommation des combustibles fossiles. En revanche, la part « chimique » des émissions, due à la décarbonatation du calcaire, est pratiquement irréductible et un moindre impact de ce paramètre passe par une plus grande efficacité de constituants autres que le clinker. Cette voie revient à abaisser la proportion de clinker dans le ciment mis sur le marché.

De nombreuses études ont été conduites afin de développer des ciments à fort taux de substitution en clinker et à performances mécaniques comparables aux ciments dits Portland. Des études plus récentes sont en cours d'exploration

fondées soit sur une double substitution, soit sur des mécanismes d'activation desdits produits. Les résultats au niveau mécanique sont prometteurs.

Actions de recherche

Dans le cadre de cette action de recherche, on souhaite vérifier les résultats déjà obtenus dans la littérature pour les compositions [clinker-métakaolin-calcaire], soit [CK-MK-LL], et évaluer l'extension potentielle vers les compositions [clinker-fumée de silice-calcaire], soit [CK-D-LL]. Un autre volet de cette recherche consiste à créer de nouvelles surfaces par des mécanismes de broyage dont les paramètres ont été bien identifiés et à exploiter ainsi cette nouvelle propriété dans l'amélioration des performances mécaniques des mortiers ainsi formulés.

La démarche expérimentale se fera sur du mortier avec différents taux de substitution du ciment, en dépassant les seuils fixés par la norme NF EN 206-1. Les caractérisations des mélanges ainsi formés se feront à partir d'essais rhéologiques et mécaniques.



PARTENAIRES

CONDENSIL, OMYA.

CONTACTS

Rabah Hamzaoui

→ rhamzaoui@estp-paris.eu

Patricia Bredy Tuffe

→ pbredytuffe@estp-paris.eu

Johan Colin

→ jcolin@estp-paris.eu

Ouvrabilité des matériaux cimentaires : développement d'une approche globale de caractérisation (IdB)

Contexte

Les propriétés de mise en œuvre des mortiers à base de ciments multiconstituants tels que le laitier, la fumée de silice, les métakaolins... et des coulis hydrauliques dépendent essentiellement de l'état frais de ces matériaux. Cet état frais est caractérisé au sein des laboratoires universitaires, ainsi que dans ceux des producteurs de béton, des centres de recherche des entreprises et des organismes techniques, par des essais classiques tels que l'étalement à la table à secousses, temps d'écoulement et plus récemment l'étalement au minicône. Parallèlement à ces essais, d'autres grandeurs obtenues à partir du suivi de la prise du ciment grâce à une aiguille normalisée, suivi rhéologique de l'évolution de la viscosité



plastique, ont été investiguées pour caractériser l'ouvrabilité des matériaux à base de liants hydrauliques. Cette thématique de recherche s'inscrit dans l'axe d'ouvrabilité de l'Institut de Recherche en Constructibilité de l'ESTP Paris.

Actions de recherche

La démarche expérimentale consiste à formuler des mortiers normalisés ou non. Les propriétés rhéologiques et thermiques et la cinétique de prise seront suivies avec des outils classiques de laboratoire et des techniques spécifiques utilisées pour caractériser l'état frais de ces matériaux. Ces grandeurs seront comparées entre elles afin d'élaborer un seul et même outil pour la prévision de ces propriétés.

PARTENAIRE

ÉCOLE FRANÇAISE DU BÉTON (EFB).

CONTACTS

Johan Colin
→ jcolin@estp-paris.eu

Patricia Bredy Tuffe
→ pbredytuffe@estp-paris.eu

Rabah Hamzaoui
→ rhamzaoui@estp-paris.eu



Liste des thèses et nouvelle thèse

Liste des thèses de doctorat en cours à l'échelle du matériau

- 1 « Optimisation et caractérisation des enrobés coulés à froid », Arbia Garfa, Anne Dony, Alan Carter.
- 2 « Étude de l'impact de la carbonatation des bétons sur les propriétés



d'immobilisation (lixiviation) des métaux lourds (Cr +6) par les matrices cimentaires », Oumeima Ben Maaouia, Abdelkrim Bennabi, Rabah Hamzaoui.

- 3 « Optimisation d'une méthode de production de fines pouzzolaniques par Mécano-Alkali-Activation et de leur ouvrabilité dans les matériaux cimentaires », Othmane Bouchenafa, Abdelkrim Bennabi, Johan Colin, Rabah Hamzaoui.

- 4 « Influence des paramètres technologiques de formulation et de mise en œuvre sur les aspects de parement », Edgar Chuta, Jena Jeong.

- 5 « Zeolite treatment in heavy metal contaminated sediment with the use of solidification and stabilization », Theodora-Dafni Stavrika, Abdelkrim Bennabi, Nicholas Hytiris.

Nouvelle thèse

« Optimisation d'une méthode de production de fines pouzzolaniques par Mécano-Alkali-Activation et de leur ouvrabilité dans les matériaux cimentaires »

- Directeur de thèse : **Rabah Hamzaoui**, rhamzaoui@estp-paris.eu
- Coencadrants : **Abdelkrim Bennabi**, **Johan Colin**
- Doctorant : **Othmane Bouchenafa**, obouchenafa@estp-paris.eu

Financement :
Fondation ESTP Paris

Contexte et objectifs :
l'objectif de cette thèse est double : mise au point d'un procédé industriel de fabrication d'un nouveau matériau de construction et optimisation de ses performances (ouvrabilité, propriétés environnementales, coût). Des coproduits industriels tels que des laitiers

ou des cendres volantes vont être activés mécaniquement avec des alcalins afin de permettre la substitution d'une part importante de clinker.

Verrous scientifiques

1. Une meilleure compréhension des mécanismes d'alkali-activation et des différentes réactions chimiques (hydrauliques, pouzzolaniques) qui entrent en jeu.
2. L'étude de multiples configurations (différents coproduits et agents alcalins dans diverses combinaisons) afin d'optimiser le process.
3. L'obtention d'un compromis équilibré entre les performances mécaniques, environnementales et financières pour l'utilisation du matériau.

ÉCHELLE 2

La constructibilité des ouvrages

Objectifs

Accompagner et faciliter la mise au point des objets constitutifs du cadre de vie en conformité avec les attentes des utilisateurs finals.

Axes scientifiques

On retrouve à cette échelle les travaux sur les performances des structures de génie civil nucléaire, leurs interactions externes ou internes, l'efficacité énergétique des bâtiments, les études sur le confort thermique et les composants de façade et d'enveloppe. L'analyse fonctionnelle d'un besoin, la maîtrise des risques d'un projet de construction et les méthodes de représentation d'un ouvrage en BIM sont plus spécifiquement déployées à l'échelle de l'ouvrage, mais, en fonction des sujets d'étude, les dimensions de l'élément ou du territoire peuvent être considérées.

Mots clés

Cohérence du CDCF, traitement des données (scénarisation), gestion des compétences, gestion de la qualité, gestion des risques, simulation des performances, représentation de l'ouvrage, ouvrabilité (pénibilité et sécurité), gestion des interfaces, réduction des pertes, commissioning.

Dynamique transitoire (GCN)

Étude des phénomènes d'ébranlement des structures sous chargement transitoire

Contexte

Dans le processus de conception d'une installation nucléaire de base, la sûreté des structures revêt un aspect primordial.

Le dimensionnement du génie civil ainsi que la qualification des matériaux à des sollicitations dynamiques doivent tenir compte des accélérations qu'ils subissent. Ces accélérations doivent intégrer les mouvements sismiques et ceux consécutifs à un impact d'avion (à fréquence de coupure plus élevée).

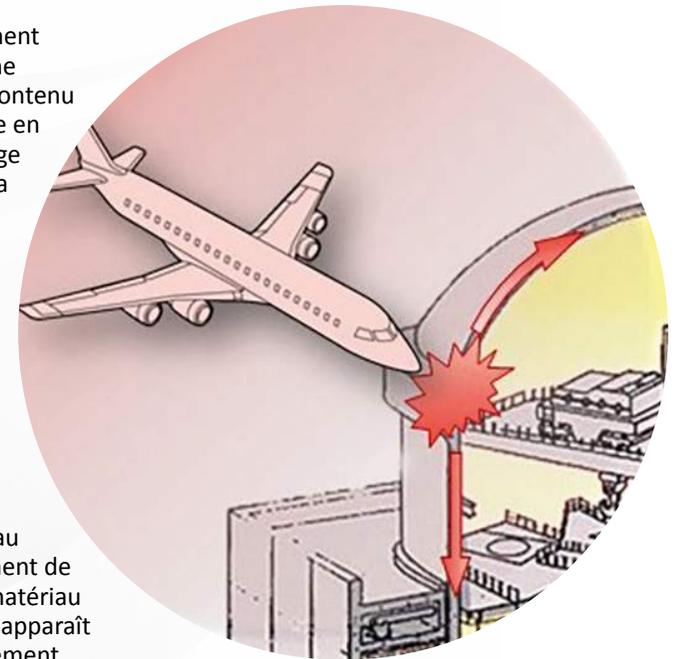
Les méthodologies actuelles évaluant ces ébranlements reposent sur des analyses numériques de type éléments finis, linéaires, dont les phénomènes dissipatifs sont

représentés par un amortissement de Rayleigh. Pour parvenir à une représentation pertinente du contenu vibratoire, il convient de mettre en place un raffinement de maillage difficilement compatible avec la taille des structures étudiées.

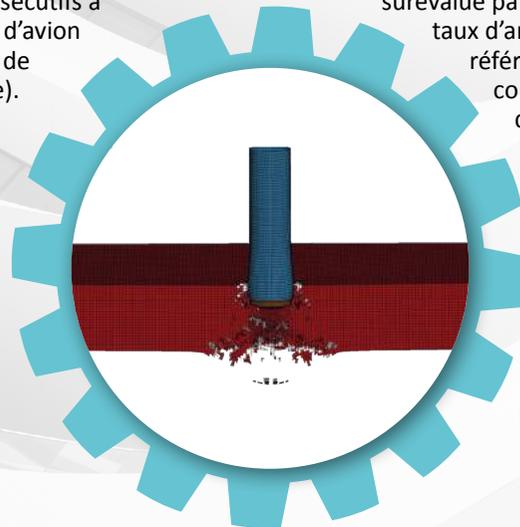
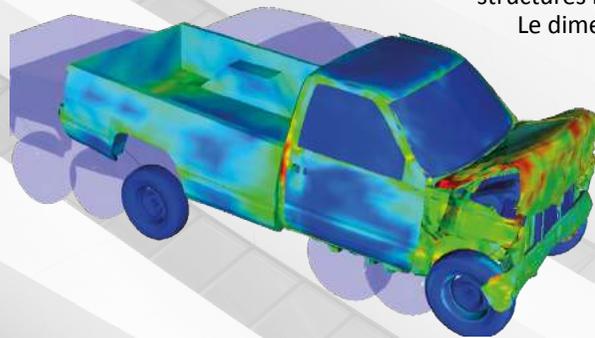
Concernant la dissipation, le recours à la méthode de Rayleigh repose sur une connaissance a priori de la bande de fréquences de réponse de la structure. En dehors de cette bande de fréquences, le taux d'amortissement associé à la matrice d'amortissement est

surévalué par rapport au taux d'amortissement de référence du matériau considéré. Il apparaît donc également

légitime de remettre en question l'adoption d'une représentation de l'amortissement par cette pratique usuelle considérant un taux d'amortissement uniforme sur toute



la gamme de fréquence. Afin d'intégrer les insuffisances des modèles industriels employés, et pour garantir le respect des principes de sûreté, des marges de dimensionnement sont mises en place. L'évaluation de ces vibrations induites présente ainsi un enjeu fort vis-à-vis de la constructibilité de ces installations.



PARTENAIRES

IFSTTAR, ENS CACHAN, ISAE TOULOUSE, AREVA, EDF.

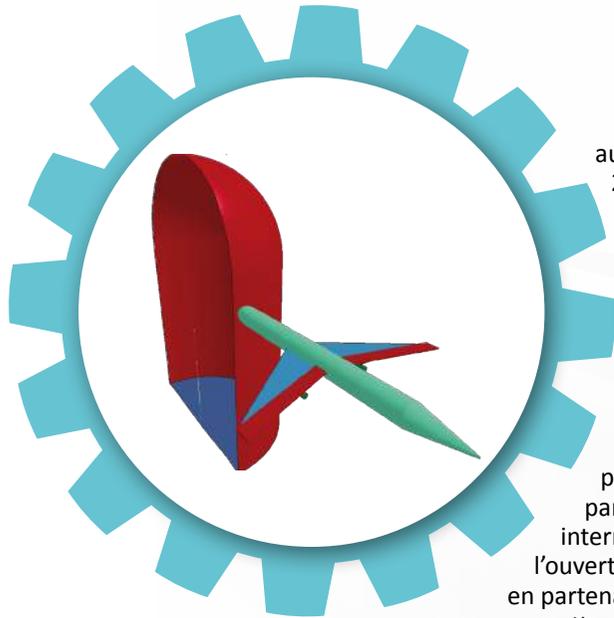
CONTACTS

Guillaume Hervé-Secourgeon

→ gherve@estp-paris.eu

Christophe Rouzaud

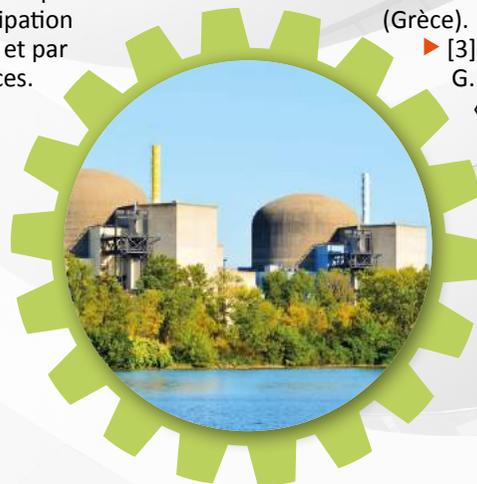
→ crouzaud@estp-paris.eu



Actions de recherche

Afin d'enrichir les méthodologies industrielles employées et de permettre une meilleure représentation du comportement de la structure avec un objectif de constructibilité, une démarche couplant une analyse temporelle et non-linéaire de la zone de choc avec une approche fréquentielle de traitement de l'ébranlement par l'utilisation de la théorie variationnelle des rayons complexes (TVRC) a été entreprise au travers de la thèse de Christophe Rouzaud (Cifre-Areva), soutenue en mars 2015 et dont plusieurs travaux [1, 2, 3] ont été publiés

au cours de la période 2015-2016. L'efficacité de la méthode numérique employée a ainsi pu être éprouvée pour la qualification des structures nucléaires lors d'un impact d'avion. La caractérisation et la représentation des phénomènes dissipatifs viennent alors compléter ces travaux de recherche du pôle RENON. Pour cela, une participation au benchmark international Iris Phase 3 de l'OCDE et l'ouverture d'une thèse en octobre 2016, en partenariat avec EDF Septen et R & D sur cette problématique, ont été décidées. L'objectif sera alors d'exploiter les campagnes d'essais récentes (VTT Impact et Iris Phase 3) pour définir une démarche scientifique systématique et caractériser la dissipation au cours du temps et par bande de fréquences. L'implantation dans le code de calcul Europlexus des valeurs caractérisées sera ensuite testée par un benchmarking de résultats d'essais divers.



Productions scientifiques

- ▶ [1] C. Rouzaud, F. Gatuingt, G. Hervé, O. Dorival et N. Moussallam, « Influence of non-linearities in the signal of an aircraft impact through a parametric study [Influence of the aircraft crash induced local nonlinearities on the overall dynamic response of a RC structure through a parametric study?] », Nuclear Engineering and Design, vol. 298, 2016.
- ▶ [2] C. Rouzaud, F. Gatuingt, G. Hervé et O. Dorival, « Application of the variational theory of complex rays (VTCR) to the determination of shock induced vibration in a reinforced concrete structure », Susi 2016, 14th International Conference on Structures under Shock and Impact (Grèce).
- ▶ [3] C. Rouzaud, F. Gatuingt, G. Hervé et O. Dorival, « Application of the variational theory of complex rays (VTCR) to the determination of shock induced vibration in a reinforced concrete structure », International Journal of Safety and Security Engineering, vol. 6, n° 2, juin 2016.

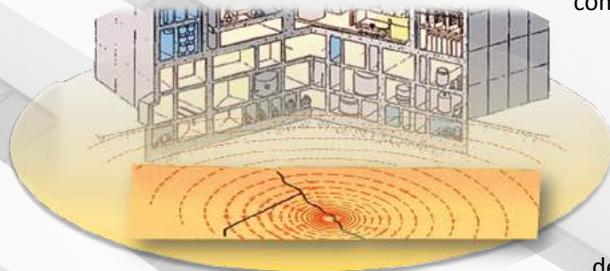


Analyse des structures sous séisme (GCN)

Analyse du comportement linéaire équivalent en ingénierie sismique

Contexte

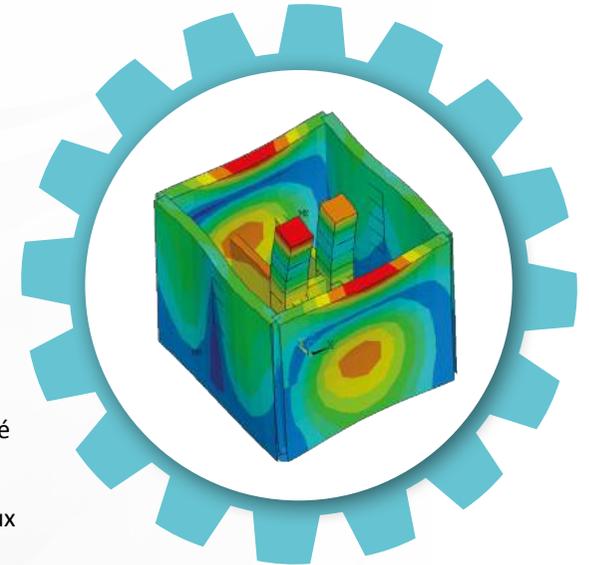
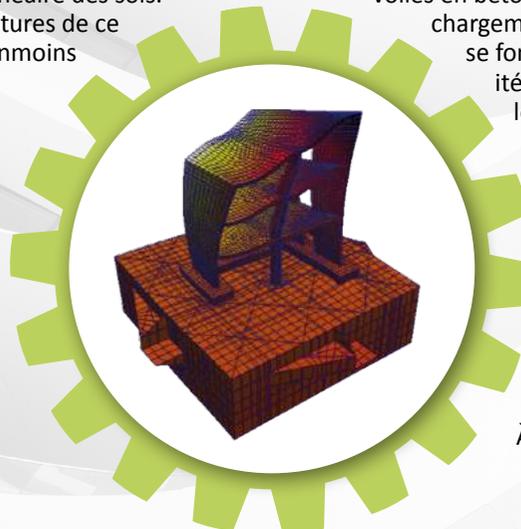
Un des problèmes récurrents de la constructibilité du génie civil est le comportement non-linéaire des structures sous chargements sismiques. Dans le cadre de l'amélioration des méthodes de calcul, les géotechniciens utilisent industriellement une méthode de linéarisation équivalente qui, pour des déformations limitées, rend compte des effets de comportement non-linéaire des sols. L'application aux structures de ce concept présente néanmoins une divergence de résultats par rapport aux campagnes expérimentales due à l'utilisation d'une valeur instantanée de la réponse ne représentant pas entièrement les caractéristiques dynamiques du transitoire lors d'un séisme.



Actions de recherche

L'objectif est alors de mettre à disposition de l'ingénierie, par deux thèses sous partenariat EDF Septen, une méthode analogue rendant compte des comportements non-linéaires du béton armé par linéarisation équivalente. En s'appuyant sur ces recherches, quatre stages avec UC Berkeley et le laboratoire californien du Peer ont été mis en place.

Une première approche [1] dédiée aux voiles en béton armé sous chargement de cisaillement se fonde sur un calcul itératif qui explique le comportement non-linéaire en actualisant les valeurs caractéristiques des voiles (fréquence et amortissement) en fonction de leur endommagement. À chaque itération,



le déplacement maximal en tête des voiles est alors calculé par la méthode spectrale et l'indicateur de dommage, le drift, est déterminé. Le processus d'actualisation fait ainsi intervenir des paramètres de conception et des caractéristiques des voiles à l'état ultime. Cette méthode a ainsi pu être appliquée et validée sur les voiles de la campagne Safe [2]. L'utilisation des courbes de dégradation de la fréquence et d'augmentation de l'amortissement dans la méthode linéaire équivalente proposée nous a permis, avec un coût de calcul modeste, d'avoir une bonne estimation du

PARTENAIRES

IFSTTAR, EDF.

CONTACTS

Pierre Labbé

→ pierre.labbe@edf.fr

Guillaume Hervé-Secourgeon

→ gherve@estp-paris.eu

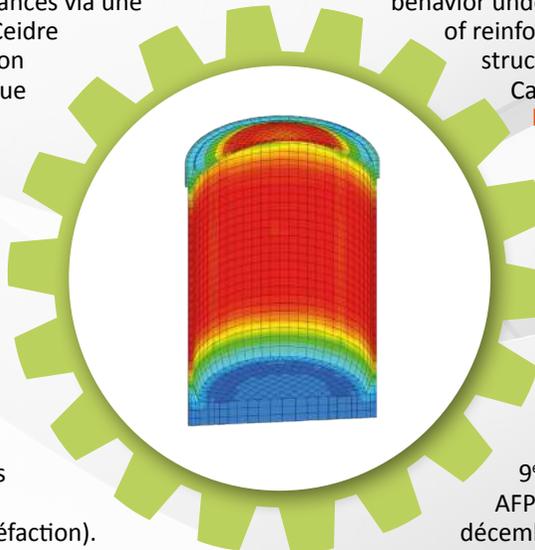
déplacement en tête des voiles dans un comportement non-linéaire. La méthode proposée sera testée au moyen de résultats d'essais à l'échelle d'une structure telle que la maquette Smart.



la méthode avec différents résultats expérimentaux liés aux structures en béton armé et celles métalliques, et enfin à proposer à l'ingénierie sismique de nouvelles méthodologies en utilisant les résultats de linéarisation

La seconde méthodologie [3] étudiée porte, quant à elle, sur une approche plus générale d'analyses systématiques des réponses des structures sous chargement sismique. L'identification des systèmes linéaires équivalents est alors effectuée dans le domaine fréquentiel. Plusieurs configurations ont pu être testées telles que différents modèles de comportements (élastique parfaitement plastique à endommageant) et différents signaux (artificiel et réel). Les résultats ainsi obtenus par l'identification de systèmes linéaires équivalents dans le domaine fréquentiel ont une bonne correspondance avec les résultats expérimentaux. De plus, les systèmes linéaires équivalents trouvés par cette méthode permettent d'établir les spectres transférés intégrant les non-linéarités. L'étape suivante nous amènera à comparer les résultats de

équivalente. En marge de ces actions, des travaux ont été lancés via une thèse avec EDF Ceidre et en collaboration avec la thématique géotechnique de l'IRC. L'objectif est la constructibilité dans des conditions de site difficiles associées à des niveaux de séisme élevés en intégrant pour le sol des phénomènes irréversibles (tassement, liquéfaction).



Productions scientifiques

- ▶ [1] M.-B. Hocine, F. Toutlemonde, P. Labbé et G. Hervé, « Linearization of behavior under seismic solicitation of reinforced concrete structures », 9^e Colloque national AFPS'15, Ifsttar, décembre 2015.
- ▶ [2] M.-B. Hocine, F. Toutlemonde, P. Labbé et G. Hervé, « Linearization of behavior under seismic solicitation of reinforced concrete structures », Benchmark Cash, 2015.
- ▶ [3] A.T. Nguyen, J.-F. Semblat, P. Labbé et G. Hervé, « Analyse systématique du concept de comportement linéaire équivalent en ingénierie sismique par minimisation dans le domaine fréquentiel », 9^e Colloque national AFPS'15, Ifsttar, décembre 2015.

Dispositions constructives (GCN)

Méthodes de dimensionnement et qualification de procédés et matériaux de construction innovants

Contexte

Les enjeux économiques liés au nucléaire s'accompagnent toujours d'exigences élevées de fonctionnement, pour que la sûreté de ces installations soit garantie, et en particulier dans le génie civil, où structures et éléments importants pour la protection (EIP) doivent être stables, résistants et conserver leur intégrité. À cet égard, de nombreux événements ont été considérés lors de la conception des infrastructures, les accidents spécifiques à l'industrie nucléaire en premier lieu. Si les solutions classiques de construction en béton armé parviennent à répondre à ces exigences croissantes, de véritables défis en termes de constructibilité apparaissent avec des infrastructures toujours plus complexes à bâtir, ce qui se traduit par des coûts élevés. C'est pourquoi l'optimisation et l'adaptation du calcul de ferrailage par rapport à ces structures complexes restent des enjeux majeurs dans le dimensionnement de nouvelles installations. Et de nouveaux procédés

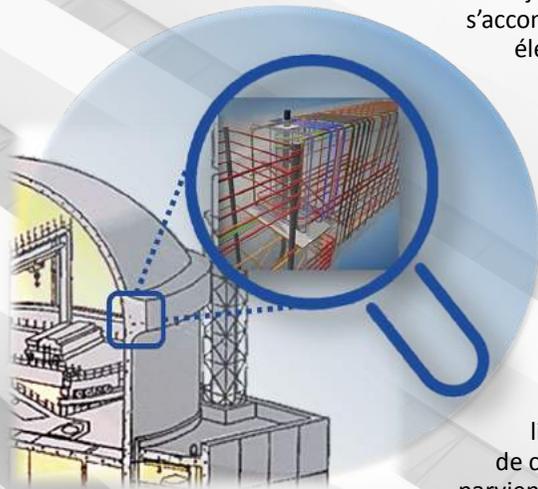
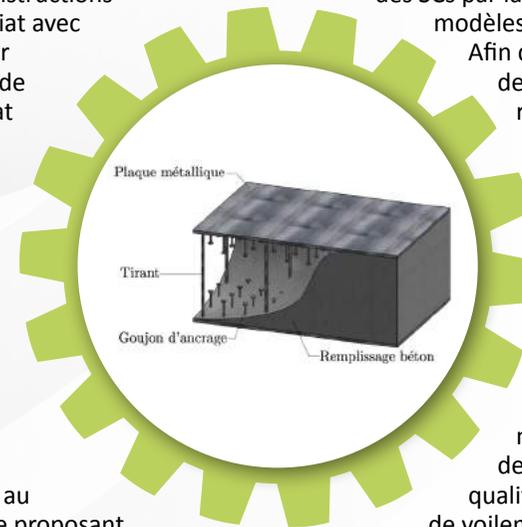
constructifs se développent, comme la construction modulaire préfabriquée à l'aide d'éléments-sandwichs.

Actions de recherche

Les actions de recherche liées à cette thématique sur les dispositions constructives pour le génie civil nucléaire se concentrent autour de deux thèses, l'une sur l'étude des constructions modulaires en partenariat avec EDF Septen et l'autre sur l'optimisation du calcul de ferrailage en partenariat avec le bureau d'études Géodynamique et Structures. À cela est venu notamment s'ajouter un stage de master en collaboration avec l'université de Ryerson (Toronto, Canada).

La qualification de matériaux modulaires innovants s'est adossée au projet européen Science proposant

de construire un référentiel normatif pour cette nouvelle technologie, nommé éléments SCs. Plusieurs sociétés et laboratoires universitaires interviennent dans ce projet, dont EDF, en charge avec ses partenaires académiques (LMT, IRC-Renon et KIT) de l'étude du comportement aux températures accidentelles, de l'ordre de 200 °C. C'est en périphérie de ce projet de recherche que s'inscrivent les travaux de thèse [1] qui ont pour finalité de caractériser le comportement thermomécanique des SCs par la définition de modèles analytiques. Afin d'apporter des éléments de réponse, une campagne expérimentale a été conçue. Les modèles analytiques construits ont ainsi été appliqués et validés à l'échelle de la maille élémentaire des SCs, pour qualifier le phénomène de voilement local.

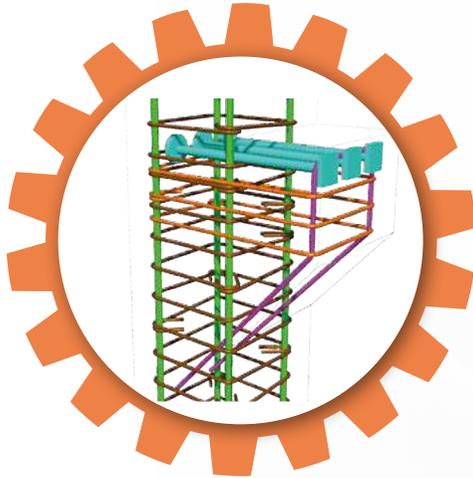


PARTENAIRES

IFSTTAR, ENS CACHAN, EDF, GÉODYNAMIQUE ET STRUCTURES.

CONTACTS

Guillaume Hervé-Secourgeon
→ gherve@estp-paris.eu
Christophe Rouzaud
→ crouzaud@estp-paris.eu



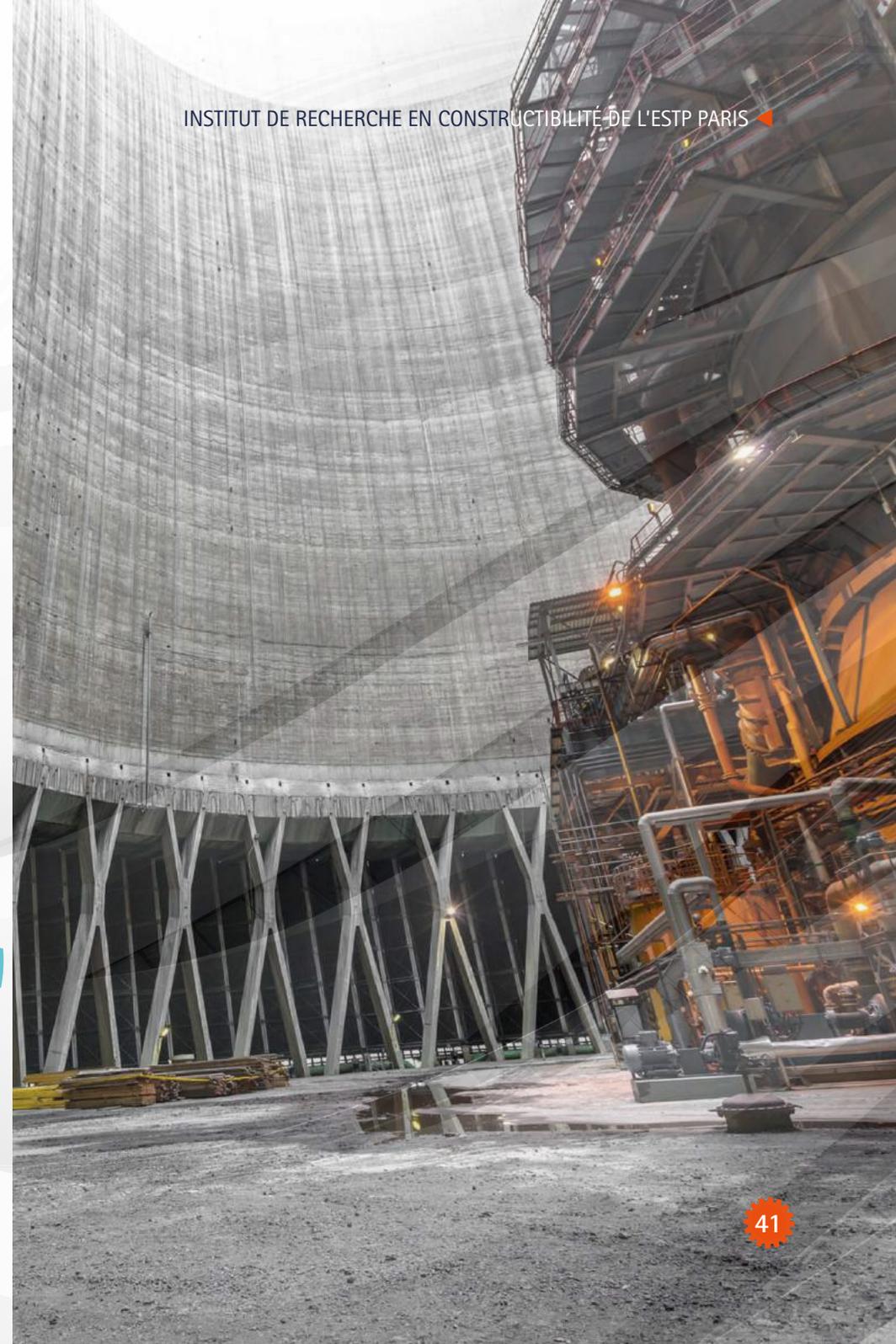
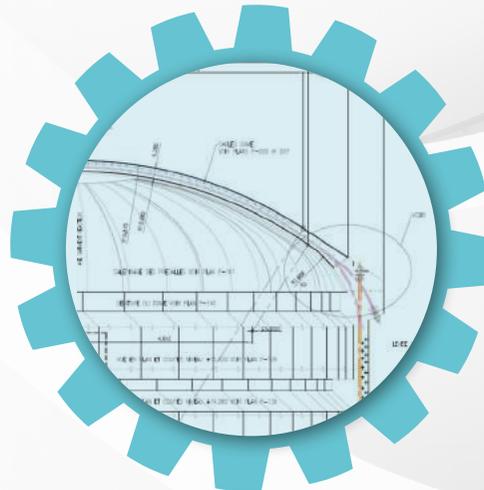
En perspective : la nécessité de se pencher plus finement sur la problématique des transferts thermiques aux interfaces.

La conception et la justification des installations reposent souvent sur un équilibre des efforts au travers de modèles coques de type éléments finis. Cette méthodologie conduit dans ces zones de discontinuité, ou zones massives de béton, à une approximation qui peut dériver vers une surévaluation, notamment en ferrailage. D'autres approches plus représentatives de la phénoménologie du béton armé existant, telles que les méthodes bielle-tirant. Ces méthodes restent néanmoins coûteuses et trop dépendantes du sens de l'ingénieur [2]. La recherche porte sur l'automatisation de la définition d'un schéma bielle-tirant optimisé. La méthodologie a pu, entre autres, être étudiée sur des exemples 2D de support de pont polaire. Le modèle

défini est alors mécaniquement stable et a pu être vérifié en termes d'énergie de déformation, de répartition des contraintes et de résistance des matériaux. L'étape suivante portera sur l'approche des cas 3D.

Productions scientifiques

- ▶ [1] A. Sauvageon, « Instabilités locales de structures composites acier-béton aux températures élevées », thèse de doctorat, ENS Cachan, université Paris Saclay, 2016.
- ▶ [2] J. Martinez Barredo, H. Xi, L. Hu, G. Mendoza Chavez et C. Rouzaud, « Comparaison de modèles de calcul de ferrailage », Pier, ESTP Paris, 2016.



Constructibilité et commissionnement des systèmes de ventilation : qualité du climat intérieur et efficacité de ventilation



Contexte

Le commissionnement est un processus qui permet de garantir les performances définies en phase de conception, conformément aux exigences fixées par les normes ainsi qu'aux besoins opérationnels du client. Il s'inscrit dans une démarche de constructibilité qui vise à définir la performance très en amont du projet. Le commissionnement de la ventilation se limite aujourd'hui à des tests de mise en service réalisés à la livraison. Si les protocoles de commissionnement sont bien définis pour les systèmes de ventilation mécanique, ce n'est pas le cas pour les systèmes de ventilation naturelle. Cette problématique fait l'objet des travaux de recherches menées à l'IRC qui consistent à analyser et à développer des méthodes et des protocoles d'évaluation expérimentale adaptés aux systèmes de ventilation naturelle.

Actions de recherche

Les actions de recherche considèrent, d'une part, les performances globales de la ventilation sur les espaces confinés – le confort thermique et la qualité

de l'air intérieur – et, d'autre part, les performances intrinsèques – le renouvellement et la distribution de l'air.

Concernant les performances globales, une des actions consiste à identifier les limites des méthodes d'évaluation du confort thermique en fonction du type de ventilation, par le test des différentes théories et indices d'évaluation. Ces tests permettent d'estimer l'écart entre le confort thermique calculé à partir des mesures physiques (selon les théories statique et adaptative) et celui perçu par les occupants (par le biais des indices dérivés de questionnaires sur la sensation et la perception subjective).

Quant aux performances intrinsèques traduites par les taux de ventilation et les indices d'efficacité de ventilation (capacité d'un système de ventilation à dépolluer ou à approvisionner en air neuf un local), notre action concerne le développement d'une méthode de mesure fondée sur les techniques de gaz traceurs, valable en ventilation naturelle. Cela consiste à proposer une combinaison robuste de techniques utilisées en ventilation mécanique pour la mesure des paramètres et indices d'efficacité de renouvellement d'air : les âges moyens (temps entre l'entrée

d'une particule d'air et son arrivée à un point donnée du local). Cette méthode a été déjà testée sur un bâtiment du campus de l'ESTP Paris, à Cachan.

Productions scientifiques

- [1] Y. Allab, A. Kindinis, F. Causone, A.-C. Bayeul-Lainé, S. Simonet, « Indoor climate assessment of a classroom with mechanical ventilation and operable windows », 35th AIVC Conference, 23 au 24 septembre 2015, Madrid (Espagne).
- [2] Y. Allab, A. Kindinis, F. Causone, A. Tatti, S. Simonet, A.-C. Bayeul-Lainé, « Ventilation rates and thermal comfort assessment in a naturally ventilated classroom », 12th Rehva World Congress, Clima 2016, 22-25 mai 2016, Aalborg (Danemark).
- [3] Y. Allab, M. Pellegrino, X. Guo, A. Kindinis, E. Nefzaoui, « Energy efficiency of existing buildings : a case study of a French higher education campus », Conférence francophone de l'International Building Performance Simulation Association, 23-24 mai 2016, Champs-sur-Marne (France).
- [4] Y. Allab, M. Pellegrino, X. Guo, E. Nefzaoui, A. Kindinis, « Energy and comfort assessment in educational building, case study in a French university campus », Energy and Buildings (article en cours de révision).

PARTENAIRES

EFFICACITY, ENSAM,
EERG RESEARCH GROUP -
POLITECNICO DI MILANO,
LABORATOIRE MÉCANIQUE
DE LILLE.

CONTACT

Andrea Kindinis
→ akindinis@estp-paris.eu

Constructibilité et évaluation de la performance des nouveaux composants d'enveloppe du bâtiment

Contexte

Le secteur de la construction est en évolution rapide, poussé par les exigences d'efficacité énergétique et de haute qualité du confort intérieur. Des nouvelles solutions de composants d'enveloppe transparents et opaques à comportement dynamique comme de nouveaux terminaux de systèmes de chauffage/refroidissement apparaissent sur le marché. L'IRC a pour objectif d'accompagner le développement technologique de ces éléments, par une approche de constructibilité, qui propose une évaluation globale du bâtiment et des solutions adaptées aux nouveaux impératifs. L'évaluation de la performance de composants pariéto-dynamiques se fait ainsi selon plusieurs méthodes : la caractérisation numérique et expérimentale des performances de nouveaux composants d'enveloppe ; la mise en place d'une approche holistique qui, numériquement, permet une évaluation de la performance globale du bâtiment.

Actions de recherche

Une action concerne la caractérisation des indices de performance et

thermo-énergétiques des nouveaux composants d'enveloppe à travers la définition de nouvelles méthodologies de mesure expérimentale. À partir d'une analyse critique des procédures existantes, des nouvelles typologies de tests ont été proposées et sont en cours de vérification. Les procédures expérimentales ont été étudiées à travers une modélisation numérique et ensuite vérifiées en comparant les résultats numériques et tests sur des cellules tests de nouvelle conception.

Une deuxième action concerne le développement d'une méthodologie pour l'évaluation de la performance globale du bâtiment durant la phase de préconception. À ce moment, le bâtiment peut encore être considéré comme un objet sans une forme bien définie, qui doit pourtant répondre à un cahier des charges fonctionnel. Afin de favoriser l'innovation technologique, tout en garantissant la performance globale du bâti, la méthodologie vise à : 1) fournir des règles d'aide à la décision pour la conception ; 2) intégrer les performances des composants d'enveloppe innovants (nouveaux matériaux, nouvelles configurations, logiques de contrôle et pilotage dynamiques) ; 3) évaluer parallèlement la performance énergétique, le confort (thermique, lumineux et

acoustique) et l'analyse de cycle de vie à l'aide de plusieurs outils de simulation numérique.

Productions scientifiques

- ▶ [1] G. Cattarin, F. Causone, A. Kindinis, L. Pagliano, « Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation. A literature review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, février 2016.
- ▶ [2] G. Cattarin, L. Pagliano, F. Causone, A. Kindinis, « Modélisation et simulation d'une cellule test en plein air pour l'évaluation énergétique des composants d'enveloppe », Conférence francophone de l'International Building Performance Simulation Association, 23-24 mai 2016, Champs-sur-Marne (France).
- ▶ [3] F. Contrada, Y. Allab, A. Kindinis, C. Gobin, A. Langlois, E. Blanc, D. Ohlmann, G. Togo, A. Collet, A. Tatti, D. Ait Ali Yahia, « Bâtiville : conception d'un îlot urbain optimisé », Conférence francophone de l'International Building Performance Simulation Association, 23-24 mai 2016, Champs-sur-Marne (France).



PARTENAIRES

EFFICACITY, EERG RESEARCH GROUP - POLITECNICO DI MILANO, COST TU1403, LABORATOIRE BESTLAB - EDF, FACULTY OF ARCHITECTURE AND FINE ART - NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY - NTNU.

CONTACT

Andrea Kindinis
→ akindinis@estp-paris.eu

Comaintenance des tunnels en utilisant le BIM

Contexte

Le BIM est une approche de modélisation de plus en plus utilisée dans le domaine du BTP pour faciliter l'accès à l'information. Il permet de créer des modèles tridimensionnels en y intégrant des paramètres et des informations pratiques, et peut notamment faciliter les travaux et la maintenance des ouvrages souterrains.

Actions de recherche

Notre travail doit faciliter la maintenance d'un tunnel pendant son cycle d'exploitation, grâce à la méthode de comaintenance. Un centre de gestion de la maintenance a pour rôle de coordonner la maintenance de tous les systèmes, en ayant pour principal support une maquette BIM. Ce travail décrit les étapes pour l'élaboration d'une telle maquette. Dans un premier temps, il propose un aperçu de la maintenance actuelle des tunnels, en s'appuyant sur les documents officiels de l'Association française des tunnels et des espaces souterrains (Aftes). Puis il montre l'intérêt de méthodes analytiques qui permettent de structurer la maquette. D'abord, l'analyse fonctionnelle cerne la nature du besoin de maintenance et donc détermine le choix des éléments représentés dans le modèle BIM. Ensuite, l'intégration dans la maquette des états de service des différents éléments offre une mise à jour automatique de celle-là. Elle permet de connaître en temps réel l'état de dégradation du tunnel et la maintenance à prévoir.

Production scientifique

▶ [1] H. Sami, O. Doukari, N. Ziv, « Development of a BIM Model adapted for the co-maintenance of Tunnels », 1st International BIM Conference, septembre 2016, Glasgow (Royaume-Uni).



PARTENAIRE

EGIS RAIL.

CONTACT

Omar Doukari

→ odoukari@estp-paris.eu



Liste des thèses et nouvelles thèses

Thèses de doctorat en cours à l'échelle des ouvrages

- 1 « **Méthode d'ingénierie pour l'étude du tassement et du risque de liquéfaction des digues sous séisme** », Ziad Kteich, Pierre Labbé, Abdelkrim Bennabi, Jean-François Semblat.
- 2 « **Conception de structures massives en béton armé par treillis bielles-tirants générés automatiquement** », Gustavo Mendoza Chavez, Guillaume Hervé-Secourgeon, Christophe Rouzaud, Patrick De Buhan.
- 3 « **Analyse systématique du concept de comportement linéaire équivalent en ingénierie sismique** », Anh Thuong Nguyen, Guillaume Hervé-Secourgeon, Pierre Labbé, Jean-François Semblat.
- 4 « **Linéarisation du comportement sous séisme de structures à voiles en béton armé** », Mohamed-Bachir

Hocine, Guillaume Hervé-Secourgeon, Pierre Labbé, François Toutlemonde.

- 5 « **Experimental characterization of innovative envelope elements** », Giulio Cattarin, Andrea Kindinis, Lorenzo Pagliano.
- 6 « **Confort thermique et optimisation énergétique des espaces confinés avec stratégies de ventilation hybride** », Yacine Allab, Andrea Kindinis, Olivier Coutier.
- 7 « **Évaluation de la performance systémique d'un bâtiment en phase de programmation : constructibilité et intégration de volumes fonctionnels** », Francesca Contrada, Andrea Kindinis, Christophe Gobin, Jean-François Caron.

Nouvelles thèses

« **Méthode d'ingénierie pour l'étude du tassement et du risque de liquéfaction des digues sous séisme** »

- ▶ Directeur de thèse : **Jean-François Semblat** (UPE-Ifsttar)
- ▶ Coencadrants : **Pierre Labbé** (ESTP Paris/EDF), pierre.labbe@edf.fr ; **Abdelkrim Bennabi** (ESTP Paris), abennabi@estp-paris.eu
- ▶ Doctorant : **Ziad Kteich**, zkteich@estp-paris.eu

Contexte : les digues et leurs fondations sont constituées de sols dont la réponse à des séismes en termes de liquéfaction et/ou de tassement est très importante à connaître et doit être prise en compte dans la conception de ces structures ou lors du traitement des sols constitutifs pour leur permettre de faire face aux risques encourus.

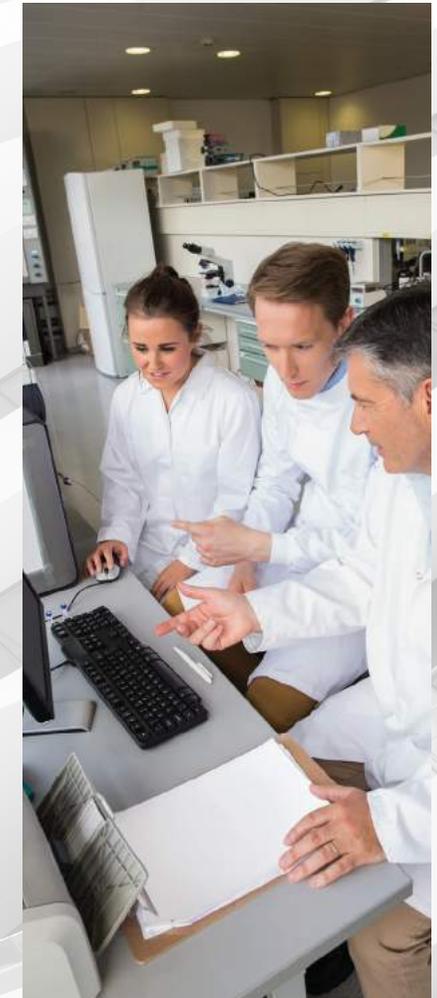
Chaire GCN, inscription possible dans le PN « Barrages

et séismes » en cours d'élaboration (EDF-CIH).

Objectif : le sujet se place en amont de cette problématique. Il concerne l'approche du risque de liquéfaction des digues sous séisme qui repose aujourd'hui sur des méthodes d'ingénierie assez rustiques ou sur des calculs transitoires non-linéaires sophistiqués dans lesquels on doit modéliser finement la loi de comportement du sol pour mettre en évidence les montées de pression interstitielle. L'objet est de développer une méthode intermédiaire entre les approches « rustique » et « sophistiquée ».

Verrous scientifiques

1. Choix : digue + modèle de comportement + événement sismique (sélection signaux).
2. Réponse aux signaux (ERS) / développement de la méthode de prédiction ajustée à ERS. Test du caractère prédictif de la méthode et application à différentes configurations.



Liste des thèses et nouvelles thèses

« **Évaluation de la performance systémique d'un bâtiment en phase de programmation : constructibilité et intégration de volumes fonctionnels**



► Directeur de thèse :
Christophe Gobin,
christophe.gobin@vinci-construction.fr

► Coencadrant :
Andrea Kindinis,
akindinis@estp-paris.eu

► Doctorante :
Francesca Contrada,
fcontrada@estp-paris.eu

Mai 2014 : master 2 en ingénierie des systèmes du bâtiment, université de Pise (Italie).

Octobre 2014 : stage Erasmus + à l'IRC, analyse des composants d'enveloppe dans le cadre du projet Bâtiville d'Efficacity.

Mai 2015 : stage de recherche à l'IRC avec le groupe Lhoist, confort thermique dans les bâtiments en béton de chanvre.

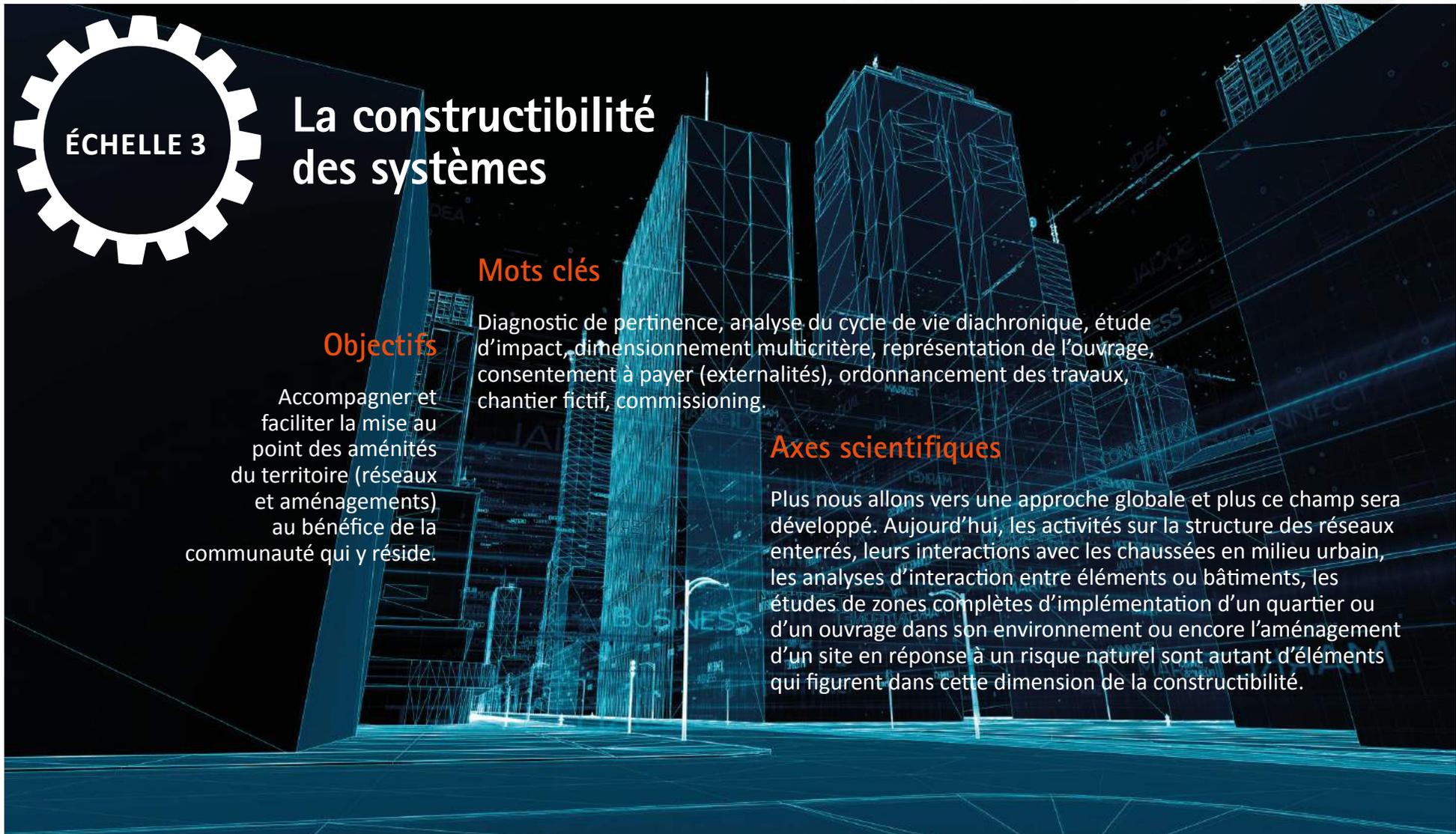
► **Financement** : EFFICACITY, FONDATION ESTP PARIS

► **Contexte** : l'étude concerne une problématique commune aux différents acteurs de la construction : l'estimation de la performance systémique. L'analyse de la dégradation de la performance, due à la présence des interfaces, permet d'anticiper les risques de non-qualité, de changement de la performance et des coûts prévus dès la phase de programmation.

► **Objectif** : définition d'une méthodologie permettant d'évaluer la performance systémique d'un bâtiment en phase de programmation. À partir des fonctions d'usage du programme, le volume capable est décomposé en volumes fonctionnels élémentaires. Les rapports mutuels entre eux et entre volume et espace extérieur s'explicitent à travers les interfaces, qui deviennent aussi le lieu physique de dégradation de la performance. L'analyse des interfaces permettra

l'identification de plusieurs indices locaux de performances et leur extension au volume globale.

► **Verrous scientifiques** : physique du bâtiment et performances énergétique, environnementale, de confort et économique pour les nouveaux bâtiments durables ; méthodes simplifiées d'évaluation de la performance et de sa dégradation.



ÉCHELLE 3

La constructibilité des systèmes

Mots clés
Diagnostic de pertinence, analyse du cycle de vie diachronique, étude d'impact, dimensionnement multicritère, représentation de l'ouvrage, consentement à payer (externalités), ordonnancement des travaux, chantier fictif, commissioning.

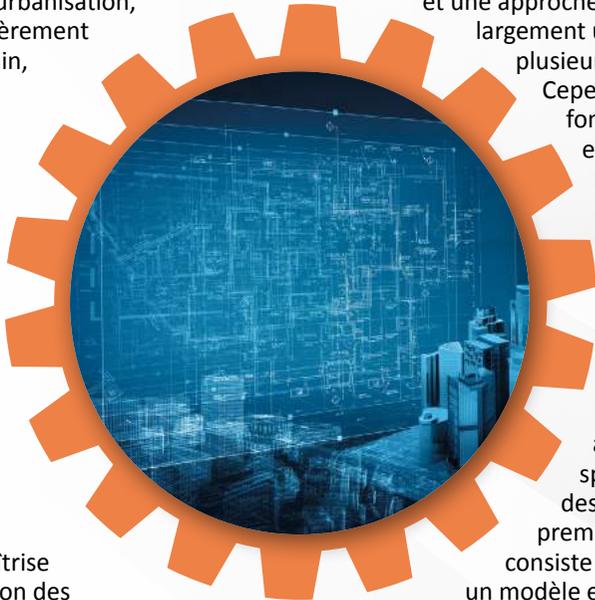
Objectifs
Accompagner et faciliter la mise au point des aménités du territoire (réseaux et aménagements) au bénéfice de la communauté qui y réside.

Axes scientifiques
Plus nous allons vers une approche globale et plus ce champ sera développé. Aujourd'hui, les activités sur la structure des réseaux enterrés, leurs interactions avec les chaussées en milieu urbain, les analyses d'interaction entre éléments ou bâtiments, les études de zones complètes d'implémentation d'un quartier ou d'un ouvrage dans son environnement ou encore l'aménagement d'un site en réponse à un risque naturel sont autant d'éléments qui figurent dans cette dimension de la constructibilité.

Modélisation 3D de l'expansion urbaine : application au modèle Sleuth

Contexte

Au cours de ces dernières années, les administrations publiques, les villes et les entreprises ont montré un grand intérêt envers la construction de modèles virtuels de villes en 3D, et ce, pour différents usages : la communication, la gestion des patrimoines urbains, les projets d'urbanisme, d'implantation ou de simulation (bruit, pollution, changement climatique, inondation, étalement urbain...), etc. L'urbanisation, ou plus particulièrement l'étalement urbain, induit des changements souvent irréversibles. Elle impacte les écosystèmes, le climat et la biodiversité, transforme les paysages, dégrade les espaces agricoles et naturels qui se réduisent inexorablement. Le suivi et la maîtrise de l'artificialisation des



territoires représentent ainsi un enjeu important pour les collectivités territoriales qui se trouvent confrontées aux objectifs transversaux du développement durable et à une demande sociétale pressante en matière d'environnement.

Actions de recherche

Parmi les modèles spatiaux de simulation de l'expansion urbaine, le modèle Sleuth ayant pour socle un automate cellulaire et une approche inductive est largement utilisé dans plusieurs applications. Cependant, son fonctionnement est fondé sur une représentation en 2D. De plus, le facteur réseau routier reste statique au cours de la simulation, ce qui limite la performance du modèle quant à l'allocation spatiale à proximité des routes. Un premier objectif consiste à faire de Sleuth un modèle en 3D, en intégrant

la hauteur des bâtiments, la mise à jour de la carte du réseau routier et enfin le découpage de la tâche urbaine en tissu urbain. Ces améliorations permettront d'affiner la simulation de l'expansion urbaine tout en facilitant le couplage du modèle Sleuth avec d'autres outils de simulation en vue de l'estimation de l'îlot de chaleur urbain, le trafic, la pollution et les besoins énergétiques des bâtiments.



Production scientifique

► [1] G. Da Silva, O. Doukari, R. Aguejdad, « Towards a BIM-based 3D modeling of urban growth : application to the Sleuth cellular-automata model », 1st International BIM Academic Forum Conference, Glasgow (Royaume-Uni), septembre 2016.

PARTENAIRE

CNRS, LABORATOIRE IMAGE, VILLE, ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG.

CONTACT

Omar Doukari
→ odoukari@estp-paris.eu

Fusion des modèles BIM sous format IFC

Contexte

Depuis la fin des années 2000, le BIM se développe dans le monde du BTP. Cette manière de mener un projet s'articule autour d'une maquette numérique sur laquelle tous les acteurs peuvent échanger des informations. Cette maquette numérique met en œuvre, notamment, un ensemble de modèles 3D contenant toutes les informations relatives à l'ouvrage, organisées autour d'une base de données composée d'objets. Le BIM évolue rapidement, mais l'interopérabilité reste un point difficile à résoudre et le processus d'échange d'informations reste complexe et devient restrictif.

Pour améliorer l'interopérabilité dans la construction, un standard d'échange d'informations est créé dès 1994 et constitue une première version de la norme IFC (Industry Foundation Classes). Cette norme définit les objets de la construction, leurs caractéristiques et leurs relations avec les autres objets. Par ailleurs, la norme définit aussi un format d'échange physique : le .ifc. Ce dernier contient l'ensemble des informations d'un projet de construction, exprimées selon une syntaxe textuelle spécifique : c'est le modèle IFC, aussi appelé « base de données IFC ».

Actions de recherche

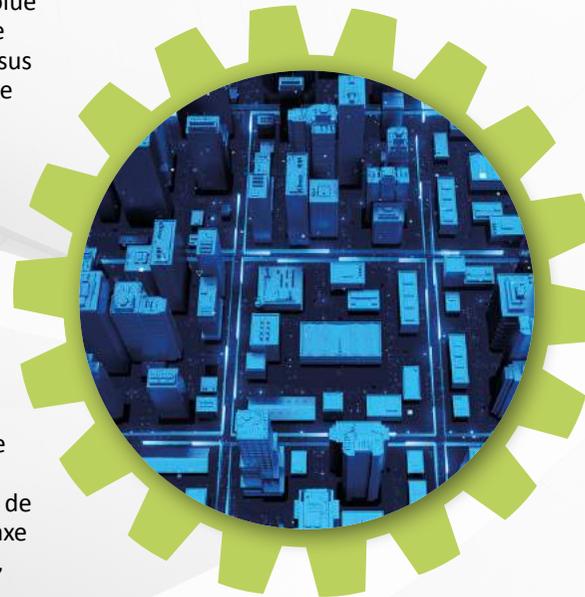
L'adoption du format IFC par les éditeurs est relativement lente. Les modèles IFC ne permettent pas, à eux seuls, une interopérabilité complète. Souvent dans l'échange avec le software des informations sont perdues et l'interopérabilité n'est pas « réversible » quand on réimporte les données dans un modèle précédent, après une « traduction » dans un autre pour

faire un travail spécifique, on ne retrouve pas toutes les données initiales. De plus, la complexité des IFC et leur caractère « informatique » ne favorisent pas la lisibilité par les spécialistes du BTP.

Nous proposons une manière nouvelle d'appréhender les échanges avec les IFC. Cette nouvelle approche offre une alternative à la façon d'échanger les informations : la fusion de modèles par le BIM manager, assisté d'une interface de manipulation d'objets du bâtiment. L'outil informatique que nous proposons facilite d'abord l'appréhension des modèles IFC créés par les différents concepteurs, en affichant leurs contenances : arborescence d'objets, quantité d'objets par type, etc. Ensuite, il donne accès à la fusion automatique de ces derniers pour en créer un seul modèle IFC cohérent de synthèse. Le résultat est exploitable par tous les logiciels de modélisation BIM, sans aucune perte d'informations.

Production scientifique

► [1] B. Naudet, O. Doukari, R. Teulier, « Merging IFC-based BIM models : A new paradigm and co-design support tool », 1st International BIM Academic Forum Conference, Glasgow (Royaume-Uni), septembre 2016.



PARTENAIRES

I3-CRG UMR 9217 CNRS,
ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY.

CONTACT

Omar Doukari
→ odoukari@estp-paris.eu

Management des risques projet et portefeuille de projets en construction

Contexte

Tous les professionnels de la construction ont l'expérience de projets qui ont subi des retards ou des dépassements de budget dans des proportions considérées comme inadmissibles. Cette situation, même si elle est regrettable, représente une certaine récurrence. Avec les méthodes de quantification et d'agrégation actuelle, les risques ne sont pas pleinement identifiés. Dès lors, il apparaît utile que le management de projet intègre dans sa globalité « l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs », le risque pour l'ISO 31000, quantifié en termes d'écart par rapport aux objectifs de qualité, de coûts, de délais de réalisation, de santé, de sécurité au travail et de réputation et en termes d'écart par rapport aux objectifs en performance d'usage, de sûreté des usages, et de performance environnementale du bâtiment ou de l'infrastructure.

Objectifs

Axe de R&D de conception innovante permettant aux entreprises du secteur de disposer de processus structurés de management des risques et de quantification ainsi que de programmes de R&D non dissociables des risques et de la complexité orientés pilotage du résultat et de la création de valeur.

Actions de recherche

Projet du Fonds unique interministériel 19, RID Project Management (Risk Intelligence & Decisions for Complex), solution innovante pour réconcilier les visions économiques et financières (incertaines) avec les attentes comptables des projets complexes. Budget : 2,3 millions d'euros. Durée du projet : trente-six mois. Date de démarrage du projet : 15 septembre 2015. Ce projet de R&D est soutenu par le conseil régional d'Île-de-France et la Banque publique d'investissement avec les partenaires l'Agence Verte, CADLM, Vinci Construction France, Bouygues Bâtiment Île-de-France, l'Institut de recherche en constructibilité - École Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie. La configuration de la collaboration d'ensemble porte sur deux axes de recherche qui regroupent, ensemble, 18 actions de recherche associées à des livrables du projet, notamment la production de logiciels.

► **Axe n° 1 :** le management des risques qui s'inscrit dans la constructibilité dans la mesure où il doit fournir une assurance raisonnée quant au pilotage de la performance du projet.

► **Axe n° 2 :** la sûreté de fonctionnement (SDF) qui s'inscrit aussi dans la constructibilité dans la mesure où elle doit fournir une

assurance raisonnée quant au respect des performances d'usage attendue du produit. La SDF est abordée comme l'intégration des deux significations de la qualité (les caractéristiques du produit à bâtir répondent aux besoins des usagers et à l'absence d'anomalies).

Productions scientifiques

► [1] Configuration fonctionnelle de base réalisée pour les livrables logiciels des deux axes du projet.

► [2] Quatre articles dont « Les matrices conséquences-probabilités pour décider de l'acceptabilité du risque : un paradoxe économique », F. Claude, S. Nouet, Actes du Congrès Lambda Mu 20 de l'Institut de maîtrise des risques.

► [3] Thèse de doctorat (1^{re} année) : « Analyse systémique des facteurs de risques aux interfaces fonctionnelles du bâti. Modélisation en termes de critères de constructibilité et de performances d'usage », G. Thing Leo, doctorant.

► [4] Journée organisée sur le campus de l'ESTP Paris (le 9 juin 2016) par l'IMDR et l'Association française de mécanique pour un état des travaux existants et mettre en évidence les pistes de R&D concernant « l'estimation de probabilités d'événements rares en maîtrise des risques et en sûreté de fonctionnement ».



PARTENAIRES

INSTITUT DE MAÎTRISE DES RISQUES (IMDR), PÔLE DE COMPÉTITIVITÉ FINANCE INNOVATION ET ADVANCITY, LABORATOIRE MSME (MODÉLISATION ET SIMULATION MULTIÉCHELLE) UNIVERSITÉ PARIS-EST MARNE-LA-VALLÉE.

CONTACT

Francis Claude
→ fclaude@estp-paris.eu

Gestion de chantiers de construction en prenant en compte les risques et les catastrophes naturels

Contexte



La gestion des chantiers de construction est une tâche complexe et importante pour les gestionnaires et les planificateurs du projet. Il faudra faire face à l'apparition de dangers potentiels comme les incendies et les explosions. Cependant, réduire les dommages résultants de risques naturels ou technologiques est encore un défi scientifique. En fait, peu d'efforts ont été consacrés à l'organisation de l'aménagement des chantiers pour minimiser les risques des dangers potentiels. Dans cette recherche, une nouvelle méthodologie est développée afin d'évaluer les risques dans un chantier de construction. Elle est constituée :

- 1 des composants de chantier, par exemple : générateur électrique, stockage de carburant, bureaux, équipements... ;
- 2 de la matrice d'interaction de danger – elle montre l'interaction des risques entre les composantes du chantier et l'atténuation des risques avec la distance ;

- 3 de la matrice d'interaction de la vulnérabilité – elle représente la faiblesse potentielle des cibles entières à l'aléa généré à partir de chaque source ;

- 4 de la fonction d'utilité – elle vise à générer un plan de site optimisé avec un risque minimal ;

- 5 de l'analyse spatiale, en utilisant le principe space syntax, afin de réaliser des configurations spatiales dans le chantier de construction.

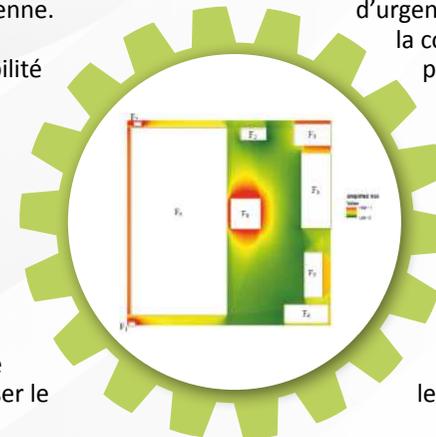
Comme le processus d'évacuation est pris en compte dans l'évaluation et la visualisation du risque, le risque réel est amplifié en utilisant le facteur de pénalité appelé profondeur moyenne.

Le SIG est utile pour la visualisation de la variabilité spatiale du risque au sein du site. Il intègre l'impact potentiel total des installations avec la configuration de l'espace selon les résultats de la profondeur moyenne. Un algorithme d'évolution différentielle est adopté pour minimiser le

risque global au sein du site. Les résultats ont montré que la méthode proposée est efficace, en raison de sa capacité à gérer l'agencement général du chantier avec un environnement de travail plus sûr. Cela conduit à réduire les accidents de travail, les blessures graves et le nombre de victimes. En outre, le modèle est capable de mettre en évidence les zones les plus à risque dans un chantier de construction.

Actions de recherche

Il est important de bien gérer un chantier afin de maintenir l'intégrité du site de construction et de faciliter le processus d'évacuation lors de situations d'urgence. Cela se reflétera sur la constructibilité durant le projet. L'évacuation est très importante dans la planification de la sécurité du chantier. Si un danger survient dans un site, les travailleurs doivent être évacués en toute sécurité, par des zones de passage avec moins de risques, pour minorer les pertes. Dans ce travail,



PARTENAIRES

UNIVERSITÉ PARIS-EST,
LILLE-I/POLYTECH'LILLE,
AN-NAJAH NATIONAL
UNIVERSITY (PALESTINE).

CONTACT

Rani El Meouche
→ relmeouche@estp-paris.eu

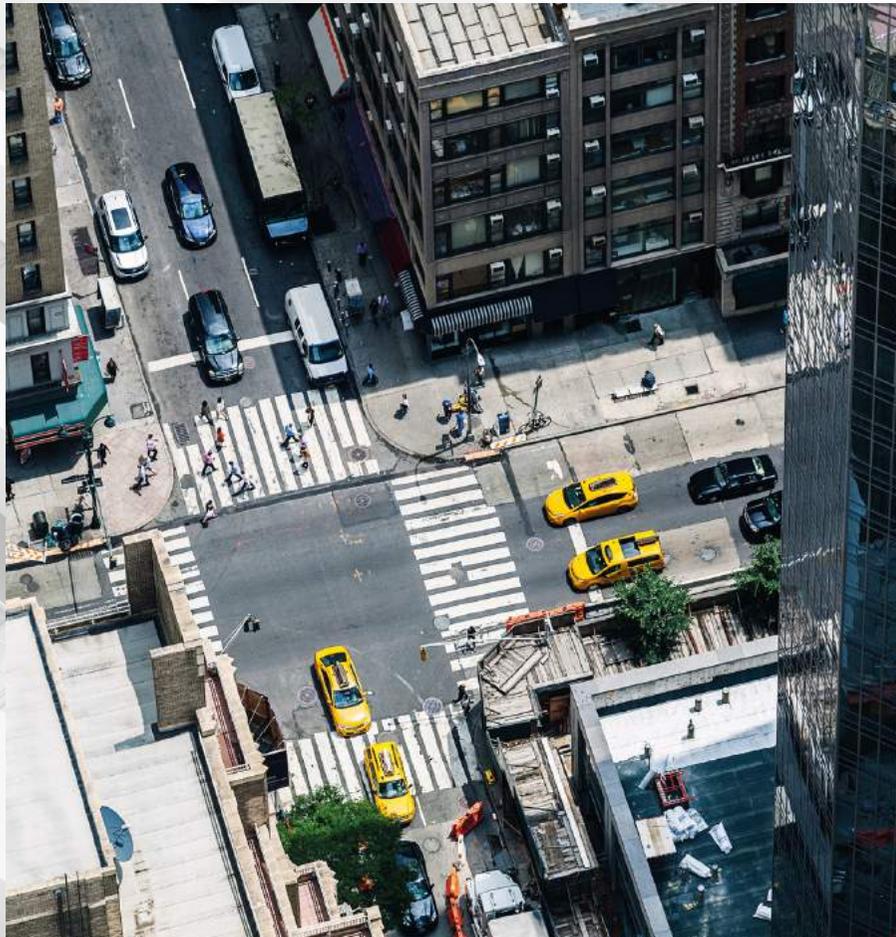
l'évacuation repose sur l'intégration ou la séparation de chaque position par rapport aux autres au sein du site. Les facteurs de pénalité pertinents sont effectivement adoptés afin de générer des cartes de risques. Cette recherche ambitieuse d'améliorer le plan d'aménagement du chantier en développant de nouveaux modèles, qui tiennent compte des risques et de la vulnérabilité des interactions entre les installations. En outre, après avoir obtenu la disposition optimale des installations, l'analyse spatiale appelée space syntax est utilisée pour étudier l'influence des configurations spatiales sur la variabilité spatiale du risque au sein d'un chantier de construction.

Productions scientifiques

- ▶ [1] M. Abunemeh, R. El Meouche, I. Hijaze, A. Mebarki, I. Shahrour, « Optimal construction site layout based on risk spatial variability », *Automation in Construction*, vol. 70, octobre 2016.
- ▶ [2] M. Abunemeh, R. El Meouche, I. Hijaze, A. Mebarki, I. Shahrour, « Hazards, vulnerability and interactions at construction site : spatial risk mapping », *Journal of information technology in construction*, janvier 2017.



Homogénéité des espaces urbains et évacuation de la foule en utilisant le BIM et le SIG



Contexte

Afin de préserver le tissu urbain ou les caractéristiques dans des quartiers spécifiques, il est souvent nécessaire de renforcer ou de diminuer l'homogénéité du tissu urbain lors de l'insertion de nouveaux bâtiments. L'évaluation de la forme de tissu urbain est fondamentalement importante pour la pratique d'architecte et d'urbaniste, pour l'évacuation en cas d'urgence et l'élaboration des politiques pertinentes. Cependant, les méthodes quantitatives et les tentatives sont rares en raison de l'absence de méthodes disponibles. Pour combler ce manque, ce projet présente une méthode qui s'appuie sur le SIG pour mesurer l'homogénéité

PARTENAIRES

UNIVERSITÉ PARIS-EST,
LILLE-I/POLYTECH'LILLE,
AN-NAJAH NATIONAL
UNIVERSITY (PALESTINE).

CONTACT

Rani El Meouche
→ relmeouche@estp-paris.eu

du tissu urbain, en extrayant les attributs directement à partir de la géométrie 2D, y compris les angles entre les bâtiments, l'emprise au sol et les distances entre les bâtiments. La méthode peut être utilisée pour informer de façon interactive les urbanistes et valider l'impact des nouvelles propositions de conception sur l'homogénéité d'un quartier. De plus, la méthodologie peut être utilisée pour synthétiser de nouvelles variantes de conception avec une homogénéité définie pour améliorer la constructibilité dans le cadre des nouveaux projets. En outre, ce travail cherche à calculer un jeu de données réseau pour l'espace intérieur d'un bâtiment à l'aide de ses plans de niveau 2D et l'information sémantique, combinée avec une méthode d'évacuation optimale. En effet, cette dernière ne repose pas sur l'issue la plus proche pour une personne, mais sur le tri optimal de la foule à chaque issue de la salle pour son évacuation. La procédure de génération du réseau personnalisé implique l'utilisation de plans de niveau 2D d'un bâtiment et des fonctions SIG communes ; la méthode elle-même est extensible et peut être facilement exécutée dans les logiciels SIG. Cette méthode combinée avec les listes de tri optimal sera utile pour guider la foule au cours d'une évacuation d'urgence.

Actions de recherche

La méthodologie pour détecter l'homogénéité des configurations spatiales a recours à l'analyse d'images. La logique formelle d'analyse d'images est connue comme une map algebra et traite une configuration spatiale comme une surface continue avec une valeur spécifique à chaque emplacement. Pour les architectes, cette méthode peut être appliquée dans les étapes de la conception comme une procédure pour évaluer de manière interactive les nouvelles constructions ou des interventions dans le contexte urbain existant. En outre, cela pourrait servir à l'analyse des quartiers historiques et à l'apprentissage des exemples passés sur la façon d'atteindre ou de conserver la disposition organique du tissu urbain. Le but de cette recherche est de développer une méthode exécutable et automatique qui pourrait générer le réseau de chemin intérieur pour les plans de niveau architecturaux. En outre, la recherche vise à générer efficacement le réseau en utilisant des algorithmes fondés sur les dessins 2D de plan de niveau (CAO) et à découvrir une méthode de génération de chemins pour le plan d'étage 2D en utilisant des fonctions SIG communes.



De surcroît, un nouvel algorithme qui minimise le temps d'une durée d'évacuation couplé avec le réseau de chemins générés à l'intérieur sera mis au point, afin d'optimiser l'évacuation complète de la pièce et les portes de sortie vers l'extérieur du bâtiment.

Productions scientifiques

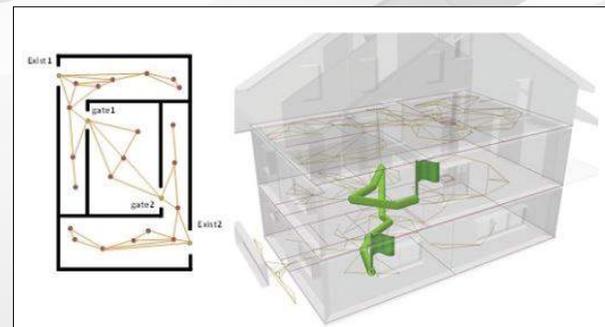
► [1] M. Xu, I. Hijazi, A. Mebarki, R. El Meouche, M. Abunemeh, « Indoor Guided Evacuation : TIN for graph generation and crowd evacuation », The 4th International Conference on Civil

Engineering and Urban Planning (Ceup 2016), Beijing (Chine), octobre 2015.

► [2] M. Xu, I. Hijazi, A. Mebarki, R. El Meouche, M. Abunemeh, « Indoor guided evacuation : TIN for graph generation and crowd evacuation », Geomatics, Natural Hazards and Risk, vol. 7, 2016.

► [3] I. Hijazi, X. Li, R. Koenig, G. Schmit, R. El Meouche, Z. Lv, M. Abunemeh, « Measuring the homogeneity of urban fabric using 2D geometry data », Environment and Planning B: Planning and Design, 18 juillet 2016.

► [4] I. H. Hijazi, R. El Meouche, A. Khan, N. Aboud, « Utilizing mobile sensing to investigate the effects of urban space on users behavior », The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 40, 2015.



Modélisation et optimisation multicritères des projets d'aménagement face aux risques d'inondation urbaine

Contexte

Les inondations sont une source de dommages importants lorsqu'elles se produisent dans des zones urbaines à fort potentiel économique. L'importance des dommages s'explique, au moins en partie, par l'urbanisation croissante des zones à risques – c'est-à-dire la proximité d'un cours d'eau, d'un barrage... –, se traduisant par l'imperméabilisation des sols, la destruction des haies et autres barrages naturels aux écoulements. Il apparaît alors clairement qu'une meilleure gestion des risques d'inondation doit passer par un contrôle efficace de l'espace urbain dans ces zones à risques à travers des projets d'aménagement optimisés. Cependant, afin de concevoir efficacement ces projets et avant de passer à l'action sur le terrain, des méthodes d'aide à la décision, fondées sur les techniques de simulation et d'ingénierie, deviennent d'une grande importance pour les différents acteurs. Ces méthodes assurent une compréhension rapide et plus précise des volets du risque d'inondation : aléa et vulnérabilité. Par conséquent, la sélection de la solution de protection

devient une étape facilitée et sécurisée répondant à tous les enjeux (techniques, économiques, sociaux, politiques...).

Actions de recherche

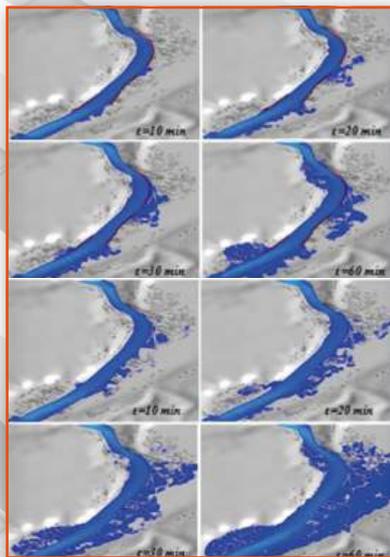
Dans ce contexte, l'objectif des actions de recherche menées à l'IRC consiste à développer une approche multimodèle, complémentaire des outils d'aide à la décision, en s'appuyant principalement sur des méthodes numériques directes, telles que la modélisation 3D, la simulation numérique et l'optimisation multicritère. L'approche consiste, dans un premier temps, à développer et à coupler les modèles géométriques 3D issus du SIG avec la modélisation numérique en mécanique des fluides, afin de représenter le phénomène d'inondation en milieu urbain avec une précision proche du réel. Cette étape fournit une cartographie tridimensionnelle de différentes caractéristiques de l'inondation (vitesse, hauteur d'eau, étendue...). Dans un second temps, en s'appuyant sur les résultats obtenus dans la première partie, des stratégies intelligentes d'optimisation multicritère – méthodes heuristiques : algorithmes

génétiques Fmoga, Mosa, Mopso, NSGA-II... – sont adaptées et mises en œuvre afin de trouver parmi une multitude de solutions d'aménagement proposées celle qui présente une performance maximale selon les différents critères visés.

Dans le cas d'une étude représenté par la figure à gauche, les digues de protection contre les inondations, c'est-à-dire les ouvrages de protection des zones urbaines se trouvant à proximité de cours d'eau, sont proposées comme étant le projet d'aménagement. Avec l'approche développée, nous avons pu tester plusieurs configurations (géométriques et spatiales), en comparant les différents critères, avant de converger vers la solution optimale.

Production scientifique

► M. Rezoug, R. El Meouche, R. Hamzaoui, « Multi-Objective Optimization Approach to improve Levees Constructibility and reduce the Flooding Risk », International Conference on Civil and Environmental Engineering (I2C2E), Berlin (Allemagne), 30 décembre 2015. (Article publié dans l'International Journal of Environment, Ecology, Family and Urban Studies (Ijefus), vol. 6, février 2016.)



Comparaison des résultats de simulation pour l'état et sans aménagement.



CONTACT

Mehdi Rezoug
→ mrezoug@estp-paris.eu

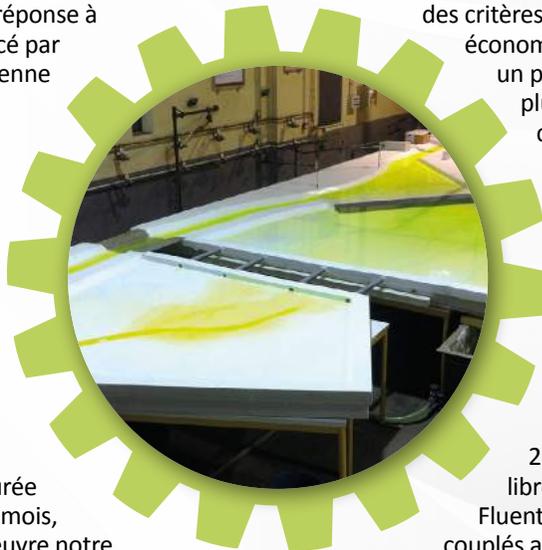
Études de faisabilité et dimensionnement d'ouvrages hydrauliques pour la gestion d'inondation : approche numérique et expérimentale

Contexte

Dans le cadre d'une réponse à un appel d'offres lancé par la métropole européenne de Lille, pour l'étude de faisabilité de l'aménagement de l'Espierre¹, l'ESTP Paris en partenariat avec Naldeo² a décroché le projet pour conduire principalement l'étude hydraulique et hydrodynamique. Depuis novembre 2015, et pour une durée totale de huit à neuf mois, nous avons mis en œuvre notre savoir-faire dans le domaine pour répondre aux différentes exigences définies dans le cahier des charges.

Actions de recherche

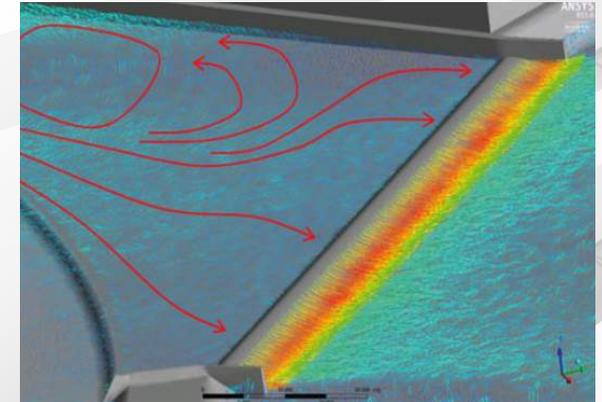
Il s'agit de développer une approche hybride, numérique et expérimentale, capable d'optimiser le fonctionnement de



différents ouvrages hydrauliques, aménagés pour la gestion de crue, cela tout en satisfaisant l'ensemble des critères technico-économiques. Dans un premier temps, plusieurs scénarios de crue ont été simulés numériquement sur la topographie du terrain, en mettant en œuvre des modèles CFD (dynamique des fluides) pour le calcul hydrodynamique 2D/3D à surface libre à l'aide d'Ansys Fluent et de Telemac couplés avec le modèle sédimentologique Sisyph.

Afin d'évaluer l'effet global des ouvrages sur le comportement hydrodynamique de la crue, nous avons mis en place un processus d'optimisation multicritère grâce auquel on peut interagir avec la simulation pour l'évaluation itérative d'un ensemble de configurations représentées par un jeu de paramètres géométriques et spatiaux.

Les résultats obtenus ont mis en évidence le dimensionnement optimal de différents ouvrages face aux situations étudiées. Dans un second temps, nous avons lancé la phase de validation par la mise en place d'une maquette expérimentale (13 x 5 m) représentant la zone d'études afin de confirmer la fiabilité des résultats numériques. La maquette a été instrumentée avec des capteurs de mesures de grande précision, à savoir des capteurs de vitesses, débits, niveaux, et des caméras rapides pour la PIV (mesure de champ de vitesse par image de particules).



Production scientifique

Plusieurs rapports techniques ont été rédigés et fournis au client. Ils conservent pour l'instant un caractère confidentiel.

1. Rivière du nord de la France et de la Belgique, elle traverse les communes de Roubaix, Wattrelos et Leers, longe le canal de Roubaix jusqu'à la frontière belge sur une longueur de 4 300 m.
2. Cabinet d'ingénierie, étude de maîtrise d'œuvre eau environnement énergie.

PARTENAIRES

LILLE MÉTROPOLE,
NALDEO.

CONTACT

Mehdi Rezoug

→ mrezoug@estp-paris.eu

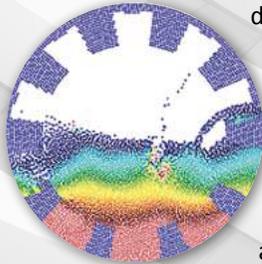
Développement numérique de la méthode smoothed particle hydrodynamics fondée sur des calculs haute performance : application à des problèmes multiphysiques en génie civil

Contexte

Dans le cadre de ce travail de recherche, il est question de répondre aux besoins de simulation numérique des phénomènes multiphysiques (interactions fluide-structure) de nature complexe (écoulements multiphasiques et à surface libre). Une application dans le domaine du génie civil est envisagée. Le choix s'est porté sur une méthode numérique lagrangienne dite smoothed particle hydrodynamics (SPH). Le développement de cette méthode porte sur deux aspects. Le premier s'intéresse

à l'amélioration de la méthode d'un point de vue de précision, de consistance et d'applicabilité pour des simulations numériques multiéchelles. Le second aspect est lié directement à la performance de calcul par le biais de l'application de stratégies de calculs parallèles sur plusieurs CPU (central processing unit) ainsi que des GPU (graphic processing unit).

Champ de pression 2D d'un malaxeur de béton.



Actions de recherche

Le travail réalisé à ce jour peut être résumé par les points suivants.

- Modélisation et simulation numériques des écoulements à surface libre et confinés : un développement numérique a été apporté sur la méthode SPH afin qu'elle s'adapte au mieux à la simulation des écoulements à surface libre ainsi bien qu'internes (confinés). Il consiste en l'amélioration des conditions aux limites liées aux parois solides, ainsi que l'addition de termes de diffusion numérique pour éliminer les incertitudes de la pression provenant de l'hypothèse d'écoulement faiblement compressible.
- Modélisation et simulation numériques des interactions fluide-structure : un couplage faible entre les équations régissant le mouvement fluide (Navier-Stokes) et la cinématique des solides a été réalisé par le biais d'un champ de pression.
- Modélisation et simulation numériques des écoulements multiphasiques : une formulation non conservative a été

développée pour la modélisation de la tension superficielle dans les écoulements multiphasiques. Les résultats ont été validés pour le cas de fluides biphasiques et triphasiques avec la présence de points de jonction triples.

► Accélération du code de calcul par l'application des stratégies de calcul haute performance sur CPU : une technique de parallélisme sur CPU a été proposée pour améliorer les performances. Le principe repose sur la méthode de décomposition du domaine sur l'ensemble des processeurs. La communication entre les processeurs est assurée par le paradigme MPI (message passing interface).

Production scientifique

► A. Krimi, M. Rezoug, S. Khelladi, M. Deligant, « Smoothed particle hydrodynamics : a consistent model for interfacial multiphase fluid flow simulations », article soumis au Journal of Computational Physics.

CONTACT

Mehdi Rezoug
→ mrezoug@estp-paris.eu

Liste des thèses et nouvelle thèse



Liste des thèses en cours

1 « Étude de la constructibilité d'un ouvrage multiservice en milieu urbain. Application au cas du métro », Nicolas Ziv, Andrea Kindinis, Christophe Gobin.

2 « Modélisation historique du réseau hydraulique des fontaines du château de Versailles », Daniella Malnar, Patricia Bordin, Sabine Barles.

3 « Analyse systémique des facteurs de risque aux interfaces fonctionnelles du bâti. Modélisation en termes de critères de constructibilité et de performance d'usage », Gilles Thing Leo, Francis Claude, Christophe Gobin, Ahmed Mebarki.

4 « Développement des méthodes numériques de simulation fondées sur le calcul haute performance HPC. Application pour les problématiques de risques en

génie civil », Abdelkader Krimi, Mehdi Rezoug, Sofiane Khelladi.

5 « Gestion du site de construction, processus de constructibilité et analyse des risques. L'utilisation du BIM et SIG technologies », Mohammed Abunemeh, Rani El Meouche, Ahmed Mebarki.

Nouvelle thèse

« Analyse systémique des facteurs de risques aux interfaces fonctionnelles du bâti : modélisation en termes de critères de constructibilité et de performances d'usage »

► Directeurs de thèse : **Christophe Gobin**, christophe.gobin@vinci-construction.fr ; **Ahmed Mebarki**, (MSME/Upem).

► Coencadrants : **Francis Claude**, fclaude@estp-paris.eu ; **Rani El Meouche**, relmeouche@estp-paris.eu

► Doctorant : **Gilles Thing Leo**, gthingleo@estp-paris.eu

Diplômé de l'École des ingénieurs de la Ville de Paris (spécialité génie urbain), avec parcours d'approfondissement en écoconception à l'École nationale des ponts et chaussées

Financement :
FUI, RID PROJECT
MANAGMENT

Inscription du sujet dans la constructibilité : un projet de bâtiment se caractérise par la mise en œuvre de choix constructifs issus du mariage de plusieurs solutions techniques. Cette démarche de spécification a pour but de satisfaire les performances d'usage attendues de l'artefact. Or, les interfaces fonctionnelles qui en résultent sont exposées à des facteurs de risques mettant en péril l'accomplissement effectif de ces attentes. De ce fait, la conception d'une ontologie des connaissances, afin de traduire la complexité du système bâti et de poser le cadre des décisions inhérentes au projet, participe à l'anticipation des difficultés potentielles de mise en œuvre.

Intérêts et verrous scientifiques :

1 Aucune méthodologie générique ne permet de capitaliser sur les connaissances relatives, d'une part, au « produit » en termes de performances d'usage et, d'autre part, relatives au « processus » de production.

► **Création d'une ontologie et définition des états de la nature du système bâti.**

2 Les tentatives appuyées sur l'analyse fonctionnelle n'ont pas été jusqu'à terme et n'ont pas tiré avantage de cette méthodologie.

► **Mise en œuvre d'une approche novatrice par la complexité et l'incertitude.**

3 Les critères décisifs d'évaluation du projet sont de plus en plus nombreux et leur foisonnement demande une prise de recul pour permettre leur emboîtement.

► **Identification de critères par l'observation de la variabilité du système bâti.**



LA VALORISATION DE LA RECHERCHE

Les événements de l'année organisés par l'IRC

30 août 2015 et 30 mars 2016

Deux ateliers organisés sur le thème de la constructibilité.

Des discussions d'une journée entre les enseignants-chercheurs de l'IRC ont permis une nouvelle compréhension du positionnement des thématiques de l'IRC ainsi que des possibilités transverses offertes par la constructibilité dans leurs domaines respectifs.

23 novembre 2015

Deux présentations liées données par des chercheurs confirmés au personnel de l'IRC. « Nanomatériaux et mécano synthèse » par Rabah Hamzaoui (HDR ESTP Paris), et « Modélisation du comportement mécanique des matériaux du génie civil » par Sofiane Guessasma, invité ESTP Paris, chargé de recherche, HDR de l'Inra de Nantes.

24 mars 2016

Une session d'échanges s'appuyant sur les travaux de doctorants. « La modélisation pour la constructibilité » par Giulio Cattarin et

Gustavo Mendoza Chavez, organisé par Christophe Rouzaud (ESTP Paris).

14 avril 2016

Une présentation pour connaître les applications de la recherche industrielle du béton. Conférence « L'utilisation des Bfup dans les ouvrages modernes » par Sandrine Chanut (Eiffage Construction) et Patricia Bredy Tuffe (IdB ESTP Paris).

12 mai 2016

Journée de l'innovation de l'ESTP Paris. Soutenances des Projets Industriels d'Entrepreneuriat et de Recherche et présentations de masters et thèses de 1^{re} année par les étudiants à un public



composé d'étudiants, d'enseignants-chercheurs et d'entreprises.

Andrea Kindinis, Nicolas Ziv, Francesca Contrada, Gilles Thing Leo, Éric Croquesel (voir fiche détaillée page suivante).

8 juin 2016

Le premier séminaire de la constructibilité sur le sujet : « Constructibilité et analyse fonctionnelle ». Avec Christophe Gobin (Vinci Construction France, président du Conseil de la recherche de l'ESTP Paris), Pierre Guehenneux (Vinci Construction France), Ahmed Mebarki (Upem), Jean-François Caron (ENPC), Francis Claude, Rani El Meouche,

21 octobre 2015, 2 février 2016, 30 juin 2016

Trois Conseils de la recherche constitués de représentants de la profession de la construction au sens large et du monde académique de la recherche pour inscrire et suivre le développement de l'IRC dans une stratégie à cinq ans.

Le séminaire de la constructibilité

Contexte

Les projets de construction actuels peuvent conduire, lors de leur réalisation, à des dérives sur les coûts, les délais et les atteintes des performances envisagées en phase de programmation et de conception. La prise en compte des aléas et des expositions à ces aléas du produit à construire et du projet permet une réduction des risques de dégradation de la performance des ouvrages, ainsi que le respect des coûts et des délais des projets. Cette démarche est théorisée par la discipline de la constructibilité, qui prend sa source dans les termes anglais « buildability » et « constructability ». Buildability : concept lié à la qualité du produit, à la facilité de sa mise en œuvre et à l'efficacité et la rentabilité de la construction. Constructability : utilisation optimale des connaissances et des expériences pendant les différentes phases du projet pour atteindre les objectifs fixés.

En France, le terme « constructibilité » revêt un sens large, incluant les deux définitions et se positionnant comme une démarche qui tend à fournir une assurance raisonnée quant au respect des objectifs de tout projet de construction sur son cycle de vie. Son but est de garantir les performances d'usage attendues par les

utilisateurs finals. Il est indispensable de sensibiliser les acteurs de la construction et de mettre en place une démarche qui puisse bien répondre aux problématiques de cette industrie. Le développement du problème pendant les séminaires et les ateliers de travail au sein de l'IRC permet de connaître les outils déjà disponibles, de partager les connaissances et de développer cette démarche.

Actions de recherche

Trois thèses ont été lancées durant l'exercice 2015-2016 afin d'approfondir spécifiquement le concept de la constructibilité. C'est alors qu'un projet de travail collaboratif s'est naturellement dessiné entre les trois doctorants et leur encadrement. Afin de concrétiser cette approche et de consolider les connaissances produites, un cycle de séminaires a démarré en juin 2016. Ouvert à un public aussi bien académique que professionnel, ces séminaires confronteront le corpus scientifique de la constructibilité aux attentes et aux problématiques réelles des métiers de la construction. Ces échanges privilégiés déboucheront à terme sur des concepts et des outils opérationnels innovants rendant possible la tenue raisonnée des objectifs des projets de construction.

Chaque séminaire porte un thème particulier traité par les doctorants afin de prospecter un aspect de la constructibilité. La préparation de ces journées comprend la constitution d'une bibliographie d'introduction au thème abordé, la restitution des travaux sur le sujet et/ou l'intervention d'un expert. Une seconde phase d'échanges avec les invités ouvre les débats sur les concepts pour dégager de nouvelles pistes de travail.

Les premiers thèmes abordés durant cette phase de lancement ont été l'analyse fonctionnelle et l'ingénierie système. Ces deux concepts forment un cadre structuré à la tâche de conception des produits industriels, mais ils sont encore trop peu utilisés au service des projets de construction. Les bénéfices attendus de leur implémentation dans les projets de bâtiment ou d'infrastructure se positionnent alors dans une logique d'anticipation des difficultés et d'intégration entre le produit, les procédés et les processus métiers des différents intervenants : MOA, MOE et REA.

Production scientifique

Atelier d'introduction sur la problématique de la constructibilité (16 mars 2016).
Séminaire n° 1 : « Analyse fonctionnelle et constructibilité » (8 juin 2016).

CONTACTS

Christophe Gobin
→ christophe.gobin@vinci-construction.fr

Francis Claude
→ fclaude@estp-paris.eu

Andrea Kindinis
→ akindinis@estp-paris.eu

Rani El Meouche
→ relmeouche@estp-paris.eu

Francesca Contrada
→ fcontrada@estp-paris.eu

Gilles Thing Leo
→ gthingleo@estp-paris.eu

Nicolas Ziv
→ nicolas.ziv@egis.fr



Les publications dans des journaux à comité de lecture

- M. Aissani, S. Guessasma, A. Zitouni, R. Hamzaoui, D. Bassir, Y. Benkedda, « **Three-dimensional simulation of 304L steel TIG welding process: contribution of the thermal flux** », Applied Thermal Engineering, vol. 89, 5 octobre 2015.
- N. Mostefai, R. Hamzaoui, S. Guessasma, H. Nouri, « **Microstructure and mechanical performance of modified hemp fibre and shiv mortars: discovering the optimal formulation** », Materials and Design, vol. 84, 5 novembre 2015.
- N. Hytiris, P. Fotis, T.-D. Stavrou, A. Bennabi, R. Hamzaoui, « **Leaching and mechanical behaviour of solidified/stabilised nickel contaminated soil with cement and geosta** », Journal of Environmental Pollution and Remediation, vol. 3, 2015.
- C. Rouzaud, F. Gatuingt, G. Hervé, O. Dorival, L. Kovalesky, « **A new methodology for assessing the global dynamic response of large shell structures under impact loading** », Engineering Computations, vol. 32, 2015.
- C. Lagesse, P. Bordin, S. Douady, « **A spatial multi-scale object to analyze road networks** », Network Science, vol. 3, mars 2015.
- J. Jeong, P. Sardini, H. Ramezani, D. Kondo, L. Ponson, M. Siitari-Kauppi, « **Porous media modeling and micro-structurally motivated material moduli determination via the micro-dilatation theory** », The European Physical Journal Special Topics, vol. 224, juillet 2015.
- X. Li, I. Hijazi, M. Xu, H. Lv, R. El Meouche, « **Implementing two methods in GIS software for indoor routing: an empirical study** », Multimedia Tools and Applications, vol. 75, décembre 2016.
- M. Rezoug, R. El Meouche, R. Hamzaoui, « **Multi-objective optimization approach to improve levees constructibility and reduce the flooding risk** », International Journal of Environment, Ecology, Family and Urban Studies (IJEFFUS), vol. 6, février 2016.
- C. Rouzaud, F. Gatuingt, G. Hervé, O. Dorival, « **Influence of the aircraft crash induced local nonlinearities on the overall dynamic response of a RC structure through a parametric study** », Nuclear Engineering and Design, vol. 298, mars 2016.
- R. Hamzaoui, O. Bouchenafa, S. Guessasma, N. Leklou, A. Bouaziz, « **The sequel of modified fly ashes using high energy ball milling on mechanical performance of substituted past cement** », Materials and Design, vol. 90, 15 janvier 2016.
- J. Jeong, H. Ramezani, N. Leklou, « **Why does the modified Arrhenius' law fail to describe the hydration modeling of recycled aggregate ?** », Thermochemical Acta, vol. 626, janvier 2016.
- T. Houet, R. Aguejdad, O. Doukari, G. Battaia, K. Clarke, « **Description and validation of a "non path-dependent" model for projecting contrasting urban growth futures** », European Journal of Geography (Cybergeog), vol. 759, 2016.
- O. Doukari, R. Aguejdad, T. Houet, « **Sleuth: un modèle d'expansion urbaine scénario-dépendant** », Revue internationale de géomatique (RIG), vol. 26, n° 1, 2016.
- R. Aguejdad, O. Doukari, T. Houet, V. Vigié, P. Avner, « **Étalement urbain et géoprospective: apports et limites des modèles de spatialisation. Application aux modèles Sleuth, LCM et Nedum-2D** », European Journal of Geography (Cybergeog), 2016.
- O. Doukari, R. Aguejdad, W. Ghzel, « **Sensitivity analysis of the Sleuth model-application to the prediction coefficients** », European Journal of Geography (Cybergeog).
- L. Ziyani, V. Gaudefroy, V. Ferber, F. Hammoum, « **A predictive and experimental method to assess bitumen emulsion wetting on mineral substrates** », Colloids and Surfaces A, vol. 489, 20 janvier 2016.
- G. Cattarin, F. Causone, A. Kindinis, L. Pagliano, « **Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation – A literature review** », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 54, février 2016.
- S. Abdelaziz, S. Guessasma, A. Bouaziz, R. Hamzaoui, J. Beaugrand, A. Abdulfatah Souid, « **Date palm spikelet in mortar: testing and modelling to reveal the mechanical performance** », Construction and Building Materials, vol. 124, 15 octobre 2016.

Les contributions à des conférences internationales

- ▶ R. Hamzaoui, S. Guessasma, « **Nanomaterials obtained by planetary ball mill and their applications in civil engineering** », Mechanics of Sustainable Structural Materials at the ASCE Engineering Mechanics Institute Conference, 16-19 juin 2015, Stanford University, Californie (États-Unis).
- ▶ N. Mostefai, R. Hamzaoui, S. Guessasma, « **Effect of fly ashes on the mechanical performance of hemp modified mortar** », Cigos 2015 Paris, ENS Cachan, 11-12 mai 2015, Cachan (France).
- ▶ R. Hamzaoui, S. Guessasma, A. Bennabi, « **Kaolinite obtained by ball milling as a potential substituent for cement : mechanical performance effect on mortar based cement and milled kaolinite** », Cigos 2015 PARIS, ENS Cachan, 11-12 mai 2015, Cachan (France).
- ▶ P. Bordin, « **Towards a geographic data management as a contribution to asset**



management of physical networks », Conférence internationale EAU, « Mégapoles et changement global », Unesco, 4 décembre 2015, Paris (France).

- ▶ P. Bordin, A. Dony, « **Comaintenance des routes et des réseaux enterrés** », Conférence Infra 2015, du 30 novembre au 2 décembre 2015, Montréal (Canada).

- ▶ J. Pouliot, R. Cuissard, P. Bordin, « **Cadastral mapping for underground networks : a preliminary analysis of user needs** », 27th ICC, 23-28 août 2015, Rio de Janeiro (Brésil).

- ▶ R. Elandaloussi, A. Bennabi, J.-C. Dupla, P. Gotteland, « **Lime treatment for improving the resistance to internal erosion of coarse soils** », Conférence Ewgie du 29 septembre au 2 octobre 2015, Cracovie (Pologne).
- ▶ I. Hijazi, R. El Meouche, A. Khan, N. Aboud, « **Utilizing mobile sensing to Investigate the effects of urban space on users behavior** », 3D Geoinfo, GeoAdvances, ISPRS WG II/2 Workshop and Geomatic and Geospatial Technology, Joint International Geoinformation Conference, 28 au 30 octobre 2015, Kuala Lumpur (Malaisie).
- ▶ Y. Allab, A. Kindinis, F. Causone, A.-C. Bayeul-Lainé, S. Simonet, « **Indoor climate assessment of a classroom with mechanical ventilation and operable windows** », 35th AIVC Conference, 23 au 24 septembre 2015, Madrid (Espagne).
- ▶ F. Causone, M. Doya, F. Goia, O. Kalyanova Larsen,



A. Kindinis V. Serra, « **Experimental facilities for adaptive façades characterization** », The 10th International Conference on Advanced Building Skins, 3-4 novembre 2015, Berne (Suisse).

► G. Cattarin, F. Causone, A. Kindinis, L. Pagliano,

« **Design choices and thermal simulations of a new test cell facility** », The 10th International Conference on Advanced Building Skins, 3-4 novembre 2015, Berne (Suisse).

► E. Chuta, J. Jeong, « **Air bubbles motion through fresh concrete during**

concreting process », Comsol Conference, 14-16 octobre 2015, Grenoble (France).

► O. Doukari, R. Aguejdad, V. Masson, « **Forecasting urban growth patterns : a non path-dependent modeling approach for spatial planning support** », The 21st International

Congress on Modelling and Simulation (Modsim 2015), du 29 novembre au 4 décembre 2015, Queensland (Australie).

► S. Mao, J.-L. Lebrun, O. Doukari, R. Aguejdad, Y. Yuan, « **Modélisation 3D BIM multiéchelle d'un projet BTP Tunnel** », 11^e Conférence internationale annuelle Spatial Analysis and Geomatics (Sageo), 23-26 novembre 2015, Hammamet (Tunisie).

► Y. Allab, A. Kindinis, F. Causone, A. Tatti, S. Simonet, A.-C. Bayeul-Lainé, « **Ventilation rates and thermal comfort assessment in a naturally ventilated classroom** », 12th Rehva World Congress, Clima 2016, 22-25 mai 2016, Aalborg (Danemark).

► V. Getuli, G. Peretoli, T. Sorbi, A. Kindinis, P. Capone, « **Adding construction workspaces modeling and planning to a 4D BIM-based Simulation Model** », Back to 4.0 : Rethinking the Digital Construction Industry, du

30 juin au 1^{er} juillet 2016, Naples (Italie).

► A. Fabre des Essarts, A. Dony, S. Faucon-Dumont, V. Gaudefroy, J.-N. Roux, « **Évaluation of tools for measuring the workability of bituminous asphalts** », Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1-3 juin 2016, Prague (République tchèque).

► A. Dony, L. Ziyani, I. Drouadaine, S. Pouget, S. Faucon-Dumont, D. Simard, V. Mouillet, J.-E. Poirier, T. Gabet, L. Boulange, A. Nicolai, C. Gueit, « **Mure National Project : Ftir spectroscopy study to assess ageing of asphalt mixtures** », Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1-3 juin 2016, Prague (République tchèque).

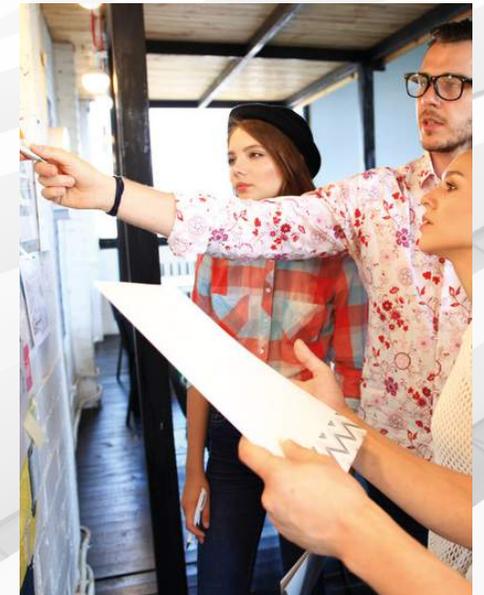
► A. Garfa, O. Sanou, A. Dony, L. Ziyani, A. Carter, W. Zaouali, V. Charton, « **Effect of aging on binder characteristics of virgin and recycled microsurfacing materials** », Isap Symposium, juillet 2016, Jackson Hole (États-Unis).



LES STAGES DE RECHERCHE

Liste des stages de master de l'année 2015-2016

- ▶ 1. Valorisation d'agrégats d'enrobés dans des enrobés coulés à froid. Évaluation du vieillissement photochimique.
- ▶ 2. Mise en œuvre des enrobés tièdes. Évaluation d'additif en vue d'améliorer la compactibilité.
- ▶ 3. Cinétique de mûrissement des enrobés à l'émulsion.
- ▶ 4. Assessment of the durability of virgin and recycled asphalt pavements : effect of climatic conditions on the properties of asphalt binders
- ▶ 5. Mélange optimal entre les fibres de chanvre et de la chènevotte pour l'amélioration des propriétés mécaniques et thermiques des mortiers fibrés.
- ▶ 6. Effet des conditions de broyage sur le traitement des sédiments pollués par des matériaux pouzzolaniques.
- ▶ 7. Essai de carbonatation accélérée des bétons et stabilité de la vatérite.
- ▶ 8. Essai de gel avec sels de déverglaçage. Rôle des conditions de cure (carbonatation et humidité relative) et du cycle thermique sur le taux d'écaillage.
- ▶ 9. Mélange de ciments avec fumée de silice, métakaolin et filler calcaire.
- ▶ 10. Aménagement et organisation du nouveau laboratoire d'enseignement et de recherche des matériaux cimentaires.
- ▶ 11. Multi-scale modeling of concrete structure ; from concrete samples to concrete structure via similitude principle.
- ▶ 12. Élaboration de revêtements constructifs « capteur du gaz polluant » sur les surfaces du béton.
- ▶ 13. Correlations between resistance to erosion and geotechnical properties.
- ▶ 14. Comparaison des propriétés hydrauliques et géotechniques d'un sol testé à l'érodimètre EFA.
- ▶ 15. Identification et caractérisation des mécanismes réactionnels mis en jeu lors d'un traitement à la clinoptilolite d'un sédiment pollué aux métaux lourds.
- ▶ 16. Comportement hydraulique et mécanique d'un sol traité à la chaux sous écoulement unidirectionnel.
- ▶ 17. Benchmark Iris. Modélisation du comportement sous impact de projectile de structure en béton armé dans le cadre du benchmark international Iris phase 3.
- ▶ 18. La modélisation des voiles béton armé sous sollicitations sismiques sur Code Aster.
- ▶ 19. Rénovation d'un bâtiment historique. Approche « constructibilité » de différentes solutions de réhabilitation énergétique.
- ▶ 20. Thermal and energy performance evaluation through numerical modelling of radiant cooling ceiling integrated with mechanical ventilation systems under different operational strategies.
- ▶ 21. Ventilation & thermal comfort in buildings.
- ▶ 22. Développement d'un système d'acquisition de données météorologiques sur LabView.
- ▶ 23. Mesure d'indices d'efficacité de ventilation par gaz traceur.
- ▶ 24. Simulation et optimisation multicritère de configurations d'aménagement d'un bassin versant.
- ▶ 25. Dispositif expérimental de mesure (vitesse, niveau d'eau, débit...) et analyse de résultats d'aménagement d'un bassin versant.
- ▶ 26. IT in architecture and construction industry.
- ▶ 27. IOT, Gmao et BIM.
- ▶ 28. Gmao.
- ▶ 29. Simulation 3D de l'expansion urbaine.
- ▶ 30. Étude des interactions entre réseaux routiers et réseaux enterrés.
- ▶ 31. Étude de la corrélation spatiale entre réseaux routiers et réseaux enterrés.



Liste des Projets Industriels d'Entrepreneuriat et de Recherche encadrés par l'IRC en 2015-2016

- ▶ 1. Revêtement en asphalte coulé : compromis entre mise en œuvre, performance et développement durable.
- ▶ 2. Évaluation environnementale d'enrobés coulés à froid : comparaison avec d'autres techniques d'entretien.
- ▶ 3. Évaluation de la durabilité des enrobés bitumineux recyclés : effet des conditions climatiques sur la rigidité des liants.
- ▶ 4. Matériaux de construction : développement d'un Bfup avec des fibres métalliques amorphes Fibriflex.
- ▶ 5. Détermination des capacités thermiques massiques et de l'énergie d'activation de matériaux cimentaires.
- ▶ 6. Vers une nouvelle approche de caractérisation de matériaux ou mélanges cimentaires par mesure de temps de prise.
- ▶ 7. Mélange optimal de fibres synthétiques et végétales pour l'amélioration des propriétés mécaniques des mortiers fibrés.
- ▶ 8. Étude de la faisabilité d'un prototype de transformation de l'énergie stockée dans les bétons en électricité par effet Peltier.
- ▶ 9. Caractérisation de l'ouvrabilité des matériaux cimentaires : corrélation entre l'approche technologique et rhéologique.
- ▶ 10. Tunnels antipollution.
- ▶ 11. La deuxième vie du béton.
- ▶ 12. Le matériau bois : quelles nouvelles technologies pour accroître les perspectives d'application à la construction de grands ensembles ?
- ▶ 13. Application de la précontrainte sur du lamellé-collé : prototype PLM-2.
- ▶ 14. Étude comparative de systèmes constructifs.
- ▶ 15. Analyse des méthodologies de calcul du ferrailage dans les zones massives de béton.
- ▶ 16. Évaluation de la constructibilité et analyse énergétique des solutions technologiques de l'enveloppe du bâtiment.
- ▶ 17. Simulation de régulation PID pour la ventilation en tunnel.
- ▶ 18. Effets sur le confort thermique des composants d'enveloppe intégrant le béton chanvre-chaux.
- ▶ 19. Analyse des performances thermoénergétiques des systèmes innovants concernant les plafonds intégrés.
- ▶ 20. Caractéristiques des espaces semi-extérieurs par rapport aux paramètres environnementaux et distributifs dans l'habitat collectif contemporain en France.
- ▶ 21. Esthétique des bétons de parement : architecture moderne (EBB.a).
- ▶ 22. Simulation numérique des évacuateurs de crue en saut de ski.
- ▶ 23. Solutions de complètement cartographique sous Android.
- ▶ 24. Le levé d'intérieur compensé et l'optimisation de la modélisation 3D.
- ▶ 25. Modélisation BIM des locaux de Colliers International sous Revit Autodesk.
- ▶ 26. Comaintenance d'un tunnel à l'aide d'un modèle BIM.
- ▶ 27. Développement d'une interface IFC d'aide à la coconception dans le cadre d'un projet BIM.
- ▶ 28. Problématiser les ouvrages d'art à l'aide des sciences sociales : cas du canal de Panama.
- ▶ 29. Espace architectural, espace pictural : la peinture murale au xx^e siècle.



Note : le détail des projets est consultable dans le rapport annuel d'innovation 2015-2016.

Mai 2017
Conception : Direction de la Communication ESTP Paris
Conception graphique : xjd@orange.fr
Impression : imprimerie Champagnac

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

Crédits photographiques :

Couverture : Lindstrom/IStock ; Aania/ Fotolia ; Smirnov/ Fotolia ; DR ; StockPhotoPro/Fotolia ; Jzehnder/Fotolia ; Adimas/Fotolia
Page 3 : DR. Page 5 : StockPhotoPro/Fotolia ; Kalafoto/Fotolia ; Shocky/Fotolia. Page 6 : Rochagneux/Fotolia ; Kastelic/ Fotolia.
Page 7 : Opolja/Fotolia. Page 11 : StudioDin/Fotolia ; StockPhotoPro/Fotolia ; DR ; nd3000/Fotolia ; Auremar/Fotolia.
Page 12 : Traimak/Fotolia ; Tiliilucida/Fotolia ; Kadmy/Fotolia. Page 13 : StockPhotoPro/Fotolia. Page 15 : DR. Page 16 : Kropotov /Fotolia.
Page 19 : Kalafoto/Fotolia. Page 20 : Elkit/Fotolia ; Wang /Fotolia ; Bambambu/Fotolia. Page 21 : Carson/Fotolia. Page 22 : Fotolia ; An-T/Fotolia
Page 23 : DR. Page 24 : DR. Page 25 : DR ; Robsonphoto/Fotolia. Page 26 : Mopic/Fotolia ; Kolidzei/Fotolia. Page 27 : DR. Page 28 : DR ; Arska/Fotolia
Page 29 : Klimenko/Fotolia ; Solovyov/Fotolia. Page 30 : Floor/Fotolia ; Kadmy/Fotolia. Page 31 : Rootstocks/Fotolia. Page 32 : Ymgerman/Fotolia
Page 33 : Nelson/Fotolia ; StockPhotoPro/Fotolia. Page 34 : Kadmy/Fotolia. Page 35 : Shocky/Fotolia. Page 36 : DR
Page 37 : DR ; Mat/Fotolia ; Martinisner/Fotolia. Page 38 : DR. Page 39 : DR ; Petrovich12/Fotolia. Page 40 : DR. Page 41 : DR ; Annavaczi/Fotolia
Page 42 : Jozsitoeroe/Fotolia. Page 43 : Kalafoto/Fotolia. Page 44 : Ahmety34/Fotolia ; Werner /Fotolia. Page 45 : WavebreakmediaMicro/Fotolia
Page 46 : Viacheslav Iakobchuk/Fotolia. Page 47 : Brin/Fotolia. Page 49 : Adimas/Fotolia ; DR. Page 50 : Brin/Fotolia. Page 51 : DR.
Page 52 : Braun/Fotolia ; DR. Page 53 : Trialartinf/Fotolia. Page 54 : Torres/Fotolia. Page 55 : 1xpert/Fotolia ; DR. Page 56 : DR ; Jsnewtonian/Fotolia.
Page 57 : DR. Page 58 : DR. Page 59 : BillionPhotos.com/Fotolia. Page 63 : DR. Page 65 : Kastelic/Fotolia. Page 67 : Kastelic/Fotolia.
Page 68 : Kastelic/Fotolia. Page 71 : Opolja/Fotolia. Page 72 : WavebreakMediaMicro/Fotolia.

The logo for ESTP Paris, featuring the letters 'ESTP' in a bold, orange, sans-serif font, with 'PARIS' in a smaller, black, sans-serif font directly below it. A thin black horizontal line is positioned under the word 'PARIS'.

ESTP
PARIS

L'ÉCOLE DES GRANDS PROJETS

28, avenue du Président Wilson
94234 Cachan Cedex
Tél. : +33 (0)1 49 08 03 20

www.estp.fr
ecroquesel@estp-paris.eu

