

ESTP

PARIS

L'ÉCOLE DES GRANDS PROJETS

MATÉRIAUX CONSTRUCTIFS
SYSTEMES URBAINS

INSTITUT DE RECHERCHE EN CONSTRUCTIBILITÉ

OUVRAGES DURABLES



RAPPORT D'ACTIVITÉ DE LA RECHERCHE 2019



INSTITUT DE RECHERCHE EN CONSTRUCTIBILITÉ

Rapport d'activité de la recherche 2019



CHRISTOPHE GOBIN

Président du Conseil de la Recherche
de l'ESTP Paris

« Construire 4.0 » : une réponse aux défis du futur

L'année 2019 est une étape importante pour le laboratoire de recherche de l'ESTP Paris. Elle clôt une mise progressive en configuration qui s'inscrit pleinement sous l'égide de la Constructibilité. Elle engage une nouvelle période qui va accompagner la « transformation » de la profession.

En effet, cet exercice a été marqué par l'évaluation du HCERES qui a reconnu tout l'intérêt d'une recherche originale proche des facteurs d'évolution de la construction. L'objectif est désormais de travailler collectivement à des projets préindustriels qui conditionnent les futures réponses aux défis adressés au secteur par une quête de productivité renouvelée.

Ce nouveau programme collectif et pluriannuel a été désigné comme « Construire 4.0 ». Il s'agit de préparer les connaissances et les outils qui vont accompagner la digitalisation qui s'amorce des différents métiers. Son originalité tient au fait qu'il va se déployer à partir des acquis issus des travaux spécifiques organisés aux trois échelles des matériaux, des ouvrages et des systèmes.

La trajectoire qui se dessine ainsi n'est pas sans embûches puisqu'elle suppose de passer d'une recherche individualisée à une recherche participative transversale. Cependant ce challenge est l'effet miroir de l'évolution de l'enseignement de l'École qui a fait de l'acquisition des compétences de la Constructibilité un vecteur de l'architecture de sa nouvelle pédagogie.

Il faut donc espérer que ce double effort permettra d'instaurer une continuité des talents en suscitant des vocations pour la recherche et autorisant par là même une meilleure dissémination des résultats obtenus. ■



9

L'ÉCOSYSTÈME DE LA RECHERCHE DE L'ESTP PARIS

- 13 Les chiffres clés de la recherche sur la période 2019
- 14 La thématique de Constructibilité
- 15 Les verrous de l'IRC

17

LES MATÉRIAUX CONSTRUCTIFS

- 18 **PROGRAMME MATÉRIAUX CIMENTAIRES**
- 20 Béton connecté dans la Construction 4.0 et les Smart Cities
- 21 L'impression 3D de matériaux cimentaires
- 22 Clinkérisation par mécanosynthèse
- 23 Valorisation des granulats de bétons recyclés
- 24 Valorisation des fibres végétales dans des matériaux cimentaires
- 25 **FOCUS.**
Laboratoire Ingénierie des Bétons (IdB)
- 26 **PROGRAMME MATÉRIAUX DE CHAUSSÉES**
- 28 Intégration de la chaussée dans des projets globaux et nouvelles fonctionnalités pour une gestion coordonnée : routes et réseaux enterrés
- 29 Étude du comportement thermomécanique des matériaux bitumineux contenant des fibres de palmier
- 30 Étude de l'impact physico-chimique des liants dits « régénérants » sur la Constructibilité (performance et durabilité) des enrobés recyclés



- 31 Comportement thermomécanique des enrobés contenant des agrégats d'enrobés (AE) et des bardeaux d'asphalte recyclés (BPC) – Caractérisation des liants du mélange
- 32 Étude de choix constructifs pour garantir la mise en œuvre et la durabilité des enrobés recyclés à l'émulsion de bitume
- 33 ANR MOVEDVDC : Évaluation des propriétés physico-chimiques et rhéologiques de liants bitumineux vieilliss artificiellement en laboratoire et extraits de chantiers routiers
- 34 Géopolymérisation par mécanosynthèse : application en chaussée routière
- 35 **FOCUS.**
Outils scientifiques pour la caractérisation des liants bitumineux en laboratoire
- 36 **PROGRAMME GÉOMATÉRIAUX**
- 38 Impacts d'hétérogénéités granulaires sur l'érosion interne par suffusion de sols constitutifs d'ouvrages hydrauliques
- 39 Amélioration de la caractérisation de l'érodabilité des sols sur un érodimètre EFA en utilisant la Vélométrie par Imagerie de Particules
- 40 Modélisation par la méthode des éléments discrets de la suffusion des sols hétérogènes
- 41 Influence du set-up de houle dans le phénomène combiné de franchissement/submersion
- 42 Traitement-valorisation de sols par des méthodes de type géopolymérisation
- 43 **FOCUS.**
Équipements pour la géomécanique (laboratoires de géotechnique et d'hydraulique)
- 44 Thèses de doctorat pour les Matériaux Constructifs



47

LES OUVRAGES DURABLES

48 PROGRAMME EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

- 50 Analyse et optimisation du comportement de façades adaptatives
- 51 Comportement de composants d'enveloppe intégrant béton de chanvre chaux recyclé
- 52 Aide à la décision et évaluation de la performance globale basées sur la Constructibilité
- 53 **FOCUS.**
Équipements pour la caractérisation thermo-énergétique des bâtiments (Laboratoire d'Energétique de la Construction Durable, LECD)

54 PROGRAMME GÉNIE CIVIL DES OUVRAGES COMPLEXES ET NUCLÉAIRES (GC2N)

- 56 Méthodes d'ingénierie pour l'étude de la liquéfaction de sites et de barrages
- 57 Endommagement des tuyauteries sous séisme et méthodes d'ingénierie

59 PROGRAMME ARCHITECTURE ET MANAGEMENT DU RISQUE

- 60 Garanties de performances énergétiques Modèle de hors-bilan
- 61 Décisions multicritères pour l'éco-conception de bâtiments durables
- 62 Thèses de doctorat pour les Ouvrages Durables

63

LES SYSTÈMES URBAINS

64 PROGRAMME SYSTÈMES URBAINS

- 66 Simulation de croissance urbaine pour représenter les impacts possibles des constructions et des contraintes environnementales sur l'étalement urbain
- 67 Géo-visualisation en 3D de perspective urbaine respectant certaines contraintes d'urbanisation
- 68 Utilisation des types de bâtiments et des données démographiques pour améliorer notre compréhension et notre utilisation de la simulation de l'étalement urbain
- 69 BIM et contribution au développement du pont-IFC : application sur le pont Raymond Barre
- 70 Cartographie des processus des projets de construction (Donor-funded construction project)
- 71 Thèses de doctorat pour les systèmes urbains



73

LA VALORISATION DE LA RECHERCHE

- 74 Les temps forts de l'IRC en 2019
- 78 Les publications dans des journaux à comité de lecture
- 79 Les contributions à des conférences 2019



81

LES STAGES DE RECHERCHE

- 82 Liste des stages Master en 2019
- 83 Liste des PIER encadrés par l'IRC en 2019





L'ÉCOSYSTÈME DE LA RECHERCHE DE L'ESTP PARIS

IRC

Plateforme BIM/Cloud

Laboratoire Efficacité Énergétique

Laboratoire Ingénierie des Bétons

Laboratoire Génie Électrique

Laboratoire Géotechnique

Laboratoire Hydraulique

Laboratoire Topographie

Laboratoire Matériaux de Chaussées

Atelier Mécanique





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 le département recherche de l'ESTP Paris et partage le statut de l'école en tant qu'Établissement d'Enseignement Supérieur Privé d'Intérêt Général (EESPIG), reconnu par l'État depuis 1921, et 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 Établissements Université Paris-Est (COMUE UPE).

L'IRC, centre de recherche appliquée et de compétences du secteur de la construction, déploie deux missions principales dans l'objectif de devenir un centre d'excellence en recherche 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 répond aux défis de la profession de la construction, bâtiment et travaux publics, dont le déficit de productivité dans une approche encore traditionnelle du projet de construction et dans un contexte de transformations numérique, énergétique et environnementale. La thématique de recherche de l'institut est la Constructibilité déployée sur des axes de recherche sur 3 échelles : composant, ouvrage et territoire. La Constructibilité consiste à assurer la « performance » du produit de construction sur ses diverses composantes et permettre l'introduction rapide d'innovations technologiques pour faire face à un besoin croissant d'infrastructures dans un milieu urbain complexe.

L'IRC a été évalué en 2014 et 2019 par le Haut Conseil de l'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (HCERES) validant son statut d'Unité de Recherche ou Laboratoire sous tutelle d'un établissement d'enseignement supérieur, l'ESTP Paris, dans le domaine du génie civil. En 2016, 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 par conséquent 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 : 28 enseignants-chercheurs, 5 enseignants-chercheurs HDR et du personnel technique et administratif (7). Le laboratoire accueille un potentiel d'une vingtaine de doctorants, environ 20 stagiaires de Master ou TFE Recherche et encadre une quarantaine d'élèves ingénieur en Projets Industriels d'Entrepreneuriat et de Recherche (PIER) par an. L'IRC présente l'avantage de regrouper des enseignants-chercheurs maîtrisant des disciplines variées : 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 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 les campus de l'ESTP Paris, Cachan, Troyes et Dijon, partagées avec la direction des études de l'école. Une dizaine de plateformes technologiques accueille des activités de recherche et d'enseignement pour favoriser les échanges entre les enseignants-chercheurs et les élèves de l'école : Ingénierie des Bétons, Matériaux de Chaussées, Géotechnique, Hydraulique, Mécanique, Topographie, Mesure Physique, Génie Énergétique de la Construction Durable, Génie Électrique, BIM. Les plateformes technologiques 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 des élèves de l'ESTP Paris. L'IRC s'est par ailleurs doté d'outils scientifiques avancés utilisables en transverse pour tous les domaines d'étude. Parmi les plus novateurs et intéressants pour



REPRÉSENTATION DE L'ÉCOSYSTÈME AUTOUR DE L'IRC

Pôles de compétitivité

Cap Digital 2018, IAR 2018 (Advancity 2014)

Académiques

- Tous les laboratoires de Génie Civil
- COMUE UPE



Autres écoles



Projets nationaux

ERINOH, RECYBETON, MURE, DVDC, MINnD, FastCarb

GIS ou équivalent

Constructic, IMdR, EcoSD

Entreprises partenaires de l'ESTP Paris



Fédérations, syndicats professionnels et associations



Fondation ESTP Paris

Partenaires internationaux

Académiques : Polimi, ETS Montréal, GCU, ENSTP Alger, Mohammed V, INP HB - ESTP Yamoussoukro

Ouverture potentielle sur les 88 partenaires de l'ESTP Paris

Territoires :

3 campus Cachan, Troyes et Dijon

Régions Ile de France, Grand-Est, Bourgogne-Franche-Comté

le domaine de la construction, citons : un érodimètre EFA (Érosion Function Apparatus), équipement unique en Europe pour caractériser les phénomènes d'érosion, un canal hydro-sédimentaire, un analyseur par Diffractométrie de Rayons X (DRX), un Spectromètre Infra-Rouge, un Analyseur Thermogravimétrique couplé à un Calorimètre à Balayage Différentiel (TGA/DSC), un Granulomètre Laser, une station météorologique... Les approches expérimentales, en laboratoire ou *in situ*, sont complétées par des simulations numériques portées par un cloud et des stations de calcul.

La gouvernance de l'IRC s'inspire des grands instituts de recherche modernes. Sous l'impulsion du directeur de l'IRC, en relation avec toutes les directions de l'école (études, relations internationales, entreprises, communication, campus), les enseignants-chercheurs définissent les objectifs de recherche dans un plan quinquennal. Un Conseil de la Recherche, constitué d'experts, de professionnels et de personnalités académiques du secteur, se réunit 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 des Projets collaboratifs Nationaux comme : Multi-Recyclage des Enrobés tièdes (MURE), Durée de Vie Des Chaussées (DVDC), Modélisation des INformations Interopérables pour les Infrastructures Durables (MINnD), FastCarb et participe activement aux travaux de recherche de l'Institut pour la Transition Énergétique EFFICACITY. Des projets ANR sont déposés chaque année (MOVEDVDC, CO2NCRETE, ATLANTE, FASTCARB).

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 2019

13

thèses en cours
4 thèses soutenues
en 2019

5

thèses en co-tutelle
avec des partenaires
académiques
internationaux

20

stages de TFE ou de
Master Recherche

3

axes de recherche,
regroupant une
vingtaine de projets

2

chaires d'enseignement
et de recherche, Génie
Civil Nucléaire (2009)
et Ingénierie
des Bétons (2014)

3

séminaires
de recherche en
Constructibilité

20

projets Industriels
d'Entrepreneuriat et de
Recherche (PIER) encadrés
par les enseignants-
chercheurs de l'IRC -
auxquels participent près
de 60 élèves ingénieurs de
l'ESTP Paris

35

membres à fin
décembre 2019.

28 enseignants-
chercheurs,
dont 5 enseignants-
chercheurs Habilités
à Diriger des
Recherches (HDR).
7 personnels
techniques
et administratifs

20

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

10

plate-formes
technologiques
d'enseignement
et de recherche
sur une surface
de plus
de 1500 m²

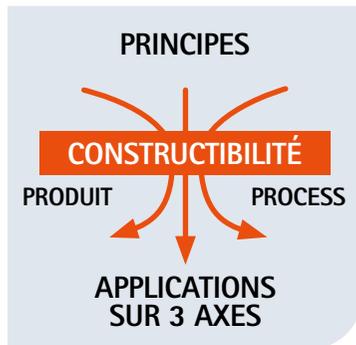
1,8

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



La thématique de Constructibilité

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



Le positionnement répond à un enjeu majeur du secteur de la construction, à savoir étudier les stratégies de construction afin d'optimiser la valeur de l'objet construit, tout en anticipant les évolutions technologiques, écologiques et sociétales.

DÉFINITION

La Constructibilité est définie comme 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. Tous les aspects relatifs au produit, procédé et processus de l'acte de construire sont inclus dans une étude de Constructibilité.

La Constructibilité ou « constructibility » se différencie des concepts Anglo-Saxon de la « buildability » (mise en œuvre/réalisation d'un concept) et de la « constructability » (prise en compte du cycle de vie de l'ouvrage).

OBJECTIF

Assurer la « performance » du produit de la construction sur ses diverses composantes et permettre l'introduction rapide d'innovations technologiques pour faire face à un besoin croissant d'infrastructures dans un milieu urbain complexe.

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 et toute la durée de vie du produit.

ARCHITECTURE

- La Constructibilité s'apparente à une approche systémique du produit à faire mis en œuvre par son projet, le système pour faire, tout en prenant en compte l'ensemble des parties prenantes. Le couple produit/process de la construction est ainsi pris en compte dans une approche globale ;
- Elle croise les trois étapes du cycle de vie d'un projet de construction (programmation, projétation, production) avec ses composantes principales (consistance/performances du produit considéré, 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 valeur du projet et d'appréhender le rôle des interventions humaines dans le processus.

REPRÉSENTATION

Une représentation de la Constructibilité est donnée par un double cycle en V : le développement produit sur lequel se superpose la prise en compte du processus de mise en œuvre.

L'IRC étudie les principes de la Constructibilité et les déploie sur l'ensemble de la chaîne de valeur d'un ouvrage : du composant, au matériau de l'ouvrage à réaliser, et jusqu'au système en évolution. Les projets de recherche de l'IRC présentés dans ce rapport d'activité s'inscrivent dans chacun de ces niveaux au sein d'un programme d'application.

MOTS-CLÉS

Conception amont, performance, optimisation projet, qualité/coût/délai, ingénierie système, multicritère, transversalité, couple produit/process, chaîne de valeur, analyse fonctionnelle, cycle en V. ■

Les verrous de l'IRC

L IRC vise à lever les verrous scientifiques suivants à travers 3 axes thématiques et des programmes de recherche finalisés :

- **Matériaux constructifs** : amélioration de la valeur et de la recyclabilité des matériaux de construction, prédiction du comportement du matériau sur son cycle de vie y compris son ouvrabilité ;
- **Ouvrages durables** : moyens de garantie de la performance et de la conformité du fonctionnement d'un ouvrage ;

- **Systèmes urbains** : confrontation de l'inscription territoriale, conditions d'une transition numérique et digitalisation. Ces verrous sont détaillés dans la matrice de lecture ci-dessous précisant l'approche propre de l'IRC : le développement de sujets transverses, leur analyse sur plusieurs échelles, la prise en compte des aspects produit et process et l'intégralité de la chaîne de valeur considérée. Le programme scientifique de l'IRC vise à lever progressivement ces différents verrous. ■

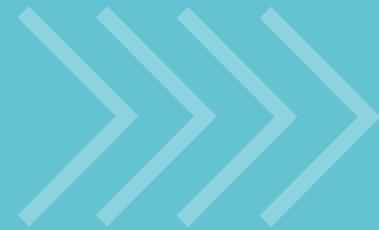
CONSTRUCTIBILITÉ		
AXES	PRODUIT	PROCESS
MATÉRIAUX CONSTRUCTIFS	Performance des Géomatériaux et Écomatériaux <ul style="list-style-type: none"> • Couplages multi-physiques et leur impact sur la performance des matériaux et des ouvrages de génie civil • Conception et caractérisation de matériaux biosourcés, valorisation des déchets (industriels, végétaux...) 	Recyclabilité et Ouvrabilité <ul style="list-style-type: none"> • Développement d'outils innovants de caractérisation des déchets du BTP en vue d'une meilleure recyclabilité • Interaction géomatériaux/modes constructifs et ouvrabilité dans un objectif de réduction de consommation des ressources naturelles
OUVRAGES DURABLES	Performance du bâti et de l'infrastructure <ul style="list-style-type: none"> • Interactions matériaux/composants/ouvrage pour la caractérisation de la performance globale • Définition d'indicateurs de performance associés aux fonctions d'ouvrage (nouvelles et existantes) 	Conception et Conformité <ul style="list-style-type: none"> • Méthodologies systémiques de garantie de la performance (dont la gestion intégrée des risques) • Modélisation du comportement de l'ouvrage et de son processus de construction, simulation et mesure de sa performance (dont BIM)
SYSTÈMES « URBAINS »	Inscription dans le territoire <ul style="list-style-type: none"> • Articulation avec l'aménagement des réseaux et des villes • Influence des paramètres d'étude du système urbain (ex. : gestion de l'eau) 	Gestion et Résilience <ul style="list-style-type: none"> • Modélisation de systèmes complexes • Outils de représentation et gestion du territoire (SIG, big data, digitalisation)





LES MATÉRIAUX CONSTRUCTIFS





PROGRAMME

**MATÉRIAUX
CIMENTAIRES
CHAIRE INGÉNIEURIE
DES BÉTONS**





CONTEXTE ET OBJECTIFS

La réduction de l'impact carbone du béton et l'économie circulaire sont au cœur des différentes actions de recherche de la thématique, que ce soit dans le cadre du développement des nouveaux bétons, que dans l'analyse de leurs performances et de leurs interactions avec l'ouvrage.

Par ailleurs, la thématique Matériaux cimentaires s'inscrit dans le volet scientifique de la Chaire IdB, qui vise à positionner l'ESTP Paris comme un acteur et un partenaire privilégié pour l'industrie cimentière. La Chaire IdB, créée en 2014, a ainsi pour objectifs de faciliter la réflexion croisée entre les industriels et le monde académique sur la Constructibilité en béton, et d'accompagner la recherche et la transmission des connaissances relatives aux bétons du futur.



MISSIONS DE LA CHAIRE IDB

La Chaire IdB s'attache à comprendre et à suivre les évolutions en lien avec le béton :

- Pour proposer une formation toujours à la pointe dans les enseignements de l'ESTP Paris : les nouveaux matériaux, les nouvelles techniques de construction, les nouveaux métiers du béton ;
- Pour élaborer des programmes de recherche et de formation novateurs pour le secteur concerné ;



VERROUS SCIENTIFIQUES

- Pour faire avancer la recherche académique et appliquée ;
- Pour créer de l'innovation autour du matériau béton.

À l'échelle « produit », ils concernent les couplages multiphysiques et la performance des matériaux et des ouvrages, mais aussi la valorisation des matériaux biosourcés et ceux issus de la déconstruction.

À l'échelle « process », ils visent l'interaction entre les matériaux, ou les modes constructifs, et leur ouvrabilité dans l'application visée.



AXES SCIENTIFIQUES ET ACTIONS DE RECHERCHE

Les actions de recherche de la Chaire Ingénierie des Bétons s'inscrivent dans la Constructibilité, suivant les quatre axes scientifiques suivants :

- Valorisation des ressources pour le bâtiment, les travaux publics et les routes : valorisation des ressources naturelles dans le cas de l'étude des bétons de fibres naturelles, mais aussi valorisation des ressources en utilisant la mécano-synthèse pour activer les matériaux et viser ainsi une production réduite de CO2.
- Étude du comportement à l'état frais des bétons : il s'agit ici de travailler

sur la modélisation de la rhéologie de pâtes de ciment et de mortiers, en vue d'optimiser leurs formulations, notamment pour l'utilisation en fabrication additive.

- Procédés et systèmes constructifs de conception innovante : la réduction de l'impact carbone passe aussi par des développements à l'échelle des procédés et les systèmes constructifs à base de béton : mise en œuvre par fabrication additive, ajout de nouvelles fonctions au béton en le rendant « connecté » par exemple.

- Approche performantielle globale : dans le cadre du projet national FASTCARB qui vise à valider au niveau théorique et expérimental le concept de stockage du CO2 par carbonatation accélérée, la Chaire contribue à l'étude de l'impact de la prise en compte des conditions réelles des gaz des cheminées de cimenteries sur la carbonatation pour évaluer la performance globale.



MOTS-CLÉS

Ciment, clinker, béton, fibres, recyclage, mécanosynthèse, rhéologie, durabilité, modélisation, carbonatation.



CONTACT

Céline Florence,
responsable de la Chaire IdB,
cflorence@estp-paris.eu

PARTENAIRES DE LA CHAIRE IDB

VICAT, EFB, ATILH, CIMbéton,
fondation ESTP Paris



Béton connecté dans la Construction 4.0 et les Smart Cities

CONTACTS

Rabah Hamzaoui
rhamzaoui@estp-paris.eu

Benitha Vasseur
bvasseur@estp-paris.eu

Johan Colin
jcolin@estp-paris.eu

Alaoui Mellal
amellal@estp-paris.eu

Bilal Amghar
bamghar@estp-paris.eu

PARTENAIRES

Groupe Vicat, Tutti Concreti,
EQIOM, GCC

CONTEXTE

La transition numérique dans le secteur du bâtiment et des travaux publics permet d'ouvrir des portes sur diverses innovations : notamment en termes d'automatisation, d'industrialisation du chantier, mais aussi en ce qui concerne la multiplication des fonctions sur un même objet.

OBJECTIFS

Étudier comment les composants et les ouvrages en béton connecté peuvent se voir adjoindre de nouveaux rôles en plus de ceux pour lesquels leurs performances sont reconnues depuis longtemps (sécurité, robustesse, durabilité, etc.).

ACTIONS DE RECHERCHE

Le béton connecté est une thématique en développement au sein de la Chaire IdB avec des premiers travaux exploratoires réalisés dans le cadre de stages. Ces investigations ont consisté notamment à prototyper quelques configurations significatives et à étudier les opportunités que présente le béton dans ces configurations. L'intégration de capteurs filaires, sans fil, de fibres optiques dans du béton en tenant compte des contraintes de coulage de ce matériau.

FAITS MARQUANTS ET RÉSULTATS

Les expérimentations réalisées ont visé :

- Le suivi de mesure à partir de capteurs de température et d'humidité dans le béton et le mortier ;
- La mise en place d'une reconnaissance mutuelle de deux éléments en béton (échiquier connecté).

Les résultats obtenus illustrent l'éventail des possibilités qu'offrent



les bétons connectés ainsi que la nécessité d'évaluer leur impact sur la Constructibilité des ouvrages.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- L'échiquier connecté « Matières Grises » a été présenté au salon BATIMAT en novembre 2019 sur le stand de la filière béton. Que ce soit dans le cadre du développement des Smart Cities, ou de l'émergence de la Construction 4.0, l'état de l'art et les premiers travaux réalisés montrent que les bétons connectés permettent de répondre à ces exigences et qu'il est nécessaire de développer les connaissances relatives à ce sujet. ■



L'impression 3D de matériaux cimentaires

CONTEXTE

La technologie de fabrication additive béton entre dans le cadre de la Construction 4.0 et présente de nombreux avantages vis-à-vis des transitions environnementales, digitales et sociétales que nous vivons. En effet cette évolution de mode constructif ouvre diverses opportunités d'innovation que ce soit en termes d'automatisation, d'optimisation de formes, de liberté de géométrie, mais aussi d'économie de la quantité de matière, de sécurité, etc.

OBJECTIFS

L'objectif de ces travaux exploratoires était d'établir une formulation de premix de BFUP adaptée à la fabrication additive.

ACTIONS DE RECHERCHE

La formulation de béton utilisé pour cette technique doit permettre de répondre non seulement aux contraintes spécifiques de la fabrication additive tels que la pompabilité, l'extrudabilité, le temps de prise, la tenue mécanique après impression, mais aussi les contraintes de tout système constructif en termes de résistance, durabilité, impact environnemental, coût...

Ces travaux exploratoires ont été menés dans le cadre de stage. Ils ont consisté d'une part à caractériser le comportement rhéologique de l'argile, pris comme matériau de référence et d'autre part à établir une formulation de premix de BFUP présentant des caractéristiques rhéologiques équivalentes.

FAITS MARQUANTS ET RÉSULTATS

L'utilisation du prototype d'impression 3D dont dispose le Laboratoire Ingénierie des Bétons a permis ensuite de tester les formulations.

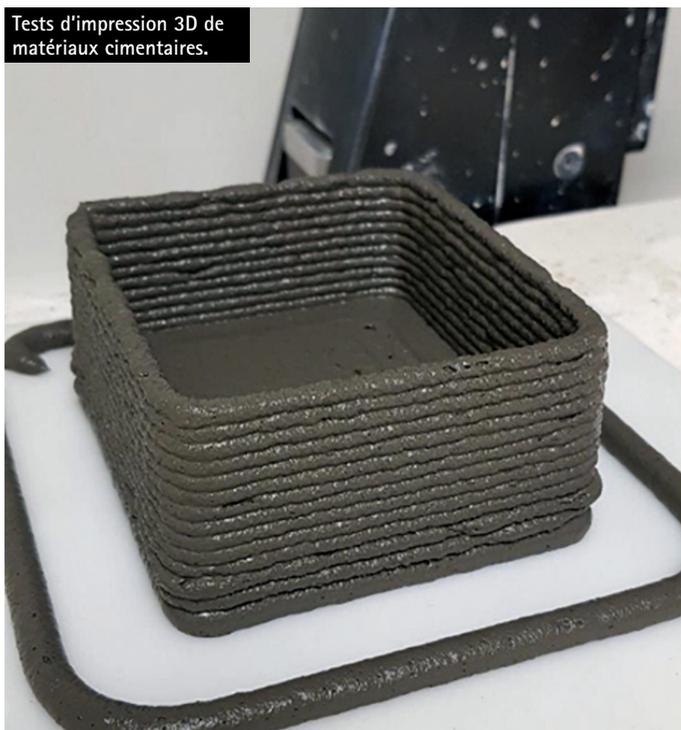
Une formulation imprimable a ainsi pu être établie. Dans la suite de ces premiers tests d'impression encourageants, la mise en place de projets de recherche sur le sujet est en cours d'élaboration. Ils devraient viser non seulement les problématiques relatives aux matériaux mais aussi de façon plus transverse les impacts de l'utilisation de la fabrication additive sur la Constructibilité.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Colin J., Jeong J., Ibrahima P., Nguyen V.G., Mise au point d'une formulation de premix BFUP pour construction additive, Dixite3dPrint, janvier 2019. ■



Tests d'impression 3D de matériaux cimentaires.



CONTACTS

Johan Colin
jcolin@estp-paris.eu

Jena Jeong
jjeong@estp-paris.eu

PARTENAIRES

EFB, SIKA





Clinkérisation par mécanosynthèse

CONTEXTE

La production annuelle mondiale de ciment est de plus de 4 milliards de tonnes ces dernières années, et le procédé de fabrication du clinker, composant principal du ciment, crée d'importants rejets de dioxyde de carbone (CO₂). Afin de répondre à cette problématique et réduire cet impact, l'association européenne du ciment (CEMBUREAU) a lancé un engagement global de réduction de l'impact carbone à toutes les échelles, appelé approche 5C, pour : Clinker, Ciment, Béton (Concrete), Construction et Carbonatation.

CONTACTS

Rabah Hamzaoui
rhamzaoui@estp-paris.eu

Othmane Bouchenafa
obouchenafa@estp-paris.eu

PARTENAIRES

EFB, ATILH.

OBJECTIFS

L'objectif de ce projet est de proposer un matériau de construction innovant respectant l'environnement. Plus précisément, l'approche consiste à proposer un clinker obtenu par mécanosynthèse indirecte.

ACTIONS DE RECHERCHE

Nos travaux s'inscrivent à l'échelle « Clinker » de l'approche 5C décrite par CEMBUREAU. Ils portent sur le procédé de la clinkérisation par mécanosynthèse. La fabrication de clinker par mécanosynthèse indirecte consiste à coupler 2 techniques : un broyage à haute énergie, et un traitement thermique de température de 900 °C ou moins. Avec cette technique, nous favorisons l'énergie électrique contrairement au procédé actuel qui utilise l'énergie fossile.

FAITS MARQUANTS ET RÉSULTATS

Grâce à la mécanosynthèse indirecte, nous sommes arrivés à obtenir les différents composés du clinker à une température de 900 °C alors qu'avec le procédé actuel, ces composés apparaissent à partir de 1 200 °C. Un contrat de post-doctorat financé par l'EFB et soutenu par l'ATILH, dans le cadre de la Chaire IdB, a débuté en octobre 2019 pour une durée de 18 mois, et a comme objectif d'optimiser le procédé de clinkérisation par mécanosynthèse et son dimensionnement à l'échelle industrielle.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- O. Bouchenafa, Mécanosynthèse et matériaux de construction : Optimisation et application pour la clinkérisation et la géopolymérisation, Thèse doctorat, Université Paris-Est, 2019.
- O. Bouchenafa, R. Hamzaoui, L. Azem, A. Bennabi, J. Colin, Manufacturing equivalent Clinker by indirect mechano-synthesis process, in : 1st Int. Conf. Innov. Low-Carbon Cem. Concr. Technol., 2019 : pp. 1-4. ■



Four haute température.

Valorisation des granulats de bétons recyclés

CONTEXTE

La valorisation des bétons de déconstruction a débuté dans le domaine routier. Elle a poursuivi son développement avec l'utilisation de granulats de béton recyclés (GBR) dans les bétons (Projet National RECYBETON 2012-2018). Un autre axe de valorisation est le stockage de CO₂, dégagé notamment lors de la production de clinker, dans les granulats de béton recyclés (GBR).

OBJECTIFS

Le Projet National FASTCARB 2017-2020 a ainsi pour objectif d'étudier à l'échelle du laboratoire et à l'échelle industrielle le stockage de CO₂ de manière accélérée dans les GBR ainsi que l'impact de ce traitement sur la qualité des granulats obtenus. L'objectif de nos recherches, qui s'inscrivent dans ce Projet National, est de caractériser l'impact des impuretés comme NO₂ et SO₂ présents dans les dégagements considérés, sur la carbonatation du CO₂, donc sur le piégeage du CO₂.

ACTIONS DE RECHERCHE

Des essais en laboratoire ont été réalisés pour piéger le gaz CO₂ pur et le gaz multi-composant (CO₂+NO₂+SO₂) dans des GBR issus d'un centre de valorisation. Les résultats expérimentaux nous montrent que les GBR captent le gaz CO₂ beaucoup plus vite que le béton neuf. En revanche, ceci montre une légère diminution lors de l'application du CO₂ en présence de NO₂ + SO₂.



FAITS MARQUANTS ET RÉSULTATS

Dans le cadre du PN RECYBETON, les travaux de thèse d'O. Ben Maaouia ont notamment contribué à montrer que le chrome hexavalent reste bien emprisonné dans la matrice cimentaire des bétons de déconstruction

Les perspectives des travaux réalisés pour caractériser le stockage de CO₂ dans les granulats de béton recyclé porte d'une part sur l'estimation de la durée et de la capacité de stockage de CO₂ dans un lit de granulats, et d'autre part sur la vérification de la cohérence des résultats obtenus en laboratoire et à l'échelle industrielle.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- O. Ben Maaouia, R. Hamzaoui, A. Bennabi, J. Colin, H. Colina, Chromium stabilization and trapping in the cement matrix of RCA, Construction and Building Materials, Volume 191, 2018, Pages 667-678
- J. Jeong, J. Colin, L. Izoret "Experimental study of accelerated carbonation including No₂ and So₂ on recycled concrete aggregates": Part I, CO2STO2019, 2019, e-ISBN: 978-2-35158-232-9, Publisher: Rilem Publications SARL

- J. Colin, J. Jeong, L. Izoret « Aptitude de granulats recyclés au stockage de CO₂ : essais de carbonatation à base du gaz multi-constituant, CO₂, SO₂ et NO_x, Journée « Le béton recyclé, un puits de carbone ? » Les avancées du Projet National FastCarb, FFB Paris – 12 novembre 2019. ■



CONTACTS

Johan Colin
jcolin@estp-paris.eu

Jena Jeong
jjeong@estp-paris.eu

Rabah Hamzaoui
rhamzaoui@estp-paris.eu

PARTENAIRES

EFB, ATILH, IFSTTAR



Valorisation des fibres végétales dans des matériaux cimentaires



Mortier fibré à fibres de chanvre et chènevotte : coupe sur éprouvette.

CONTEXTE

Les fibres synthétiques habituellement utilisées pour renforcer les matrices minérales sont privilégiées pour améliorer considérablement les caractéristiques mécaniques des liants, des mortiers et des bétons. Cependant, la fabrication de ces renforts fibreux et l'industrialisation de produits finis nécessitent des investissements parfois très coûteux et d'autre part, les procédés de fabrication sont énergivores, avec un impact sur les émissions de gaz à effet de serre non négligeable.

OBJECTIFS

En combinant les aspects environnementaux, économiques et de durabilité, associer les matériaux de construction et des renforts à base de fibres végétales représente l'avenir pour le secteur de la construction. L'objectif de ce projet consiste à étudier des bétons ou mortiers fibrés avec des fibres végétales locales.

ACTIONS DE RECHERCHE

Les fibres végétales peuvent être utilisées en substitution ou en complément des renforts synthétiques et artificiels existants. Nos actions de recherche visent à approfondir les connaissances sur plusieurs aspects pour mieux comprendre l'interaction fibre/matrice cimentaire afin de mettre au point des formulations optimales. Dans le cadre du projet FIBRABETON, un travail de thèse a été lancé sur le Campus ESTP Troyes en utilisant les différents types de fibres (bambou, miscanthus, lin et le chanvre) pour proposition de chapes fibrées. Ce projet est réalisé en partenariat avec VICAT et FRD, et financé par la Région Grand Est, l'ADEME et FEDER.

FAITS MARQUANTS ET RÉSULTATS

Nous avons montré que la combinaison entre les fibres de chanvre et de la chènevotte peut améliorer les propriétés dans les bétons (mortiers). Par ailleurs, des additions minérales (cendres volantes) structurellement modifiées peuvent être très bénéfiques dans les formulations finales.

Pour le travail de thèse, nous avons pu montrer la faisabilité de l'utilisation des fibres végétales dans les formulations chapes anti-retrait. Les fibres de chanvre peuvent jouer un rôle important grâce à leur introduction dans les formulations de chapes. Le Campus ESTP Troyes lancera un post-doc sous la responsabilité de Benitha VASSEUR sur les chapes à fibres végétales pour l'année 2021.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Sergio Pons Ribera, Valorisation des fibres végétales dans des matériaux cimentaires. Application : formulations pour chapes et bétons à haute performance. Thèse lancée en septembre 2019 sous la direction de Rabah Hamzaoui avec l'encadrement de Benitha Vasseur et Johan Colin.



Mortier fibré à fibres de chanvre et chènevotte : zoom au MEB.

CONTACTS

Rabah Hamzaoui
rhamzaoui@estp-paris.eu

Benitha Vasseur
bvasseur@estp-paris.eu

Johan Colin
jcolin@estp-paris.eu

PARTENAIRES

VICAT, FRD, INRA, ENS CACHAN,
LASIE Université de La Rochelle

Laboratoire Ingénierie des Bétons (IdB)

Un seul laboratoire sur deux espaces : dans le nouveau bâtiment Louis Vicat, inauguré en février 2019, un espace dédié aux bétons et aux granulats, et un autre pour les ciments et mortiers dans le bâtiment Terzaghi.

Les activités d'enseignement et de recherche de la Chaire IdB peuvent ainsi profiter de ces deux espaces, avec des moyens techniques communs d'une part, d'autres plus spécifiques pour la recherche d'autre part.

Grâce au financement de la Fondation ESTP et de l'EFB, le laboratoire a pu se doter d'équipements de pointe. Ils permettent d'étudier les matériaux cimentaires à différents niveaux : à l'échelle des constituants (ciments, sables, fibres), mais aussi à l'état frais et à l'état durci des mortiers et des bétons.



Granulomètre laser

Le granulomètre laser est utilisé pour déterminer la taille de grains de dimensions comprises entre 0,05 et 900 µm. En utilisant la diffraction-diffusion de la lumière, il permet d'obtenir une répartition par classe granulométrique d'un échantillon étudié. Cette mesure est utilisée par exemple pour étudier la surface spécifique de ciment.

- Caractérisation des ciments : densité, surface spécifique, BET, appareil Vicat, appareil Blaine...
- Caractérisation des granulats : tamiseuses, concasseur, granulomètre laser...
- Caractérisation physico-chimique : ATG, Fluorescence X, Diffractomètre X, Spectromètre IR, Spectromètre UV-V, calorimètre
- Fabrication de mortiers et de bétons (malaxeurs de 2 à 125 litres)
- Fabrication additive (imprimante 3D de paillasse)
- Caractérisation de l'état frais (cône d'Abrams, mesure du temps d'écoulement, aéromètre...)
- Fabrication d'éprouvettes de mortier et de béton (aiguilles vibrantes, table vibrante, table à chocs, rectifieuse)
- Conservation des éprouvettes (armoires de conservation, enceintes climatiques, bacs de conservation)
- Caractérisation mécanique d'éprouvettes de mortier et de béton (presse de 500 à 3000 kN). ■



Rectifieuse

Pour réaliser des essais de compression sur des éprouvettes cylindriques, il est indispensable de s'assurer que les surfaces sur lesquelles la charge va s'appliquer sont planes et perpendiculaires à l'axe de chargement. La rectifieuse permet de réaliser cette opération de préparation des faces d'appui des éprouvettes.



CONTACT

Johan Colin
Responsable du laboratoire
Ingénierie des Bétons
jcolin@estp-paris.eu



PROGRAMME **MATÉRIAUX**
DE CHAUSSÉES





CONTEXTE ET OBJECTIFS

La conception et la maintenance des infrastructures routières nécessitent un choix raisonné des matériaux à moindre coût en répondant aux préoccupations actuelles des différents acteurs de la route (sociétale, environnementale, technique, économique). Les actions de recherche sont orientées :

- d'une part sur des aspects méthodologiques pour définir et valider des outils technologiques et scientifiques permettant d'évaluer la performance réelle du matériau sur le terrain
- d'autre part sur des aspects de compréhension du comportement des matériaux de chaussées sur leur cycle de vie.



VERROUS SCIENTIFIQUES

Ils s'articulent à différents niveaux.

- À l'échelle « produit », ils visent notamment à définir des caractérisations pertinentes et optimisées des matériaux par le biais d'essais expérimentaux existants, modifiés ou développés mais aussi à comprendre les différents mécanismes d'interaction et d'évolution (que ce soit pour le liant bitumineux ou les enrobés, sur une large gamme de températures, à différentes étapes de vie sur la chaussée).
- À l'échelle « process », ils visent à évaluer voire proposer de nouveaux outils de caractérisation du matériau fini (maniabilité des enrobés bitumineux, collage des interfaces des couches...)



AXES SCIENTIFIQUES

Dans un concept de Constructibilité, l'activité « matériaux de chaussées » au sein de l'IRC se décline selon trois axes :

- L'évaluation performancielle des matériaux routiers, démarche indispensable permettant de se prémunir d'un éventuel problème de malfaçon ; elle peut se traiter tant au niveau de la mise en œuvre, que sur le matériau en place dans la chaussée ou encore en fin de vie en vue d'une éventuelle réutilisation ;
- La valorisation de matériaux alternatifs, d'origine routière ou non, pour répondre aux exigences environnementales croissantes, en combinant différentes techniques à chaud, tiède ou à froid ;
- Les nouvelles fonctionnalités de la route pour une meilleure prise en compte de son environnement notamment en milieu urbain.



OBJETS D'ÉTUDE

Les activités de Recherche sont menées au travers de différents projets de degrés de maturité divers et alimentées par des travaux de masters ou de doctorats :

- collaboratifs au sein notamment de projets nationaux (MURE, DVDC) ou ANR associé (MOVEDVDC), notamment sur les mécanismes d'endommagement des chaussées,
- avec des universités partenaires (ETS, INP-HB Yamoussoukro, ENSTP) ou industriels (Eurovia), notamment sur la réutilisation de matériaux (agrégats d'enrobés, bardeaux d'asphalte, fibres, à chaud ou à froid)
- internes avec des financements de la Fondation ESTP Paris sur la question de la modélisation de la voirie (co-gestion de la voirie urbaine).



MOTS-CLÉS

voirie, bitume, enrobé, matériaux alternatifs, recyclage, mise en œuvre, durabilité, dégradation, modélisation.

CONTACT

Anne Dony

Responsable du programme
Matériaux de Chaussées
adony@estp-paris.eu





Intégration de la chaussée dans des projets globaux et nouvelles fonctionnalités pour une gestion coordonnée : routes et réseaux enterrés

CONTEXTE

La densification des sous-sols urbains en réseaux de distribution, entraîne des interventions impliquant différents acteurs. Celles-ci impactent généralement la voirie, soit l'ensemble de l'infrastructure routière, tant structurellement (composante verticale) que superficiellement (composante horizontale). Outre les coûts financiers, chaque intervention peut fragiliser la structure et gêner les divers usagers.

OBJECTIFS

Nos travaux visent à améliorer la gestion coordonnée des données de la voirie et son environnement dans un référentiel spatial. Nous cherchons ainsi à développer une modélisation adaptée à la gestion de l'infrastructure intégrant la voirie et ses éléments constitutifs avec les matériaux et leurs épaisseurs, ainsi que des outils facilitant la collecte et l'intégration d'informations spatiales et sémantiques de voirie.

ACTIONS DE RECHERCHE

La démarche s'organise en quatre axes : – description des éléments constitutifs de voirie, pour en proposer une vision cohérente ; – étude des données existantes pour sa gestion, afin d'identifier connaissances et besoins ; – modélisation numérique sous SIG, pour aider les collectivités à produire et maintenir des données sur leurs infrastructures ; – analyse des relations et interactions spatiales entre voirie et réseaux, pour ouvrir les discussions sur les choix constructifs de la voirie selon présence ou pas de réseaux de distribution (Thèse Antonin Pavard financée Fondation ESTP et stages master).

RÉSULTATS

- Développement méthodologique : construction de données géospatiales surfaciques de voirie ; interopérabilité entre des données géospatiales surfaciques et linéaires de voirie.
- Construction et enrichissement d'une base de données (BD) de voirie : développement d'une méthode pour constituer une BD voirie sur la commune de Cachan ;
- Séminaire de recherche – Le numérique au service de la route : identification des besoins pour optimiser la gestion de la route (instrumentation, modélisation, collecte et partage de données).

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Communication en 2019 à la conférence internationale INFRA (Canada) spécialisée sur les pratiques associées aux infrastructures urbaines et à leur gestion.
- Participation en 2019 au concours Poster scientifique lors des Journées Techniques Route. ■

CONTACTS

Anne Dony
adony@estp-paris.eu

Patricia Bordin
Patricia.Bordin@GeoSpective.fr

PARTENAIRES

Universités Paris I (Panthéon Sorbonne), et Paris VII (Denis Diderot), GRTgaz, Eurovia, Valentin, J.-P. Christory Consultant



Constitution et enrichissement d'une BD voirie Auteur : A. Pavard, 2019.



Étude du comportement thermomécanique des matériaux bitumineux contenant des fibres de palmier

CONTEXTE

Le réseau routier algérien est exposé à des conditions de mise en service agressives, des hautes températures en été ainsi qu'un trafic de poids lourds élevé, provoquant des déformations permanentes au niveau de la couche de roulement des chaussées. Par ailleurs, l'entretien annuel d'une importante production de palmiers produit des gisements conséquents en déchets végétaux, soulevant ainsi des problématiques environnementales. Les fibres issues des déchets de palmier sont employées dans le domaine du génie civil (isolation thermique, fabrication de bétons...), mais non exploitées dans la construction routière.

OBJECTIF

L'objectif de la thèse est de valoriser les fibres de palmier en les incorporant à des enrobés de type Stone Matrix Asphalt pour améliorer les performances thermomécaniques des chaussées algériennes.

ACTIONS DE RECHERCHE

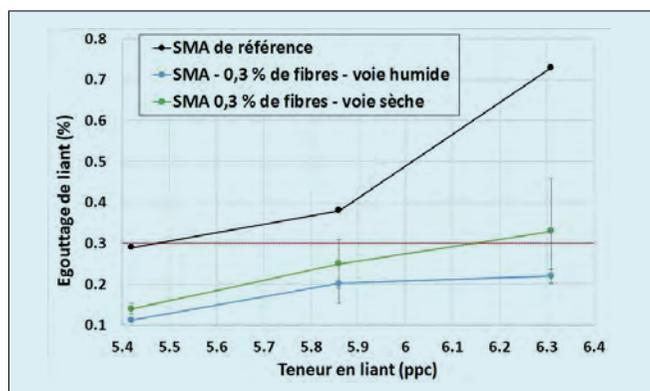
Une procédure de fabrication a été développée pour produire un liant bitumineux à base de fibres. Les propriétés physiques des mélanges ont été évaluées pour différents dosages en fibres avant et après vieillissement au moyen d'essais conventionnels,

rhéologiques et thermiques. Des enrobés fibrés ont été préparés suivant deux voies de fabrication. Leurs caractéristiques physiques et thermomécaniques telles que la compactabilité, la stabilité Marshall, l'égouttage de liant, la sensibilité à l'eau et la résistance à l'orniérage ont été évaluées et comparées à celles d'un enrobé de référence. Enfin, la distribution spatiale des fibres à l'intérieur des enrobés a été scannée par tomographie de rayons X.

FAITS MARQUANTS ET RÉSULTATS

Les essais réalisés sur les différents mélanges bitume-fibres ont montré que l'ajout jusqu'à 6 % en masse de fibres au bitume conférait une plus grande consistance, une augmentation de la viscosité et de la norme du module de cisaillement aux températures de service, avant et après vieillissement. À l'échelle de l'enrobé, les tests volumétriques et physiques ont démontré que l'addition de fibres conduisait à une légère

diminution de la teneur en vides, une augmentation de la stabilité et du fluage et une réduction significative jusqu'à 50 % de l'égouttage de liant. Les fibres entraînent une légère diminution de la sensibilité à l'eau en raison de leur caractère hydrophile. Une amélioration de la résistance à l'orniérage des enrobés fibrés a été notée. Enfin, les analyses de macrostructure ont révélé que les fibres de palmier pouvaient créer un réseau tridimensionnel au sein de la matrice bitumineuse. ■



CONTACTS

Layella Ziyani
lziyani@estp-paris.eu

Anne Dony
adony@estp-paris.eu

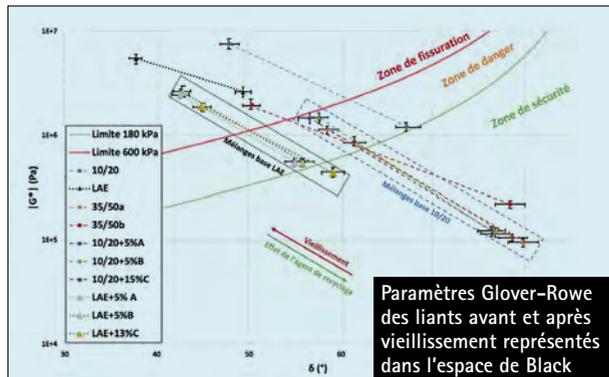
PARTENAIRES

École Nationale Supérieure des Travaux Publics d'Alger (ENSTP), Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB)





Étude de l'impact physico-chimique des liants dits « régénérants » sur la Constructibilité (performance et durabilité) des enrobés recyclés



CONTEXTE

Matériaux majoritairement utilisés dans les structures de chaussées en France, les enrobés bitumineux présentent l'avantage d'être entièrement recyclables. Pour répondre à une démarche de développement durable, l'optimisation de leur réutilisation est un enjeu important. Un facteur majeur influant sur les performances est l'évolution du liant présent dans l'enrobé recyclé, composé d'un mélange de liants bitumineux vieilli et neuf. Pour des très forts taux, « régénérer » le liant de l'agrégat d'enrobé (AE) peut s'avérer nécessaire

pour assurer la pérennité de la chaussée. Il convient alors de bien comprendre le rôle des additifs proposés et de définir leur caractère « régénérant ».

OBJECTIFS

Ces travaux de recherche visent à déterminer les mécanismes d'action et leur évolution dans le temps d'additifs dits « régénérants », d'une part sur les propriétés physico-chimiques du mélange de liants bitumineux présent dans un enrobé recyclé, d'autre part sur les propriétés mécaniques du produit fini.

ACTIONS DE RECHERCHE

Une thèse CIFRE réalisée par Fayçal Lahjiri a été initiée en 2017. La démarche est articulée sur des travaux, d'une part à l'échelle des liants bitumineux et d'autre part à l'échelle des enrobés bitumineux,

avec deux stades d'évolution (au jeune âge et vieilli dans le temps). Les différents liants et additifs de base et des mélanges sont caractérisés pour déterminer et comparer les compositions et structures mais aussi les comportements rhéologiques. Les différents outils méthodologiques et les critères retenus dans la littérature sont analysés et de nouvelles approches sont envisagées (fractions SARA-AD, indices Ico, Tg, G*...). Sur les enrobés, après vérification de l'homogénéité du mélange recyclé, le comportement mécanique est étudié par des essais de modules et de retrait empêché (TSRST).

RÉSULTATS

Comparaison liant extrait d'AE avec bitume dur 10/20 et 35/50 vieilli : compositions génériques différentes (LAE le plus structuré) et comportement rhéologique plus fragile du LAE selon le critère Glover-Rowe

Formulation de mélanges LAE + additif avec des modules IG*1 15°C, 10Hz comparables au 35/50 de référence : mise en évidence du caractère « ramollissant » des additifs dans les mélanges neufs et vieillis et meilleur comportement obtenu avec l'additif pétro, plus visqueux que les bio.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Premier prix « Poster scientifique » aux Journées Techniques Route (Nantes- Février 2019)
- Présentation orale au Petersen Asphalt Research Conference aux USA (juillet 2019)
- Communication et présentation orale au « 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE) » - International Society for Asphalt Pavements en Italie (Septembre 2019). ■

CONTACTS

Anne Dony
adony@estp-paris.eu

Layella Ziyani
lziyani@estp-paris.eu

PARTENAIRES

EUROVIA (Centre de Recherche Mèrignac), Cerema Méditerranée, Université de Montpellier (Laboratoire Charles Coulomb)

Comportement thermomécanique des enrobés contenant des agrégats d'enrobés (AE) et des bardeaux d'asphalte recyclés (BPC) – Caractérisation des liants du mélange

CONTEXTE

Pour répondre aux contraintes économiques et environnementales, l'utilisation de matériaux bitumineux recyclés dans les techniques routières est un axe prioritaire, avec la nécessité de garantir une durabilité du matériau final au moins équivalente à celle d'enrobés classiques. Les anciennes chaussées bitumineuses fournissent des ressources importantes appelés agrégats d'enrobés (AE ou RAP) contenant ~5 % en masse de bitume vieilli. Le domaine de l'étanchéité peut également proposer des matériaux bitumineux en fin de vie tels que les bardeaux d'asphalte de post consommation (BPC ou RAS) très développés au Canada, contenant plus de 25 % en masse de bitume vieilli. Les différences en nature et teneur en bitume rendent complexes leur association au sein même de matériaux neufs (qualité du mélange, mobilisation des divers liants dans le matériau final), conduisant à des comportements viscoélastiques variables et pouvant limiter les taux d'incorporation.

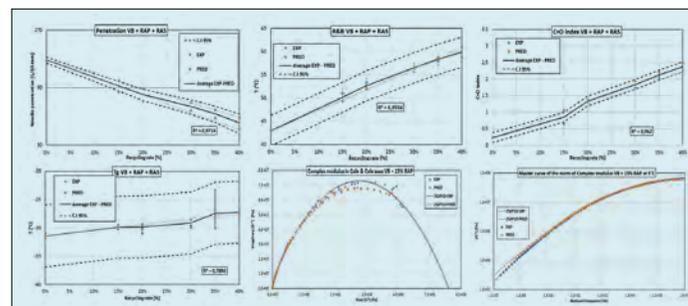
OBJECTIFS

L'objectif de cette thèse démarrée en 2017 et réalisée par Abdeljalil Daoudi est de comprendre l'influence des liants bitumineux issus d'AE et/ou BPC dans des mélanges en proportions variables. Le deuxième objectif est de vérifier l'application ou non de lois de mélange pour la prédiction de propriétés conventionnelles, physicochimiques et rhéologiques.

ACTIONS DE RECHERCHE

À une échelle expérimentale, trois cas de mélanges sont étudiés dans plusieurs ratios de bitumes recyclés (RBR) jusqu'à 40 % en masse, avec

prise en compte de la remobilisation estimée du liant de BPC. Des caractérisations par des essais conventionnels (pénétration et point de ramollissement bille anneaux), rhéologiques (module complexe en cisaillement) et physico-chimiques (spectroscopie infrarouge pour le niveau d'oxydation (vieillesse) et calorimétrie différentielle à balayage pour la température de transition vitreuse) permettent de comparer les comportements. Le modèle 2S2P1D est notamment utilisé pour analyser les données expérimentales de l'essai de module complexe.



RÉSULTATS

Au niveau expérimental, mise en place d'une procédure d'extraction/récupération sur BPC : le liant extrait est très dur, fortement oxydé et difficile à caractériser en rhéologie.

Prédiction des caractéristiques conventionnelles, rhéologiques et physicochimiques des mélanges par des lois linéaires ou logarithmiques

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Papier accepté à la conférence ISBM Lyon 2020 avec actes. ■

CONTACTS

Anne Dony
adony@estp-paris.eu

Layella Ziyani
lziyani@esp-paris.eu

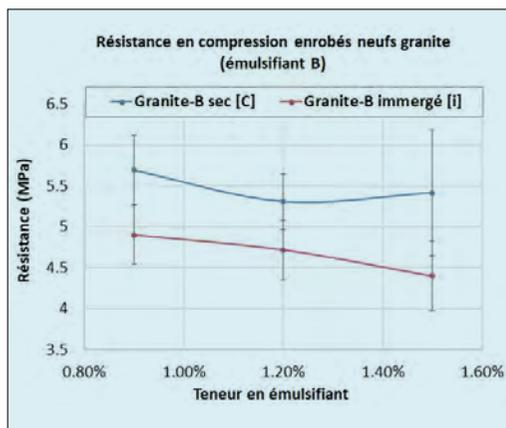


PARTENAIRES

ETS, École de Technologie Supérieure de Montréal (Canada)



Étude de choix constructifs pour garantir la mise en œuvre et la durabilité des enrobés recyclés à l'émulsion de bitume



CONTEXTE

Le recyclage à froid des enrobés des anciennes chaussées est une alternative économique et environnementale intéressante dans la construction routière pour la Côte d'Ivoire. L'utilisation d'émulsion de bitume, dispersion de fines gouttelettes de bitume stabilisées par des agents tensioactifs dans une phase aqueuse, pour l'enrobage à froid induit des phénomènes physico-chimiques complexes aux interfaces entre les constituants qui gouverneront le mécanisme d'adhésion liant-substrat(s) et la qualité de l'ouvrabilité du matériau.

OBJECTIF

L'objectif de la thèse de Yacouba Konaté est d'étudier les phénomènes physico-chimiques aux interfaces émulsion-granulats et émulsion-agrégats d'enrobé afin de mieux appréhender la formulation et l'évolution des propriétés mécaniques des enrobés recyclés.

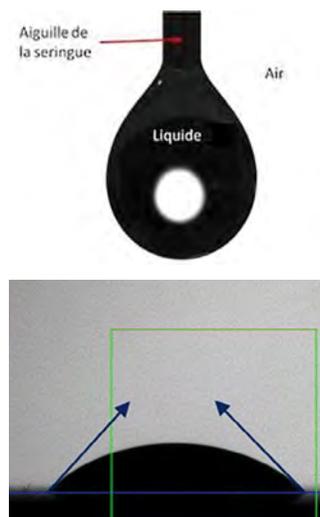
ACTIONS DE RECHERCHE

À partir des matériaux (agréats et granulats de type granite et diorite), la démarche de recherche s'articule suivant trois axes majeurs. Un premier axe porte sur l'étude de formulation d'enrobés neufs et recyclés par une approche empirique suivant des paramètres influents (nature et teneur en émulsifiant) sur l'enrobage, l'adhésion et la maniabilité, afin de déterminer la compatibilité émulsion-granulats. Un second axe

plus « scientifique » vise à déterminer les phénomènes d'interfaces en prospectant les mécanismes de mouillage de l'émulsion et d'adhésion du liant sur substrat minéral à l'échelle microscopique en fonction des paramètres de formulation. Enfin, le dernier axe consiste à valider les hypothèses de laboratoire sur une planche d'essai en vraie grandeur en Côte d'Ivoire et analyser son comportement sous trafic. Parallèlement à ces axes, des études sur le phénomène de rupture de l'émulsion et sur la rhéologie de celle-ci seront conduites.

RÉSULTATS

Les premiers résultats ont permis de valider des choix constructifs de formulation (nature et teneur en émulsifiant, teneur en eau totale optimale). Les études des phénomènes d'interfaces ont montré la dépendance de l'angle de contact émulsion-substrat vis-à-vis de la teneur en émulsifiant. Les essais de tenue à l'eau ont prouvé l'existence d'une teneur en émulsifiant optimale qui assurerait une meilleure adhésivité passive des enrobés neufs à base de granite, montrant ainsi une certaine cohérence avec les essais de mouillage. Il ressort également que l'incorporation des agrégats dans l'enrobé améliorerait ses performances mécaniques. Ces dernières sont d'autant meilleures que le bitume de base de l'émulsion est plus dur.



VALORISATION ET PRODUCTION

- Présentation à la journée Innovation ESTP et prix spécial du Jury par Routes de France (16 mai 2019). ■

CONTACTS

Layella Ziyani
lziyani@esp-paris.eu

Anne Dony
adony@estp-paris.eu

PARTENAIRES

Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, laboratoires Navier (CNRS) et GERS de l'IFSTTAR, Projet C2D (Contrat de Désendettement et de Développement).

ANR MOVEDVDC : évaluation des propriétés physico-chimiques et rhéologiques de liants bitumineux vieillis artificiellement en laboratoire et extraits de chantiers routiers

CONTEXTE

Le projet DVDC (Durée de Vie Des Chaussées) a été initié en 2016 pour répondre au besoin de connaître la durée de vie résiduelle des chaussées et à l'enjeu socioéconomique majeur de la maintenance des infrastructures routières. Un intérêt particulier est attribué à l'étude du vieillissement, car identifié comme un des facteurs contribuant à la dégradation et la fragilisation des chaussées. De ce fait, un projet ANR lui a été dédié dès janvier 2018 et s'étend sur une durée de quatre ans. Un consortium a été mis en place entre quatre institutions académiques et quatre grandes entreprises du secteur routier et du bitume. Ce projet se déploie en six tâches principales ; l'une d'entre elles concerne l'analyse des liants et a fait l'objet d'un stage Master à l'IRC en 2019.

OBJECTIFS

Les objectifs du stage étaient de caractériser les propriétés physico-chimiques, rhéologiques et thermiques de liants vieillis en laboratoire et naturellement sur la chaussée, d'analyser l'état de vieillissement de ces liants et d'identifier des indices permettant d'évaluer ces états de vieillissement.

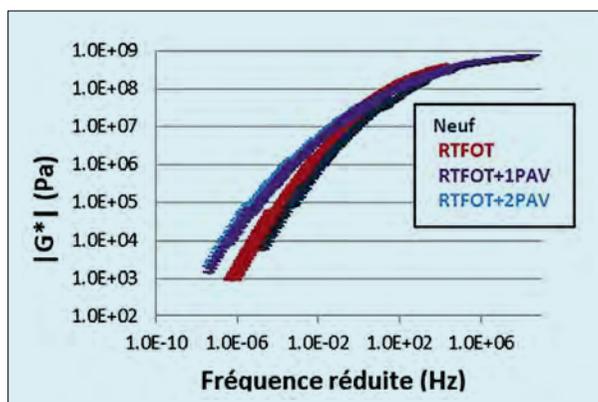
ACTIONS DE RECHERCHE

Trois séries de liants ont été considérées lors du stage. Le premier lot

concerne un bitume pur et un bitume modifié vieillis artificiellement en laboratoire selon les méthodes classiques (RTFOT, PAV). La seconde série regroupe plusieurs échantillons extraits d'un enrobé vieilli en laboratoire selon la méthode RILEM, à différentes échéances de temps. La dernière a été récupérée d'un chantier identifié dans le cadre du projet national DVDC et prélevée sur des couches de base et de fondation et deux zones de circulation. Les propriétés rhéologiques, physico-chimiques et thermiques de tous ces liants ont été déterminées au moyen d'essais de module complexe, spectroscopie infrarouge et analyse calorimétrique différentielle respectivement. Enfin, le vieillissement laboratoire a été comparé au vieillissement *in situ* sur la base de ces tests.

FAITS MARQUANTS ET RÉSULTATS

Les résultats ont montré la pertinence des essais de rhéologie et de spectroscopie infrarouge pour qualifier le vieillissement des liants. À l'échelle du chantier, le vieillissement s'est révélé être plus important sur des couches de base et des zones circulées ; soulignant ainsi l'impact du trafic routier sur le durcissement des liants. Les essais ont globalement montré une augmentation de la norme du module complexe et des indices d'oxydation suivant le niveau de vieillissement, tandis que, de manière contre-intuitive, la température de transition vitreuse diminue. Les positionnements de vieillissement entre laboratoire et chantier dépendent de l'essai considéré. ■



CONTACTS

Anne Dony
adony@estp-paris.eu

Layella Ziyani
lziyani@estp-paris.eu

PARTENAIRES

Agence Nationale de la Recherche (ANR), consortium du projet : IFSTTAR, INSA de Strasbourg, Université de Limoges, Total, Eurovia, Malet et Eiffage.





Géopolymérisation par mécanosynthèse : application en chaussée routière

CONTEXTE

Les géopolymères, « polymères » inorganiques pouvant être synthétisés à température ambiante ou légèrement élevée (jusqu'à 100 °C), sont formulés à partir d'un précurseur de type aluminosilicate (cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, argiles...) et d'un activateur alcalin (NaOH, Na₂SiO₃...). De plus en plus utilisés dans les matériaux de construction, ils sont toutefois quasiment inexistant dans le domaine des infrastructures routières, alors qu'ils pourraient constituer une voie prometteuse. La méthode la plus courante de fabrication des géopolymères, dite « classique », consiste à mélanger l'aluminosilicate avec l'activateur en solution, puis à mouler et sécher le produit final. Cependant, l'emploi de solutions alcalines présente des risques sanitaires importants, d'où la nécessité de développer des techniques « sans solvant ». Parmi elles, la mécanosynthèse est définie comme un processus de broyage à billes et à haute énergie au cours duquel les poudres sont soumises à des collisions, engendrant des phénomènes de soudage et dessoudage. Ces effets conduisent à un produit final sous forme de poudres élémentaires mélangées pendant le broyage et à la fabrication, entre autres, de matériaux nanocristallins ou nanostructurés à température ambiante.

OBJECTIFS

La thèse consiste à élaborer des géopolymères par mécanosynthèse en faisant varier le ratio en masse aluminosilicate/activateur alcalin, le ratio en masse Na₂SiO₃/NaOH ainsi que la durée de broyage. Les matériaux présentant les meilleurs résultats en résistance mécanique seront incorporés dans des formulations de mortiers et

de bétons. La formule optimale obtenue sera utilisée pour des applications routières, en particulier en couche de roulement.

ACTIONS DE RECHERCHE

Des géopolymères sous forme de poudre prête à l'emploi ont été confectionnés avec ajout d'eau à température ambiante. Leurs caractéristiques chimiques, structurales et microstructurales ont été déterminées et comparées avec celles de géopolymères fabriquées par voie classique. La cinétique de géopolymérisation des pâtes produites selon les deux méthodes a été suivie par spectroscopie infrarouge in situ. Les propriétés mécaniques (résistances en flexion et compression) ont été mesurées à 7 et 28 jours de cure après conservation des échantillons à 20° C et 50 % d'humidité relative.

FAITS MARQUANTS ET RÉSULTATS

La thèse de Maroua Zerzouri, en cotutelle avec l'université Mohammed V de Rabat (Maroc), a démarré en octobre 2018. La doctorante a pu implémenter la technique de mécanosynthèse et définir les paramètres optimaux de vitesse et temps de broyage suivant l'aluminosilicate employé. La spectroscopie infrarouge a mis en évidence

le décalage de bandes spécifiques vers des valeurs plus faibles et l'apparition de nouveaux pics caractéristiques de la réaction de géopolymérisation. Des géopolymères préparés par mécanosynthèse ont présenté des résistances en compression dépassant les 20 MPa après 24h de cure.

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Un article en cours de rédaction. ■

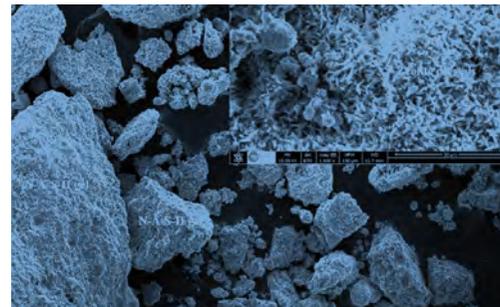
CONTACTS

Rabah Hamzaoui
rhamzaoui@estp-paris.eu

Layella Ziyani
lziyani@estp-paris.eu

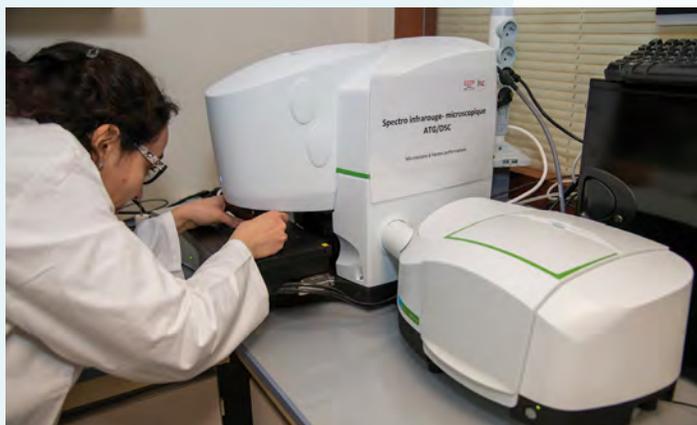
PARTENAIRES

Université Mohammed V,
Signa EMS



Outils scientifiques pour la caractérisation des liants bitumineux en laboratoire

RHÉOMÈTRE À CISAILLEMENT DYNAMIQUE (DSR)



Le rhéomètre disponible à l'IRC (Kinexus Pro+, Malvern Panalytical) permet de déterminer les propriétés rhéologiques des matériaux. Equipé d'un cryostat et d'une cellule Peltier, cet instrument sert, dans le cas des liants bitumineux, à estimer le comportement à l'écoulement aux températures de fabrication des enrobés (> 140 °C) et le module de rigidité aux températures de mise en service (-20; + 70 °C). Les essais de module sont réalisés au moyen de géométries plan-plan de différents diamètres. Le laboratoire Matériaux de Chaussées s'est doté en 2018 d'un outil de 4 mm de diamètre, dédié à l'évaluation de la rigidité des liants à basse et très basse températures, en particulier pour des liants vieillis, sensibles à la fissuration thermique.

SPECTROSCOPE INFRAROUGE À TRANSFORMÉE DE FOURIER + MICROSCOPE

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier est employée

pour identifier les liaisons chimiques constituant les matériaux. Elle aide à calculer les indices de vieillissement des liants bitumineux via le suivi des liaisons carbonyle (C = O) et sulfoxyde (S = O). Les échantillons sont préparés soit en film mince sur une lame transparente dans le domaine de l'infrarouge, soit sous forme solide sur un cristal de diamant (mode réflexion totale atténuée ou ATR), soit en solution dans un solvant. Le microscope couplé au spectroscope (Spectrum Two, Perkin Elmer) est très utile pour observer les différences de liaisons à l'interface liant neuf/liant vieilli, notamment dans le cadre du recyclage des enrobés.



CALORIMÈTRE DIFFÉRENTIEL À BALAYAGE (DSC)



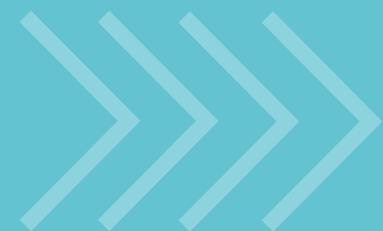
Le calorimètre (DSC 04F1, Netzsch) sert à analyser les événements thermiques subis par les matériaux, tels que la fusion ou la cristallisation. Il a été utilisé dans le cadre du projet ANR MOVEDVDC et de thèses de doctorat pour l'évaluation du phénomène de transition vitreuse des bitumes neufs et vieillis (artificiellement en laboratoire ou extraits d'enrobés prélevés sur chantier). Les essais requièrent une préparation spécifique des échantillons, calée suivant une méthode interne au laboratoire Matériaux de Chaussées. ■

CONTACTS

Anne Dony
adony@estp-paris.eu

Layella Ziyani
lziyani@estp-paris.eu





PROGRAMME GÉOMATÉRIAUX





CONTEXTE ET OBJECTIFS

Prenant en compte la diversité des terrains naturels et artificiels ainsi que la diversité et la complexité des constructions, le programme de recherche en « géomatériaux » s'efforce de répondre aux enjeux économiques et environnementaux de nos sociétés et s'intéresse à l'étude de l'interaction sols/structures, à celle des phénomènes physiques d'origine naturelle ou anthropique susceptibles de causer des désordres, voire la rupture d'ouvrages en terre, ainsi qu'au développement de solutions constructives durables.

Les travaux de recherche concernent la caractérisation et la modélisation des géomatériaux rencontrés dans divers environnements et les performances des ouvrages résultant de l'utilisation de ces matériaux. Ils s'appuient sur des développements théoriques avancés et sur la réalisation d'expériences performantes. L'objectif visé est l'amélioration et l'optimisation de la conception de ces ouvrages, de leur construction et de leur maintenance.

D'autres problématiques sont également considérées telles que la formulation et l'élaboration de matériaux innovants ou la mise en œuvre de solutions constructives appelées à être utilisées dans des conditions contraintes (accessibilité au site d'exécution des travaux, conditions de transport, respect de l'environnement et des conditions financières du projet).



VERROUS SCIENTIFIQUES

Deux catégories de verrous scientifiques sont considérées :

- Le produit, c'est-à-dire l'objet d'étude (géomatériaux/ouvrages) et les conditions spécifiques des études qui lui sont consacrées :
 - Couplages multi-physiques et impact sur la performance à différentes échelles (de la particule de sol à l'ouvrage)
 - Conception/caractérisation des matériaux et valorisation des déchets
- Le process, c'est-à-dire d'une part les moyens utilisés pour la transformation des géomatériaux comme les outils de caractérisation des déchets pour une meilleure recyclabilité, et d'autre part les phénomènes étudiés tels que l'interaction géomatériaux/modes constructifs et ouvrabilité ou l'utilisation sobre des ressources naturelles.



AXES SCIENTIFIQUES

Erosion interne et affouillement d'ouvrages hydrauliques : développement de méthodes expérimentales de détection et de caractérisation des phénomènes d'érosion dans différents types de sols et de structures, amélioration des connaissances des mécanismes d'affouillement et leur prise en compte pour proposer des solutions constructives limitant le développement de ces phénomènes. La valorisation des sols et sédiments pollués : l'objectif de cet axe de

recherche est l'amélioration des connaissances sur les mécanismes de réactivité et la durabilité de nouveaux liants alcalis-activés permettant des traitements de type solidification/stabilisation des sols et leur valorisation en matériaux de construction.



OBJETS D'ÉTUDE

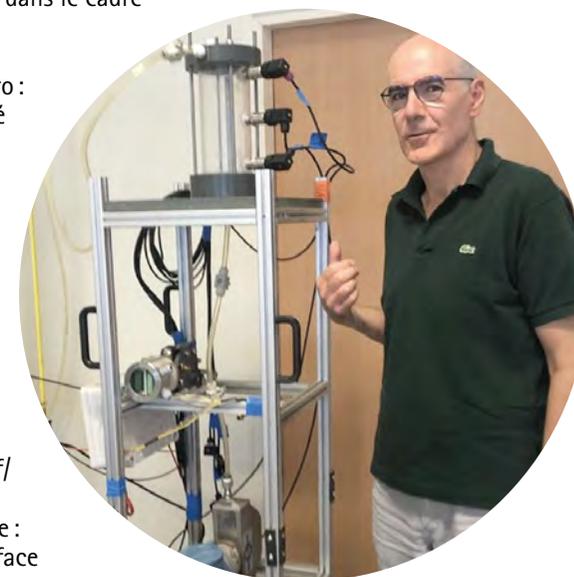
Les différents projets de ce programme de recherche sont menés dans le cadre de partenariats avec :

- L'INPHB - Yamoussoukro : impact de l'hétérogénéité des sols sur les phénomènes d'érosion interne
- Société de Travaux de construction Tchadienne : valorisation des terres excavées polluées par des traitements de type géopolymérisation
- Université du Havre : affouillement de piles de pont en milieu cohésif/solutions constructives
- IRSTEA Aix-en-Provence : Étude de l'érosion de surface



MOTS-CLÉS

érosion interne, affouillement, traitement de sol, performances d'ouvrages, durabilité, modélisation, recyclage, valorisation, calcul numérique.



CONTACT

Abdelkrim Bennabi
Responsable du programme
Géomatériaux
abennabi@estp-paris.eu



Impacts d'hétérogénéités granulaires sur l'érosion interne par suffusion de sols constitutifs d'ouvrages hydrauliques

CONTACTS

J.-B. Gboga
ogboga@estp-paris.eu

Abdelkrim Bennabi
abennabi@estp-paris.eu

Rodaina Aboul Hosn
raboulhosn@estp-paris.eu

PARTENAIRES

Travail de thèse réalisé dans le cadre d'un partenariat ESTP Paris - INP-HB de Yamoussoukro.

CONTEXTE

L'érosion interne, un des principaux mécanismes responsables de désordres, voire de ruptures d'ouvrages en terre, est caractérisée par le détachement et le transport de particules fines à l'intérieur de la matrice de sol. Les études expérimentales sont réalisées sur des sols homogènes soumis à un écoulement d'eau sous différentes conditions hydrauliques. Mais dans de nombreuses situations les sols sont hétérogènes. Les travaux d'entretien de digues historiques, par exemple, consistent à rehausser leur niveau en mettant en place une nouvelle couche de sol sur les anciennes, ce qui génère des hétérogénéités. Un autre exemple est la ségrégation des sols au moment de leur mise en œuvre.

OBJECTIFS

L'objectif global de ces recherches est d'optimiser la conception, la planification et la construction, ou l'entretien, d'ouvrages en terre constitués de matériaux présentant des risques d'hétérogénéité et pouvant ainsi favoriser les phénomènes d'érosion interne par suffusion. Cette étude traite plus particulièrement du cas de deux couches adjacentes ayant des proportions de fines ou des porosités différentes.

ACTIONS DE RECHERCHE

Le programme de recherche proposé s'intéresse au comportement d'échantillons de sol granulaire présentant des configurations d'hétérogénéité, soumis à un écoulement hydraulique à différents gradients appliqués de façon croissante. Des granulométries différentes, continues ou discontinues, sont choisies pour les échantillons de sol. Les résultats, en termes de masse érodée, de perméabilité, de cinétique d'érosion, sont comparés à ceux obtenus pour des sols homogènes.



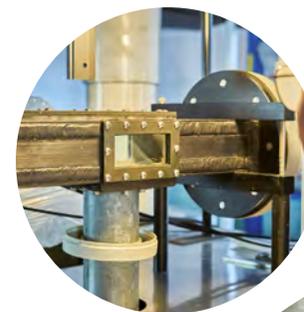
RÉSULTATS

Les résultats et l'analyse des essais ont permis de distinguer trois phases dans les processus de suffusion : faible masse érodée et initiation de la suffusion, augmentation de la masse érodée et enfin chute et perte continue de la masse érodée qui reste faible malgré l'évolution du gradient hydraulique. Les résultats, interprétés en fonction des principaux critères d'instabilité interne, géométriques et hydrauliques des sols, montrent qu'en présence d'hétérogénéités structurales, les sols granulaires sont plus sensibles à l'érosion interne par suffusion.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Communication acceptée pour ICSE-10 (Erosion et affouillement des sols), Washington, 11/2020. ■

Amélioration de la caractérisation de l'érodabilité des sols sur un érodimètre EFA en utilisant la Vélocimétrie par Imagerie de Particules



CONTEXTE

L'érodimètre EFA permet de déterminer le taux d'érosion des sols en fonction des vitesses d'écoulement qui leur sont appliquées et des contraintes de cisaillement à l'interface sol-eau. Des lois d'érosion peuvent ainsi être calées à partir de carottages *in situ* ou en reconstituant un sol réel et en faisant varier ses caractéristiques, pour le renforcer par exemple.

OBJECTIFS

La cinétique d'érosion des carottes de sol testées à l'EFA peut influencer le taux d'érosion mesuré, mais l'appareil ne la prenant pas en compte, nous proposons, dans cette étude, de suivre la cinétique d'érosion par Vélocimétrie par Imagerie de Particules, afin d'estimer son impact sur l'érodabilité des sols.

ACTIONS DE RECHERCHE

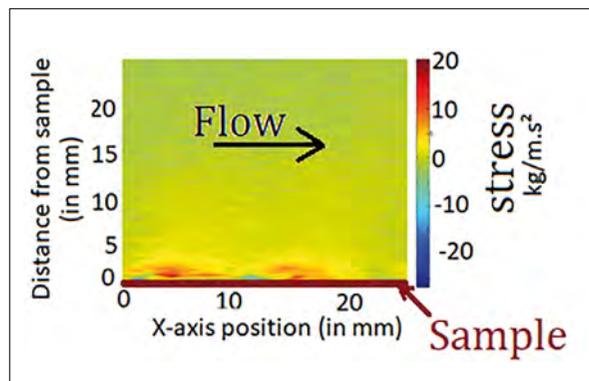
La PIV a été déployée sur l'érodimètre EFA. Les sous-fenêtres d'inter-corrélation ont été ajustées pour permettre d'avoir une très bonne résolution sur les profils de vitesse verticale. Quatre échantillons de sol ont pu être testés, regroupant des sols cohésifs et non cohésifs. Une méthode de détermination de la contrainte de cisaillement locale a été développée et appliquée à chacun des échantillons de sol. Les résultats obtenus avec cette méthode ont été confrontés à ceux que permet d'obtenir l'utilisation classique de l'érodimètre EFA.

RÉSULTATS

Un léger écart a été observé entre les contraintes de cisaillement obtenues par la méthode traditionnelle utilisée à l'érodimètre l'EFA et par la PIV sans pour autant changer la classe d'érosion des matériaux testés. Finalement, nous avons observé que les écart-types spatiaux de la contrainte de cisaillement étaient plutôt très importants ce qui aurait tendance à sous-évaluer la contrainte critique de début d'érosion.

Dans l'exemple de la figure ci-contre, la contrainte retenue est de 2.5 Pa pour la méthode EFA, 4 Pa par la méthode PIV en considérant la contrainte moyenne sur le profil, et de 10 Pa en considérant la contrainte maximum issue de la PIV. Un approfondissement de cette étude

est envisagé. Il consiste à répéter les essais sur un même échantillon pour tester la variabilité spatiale des contraintes et investiguer également sa variabilité temporelle.



VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

• Ce travail a fait l'objet d'une communication à la conférence internationale IAHR. L'acte de conférence peut être trouvé à partir de la référence : Y. Maachou, A. Poupardin, A. Bennabi, Improvement of soils erodibility characterization in the erosion function apparatus by using the particle image velocimetry, 38th IAHR World Congress, Panama, 2019. ■



CONTACTS

Adrien Poupardin
apoupardin@estp-paris.eu

Abdelkrim Bennabi
abennabi@estp-paris.eu



Modélisation par la méthode des éléments discrets de la suffusion des sols hétérogènes

CONTACTS

Rodaina Aboul Hosn
raboulhosn@estp-paris.eu

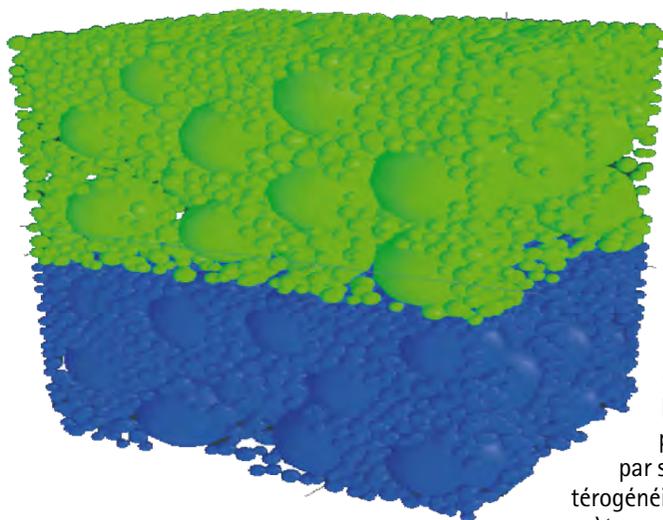
Abdelkrim Bennabi
abennabi@estp-paris.eu

CONTEXTE

L'érosion interne dans les sols est un phénomène défini comme la migration des particules du sol à travers un milieu poreux et provoqué par un écoulement de fluide. En génie géotechnique, la migration des particules fines peut entraîner l'effondrement des structures du sol telles que les barrages en remblai et les digues. Cette étude se concentre sur le processus de suffusion impliquant l'érosion sélective des particules fines dans la matrice des grosses particules. Les modifications de la microstructure du sol peuvent entraîner des déformations à l'échelle macroscopique et influencer de manière significative le comportement mécanique du sol.

OBJECTIFS

Sur la base d'une modélisation par la méthode des éléments discrets de la phase solide et la méthode PFV (pore-scale finite volume) de la phase fluide, le sujet porte sur l'étude de l'influence de l'hétérogénéité des sols sur le phénomène d'érosion interne par suffusion. Ce paramètre, l'hétérogénéité des sols, est relié à d'autres paramètres physiques et/ou mécaniques tels que la porosité, la perméabilité ou la résistance à la rupture du sol. Le but est d'avoir plus d'information sur la microstructure du sol granulaire avant et après l'érosion dans les cas d'échantillons initialement homogènes ou hétérogènes.



ACTIONS DE RECHERCHE

Deux scénarios seront considérés :

- Un sol initialement homogène : différentes densités sont considérées (sol lâche, moyennement dense, et dense)
- Un sol initialement hétérogène constitué de deux couches de différents teneurs en fines. L'étude porte sur les phénomènes de transport de particules à l'interface des deux couches : différentes densités sont considérées (2 couches : une dense et une lâche agencées de différentes manières. Soit une couche lâche sur une couche dense ou l'inverse)

Dans les deux cas on a étudié le développement de la suffusion. La masse de particules transportées, la variation de la porosité, le colmatage, le changement de structure, le rôle des particules transportées dans le réseau de pores ont été examinés.

RÉSULTATS

- Développement d'un modèle pour l'étude du problème de suffusion à l'échelle microstructurale.
- Étude microstructurale réalisée en étudiant l'état des particules fines dans chaque échantillon de sol (flottant, bouché, bloqué). Chaque échantillon a été divisé en 3 couches, partie haute, basse et intermédiaire (pour l'étude de l'interface entre les couches supérieure et inférieure surtout dans le cas de sols hétérogènes). Cette étude a montré une influence significative des hétérogénéités sur le processus de suffusion. En comparaison avec le sol homogène, l'état des particules fines à l'interface peut créer une zone renforcée qui peut améliorer la résistance du sol. Pour valider cette conclusion, une étude du comportement mécanique est nécessaire. ■

Influence du set-up de houle dans le phénomène combiné de franchissement/submersion

CONTEXTE

Le changement climatique et en particulier la remontée du niveau des océans dont il est la cause engendre des risques accrus de submersion et de dommages dus au franchissement des vagues au-dessus des rivages ou des structures de protection des côtes dont le dimensionnement n'avait pas anticipé une telle évolution. Les débits de franchissement peuvent être quantifiés en fonction des paramètres structurels de l'ouvrage et des caractéristiques de la houle. Des formules analytiques estimant les débits passant au-dessus des déversoirs sont utilisées depuis longtemps par les ingénieurs. Mais le problème de la combinaison d'une submersion et d'un franchissement des vagues est tout récent.

OBJECTIFS

Le déferlement des vagues avant l'ouvrage induit une surélévation du niveau moyen qui augmente lorsque les vagues continuent leur propagation, ce qui peut impacter le débit de submersion. Nous nous proposons alors de vérifier plus finement si le set-up peut avoir une contribution dans le calcul du débit total passant par-dessus la digue et, si oui, de le quantifier.

ACTIONS DE RECHERCHE

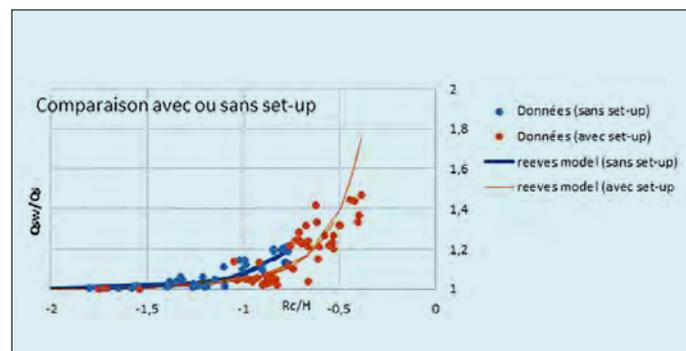
Dans le cadre de ce projet, nous avons d'abord reproduit le set-up dans notre canal hydraulique en considérant une pente douce de 2.5 % sans obstacles. Nous avons ensuite positionné une digue dans le canal pour reproduire les phénomènes de franchissement et de submersion séparément. Enfin, nous avons simulé le phénomène couplé de franchissement/submersion avec ou sans déferlement des vagues avant l'ouvrage.

RÉSULTATS

La propagation de la houle a montré un effet non linéaire du phénomène de shoaling, qu'il s'agit de prendre en compte lorsque l'on utilise les formules analytiques. Les cas étudiés ont montré un très bon accord entre les mesures en canal et les prédictions. Suite au positionnement d'une digue dans le canal, comme précédemment, les essais ont permis de bien reproduire les prédictions des lois analytiques. Par ailleurs, on observe que dans les 2 cas (avec ou sans déferlement), la contribution du débit de franchissement (dû aux vagues) augmente exponentiellement lorsque le niveau d'eau se rapproche de la hauteur de digue. La configuration avec set-up semble générer un débit de franchissement supérieur au cas sans set-up, ce qui reste à confirmer en répétant les essais sur une configuration unique.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

• Ce travail a été accepté par le comité de lecture, pour présentation aux journées Génie Civil Génie Côtier au Havre en 2020. ■



CONTACTS

Adrien Poupardin
apoupardin@estp-paris.eu

Abdelkrim Bennabi
abennabi@estp-paris.eu



Traitement-valorisation de sols par des méthodes de type géopolymérisation

CONTACTS

B. H. Ahmed Hisseini
bahmedhisseini@estp-paris.eu

Rabah Hamzaoui
rhamzaoui@estp-paris.eu

Abdelkrim Bennabi
abennabi@estp-paris.eu

PARTENAIRES

SAGA Ingénierie et DTP
Terrassement

CONTEXTE

Ce projet s'inscrit dans la continuité des travaux de recherche en géomatériaux et du traitement des sols et sédiments en particulier. Le contexte général est celui de la prise en compte de l'impact des activités de construction, et notamment de la construction routière, sur l'aménagement du territoire qui joue un rôle essentiel sur de possibles effets néfastes sur l'environnement naturel ainsi que sur les budgets d'investissement.

OBJECTIFS

Ces préoccupations, tant écologiques qu'économiques, sont à l'origine de ce projet dont l'objectif est de développer des méthodes de traitement innovantes utilisables pour des sols pour lesquels les traitements classiques sont peu ou pas efficaces, voire néfastes et coûteux. Plus précisément, ce travail a pour but d'étudier le comportement mécanique d'échantillons de sol traités par 3 géopolymères à base de coproduits industriels et de comprendre les phénomènes physico-chimiques mis en jeu.

ACTIONS DE RECHERCHE

Après une étude bibliographique et la mise au point de la méthode de traitement par géopolymérisation en 1^{re} année de thèse, qui a consisté en particulier en la formulation de géopolymères avec différents constituants (cendres volantes, métakaolin, laitiers) et différents activateurs (hydroxyde de sodium, hydroxyde de potassium) avec différentes proportions, en 2018-2019, le travail s'est poursuivi avec le traitement de deux types de sol, un, limoneux (limon des Plateaux - Île-de-France) rendu artificiellement impropre à un traitement traditionnel à la chaux ou aux liants hydrauliques par incorporation de sulfates, et un autre, argileux et de grande plasticité provenant des déblais des travaux du Grand Paris.



RÉSULTATS

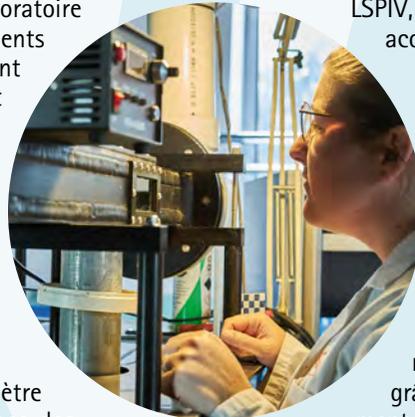
Le programme de recherche entrepris repose sur la caractérisation des matériaux utilisés (analyses chimique, minéralogique, géotechnique) ainsi que sur la caractérisation mécanique avant et après traitement. Les minéraux essentiels dans ce type de traitement sont les aluminosilicates présents à la fois dans le sol à traiter et dans les produits de traitement. Des caractéristiques physiques et chimiques comme la surface spécifique et la capacité d'adsorption, jouent un rôle important dans les réactions pouzzolaniques mises en jeu. Des essais de retrait-gonflement ont également montré une diminution du gonflement après traitement. ■

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

• Baba Hassane Ahmed Hisseini, Abdelkrim Bennabi, Rabah Hamzaoui, Lamis Makki, Gaëtan BlancK, « Geopolymerization methods for clay soils treatment », XIV. International Research Conference on Soil Treatment and Geosynthetics, IRC 2020, 23 & 24 January 2020. ■

Equipements pour la géomécanique (laboratoires de géotechnique et d'hydraulique)

Le champ de recherche de l'IRC en géomécanique s'appuie sur deux parties complémentaires, la géotechnique et l'hydraulique. Les équipements de géotechnique permettent de caractériser le comportement hydro-mécanique des sols à l'aide d'essais de laboratoire et d'appliquer les résultats à l'étude de différents types d'ouvrages, en particulier les ouvrages en terre et les fondations pour le bâtiment et le Génie Civil. Le laboratoire de géotechnique dispose de la plupart des équipements de base destinés à l'étude des sols. Il dispose également de plusieurs presses mécaniques, dont beaucoup sont dotées de cellules de compression triaxiale, d'un œdomètre automatique et d'autres équipements tels que des presses CBR par exemple. Des dispositifs expérimentaux sont également développés tels que celui dédié à l'étude de l'érosion interne par suffusion qui permet de mesurer l'érodabilité des sols et leur comportement dans différentes conditions hydrauliques.



Le laboratoire de Géotechnique dispose de l'érodimètre EFA qui permet de caractériser l'érosion de surface des sols. Utilisé avec le logiciel SRICOS (méthode de prévision d'affouillement), il peut fournir des prévisions d'affouillement précises. Les applications de son utilisation comprennent l'affouillement des ponts, l'érosion des ouvrages en terre et l'érosion des plages et les problèmes d'érosion de surface. L'essai mesure le taux d'érosion en fonction de la vitesse d'écoulement et en fonction de la contrainte de cisaillement.

Le laboratoire d'hydraulique conduit des activités de R&D dans le domaine de la mécanique des fluides appliquée et de l'hydraulique. Il s'est spécialisé dans la réalisation d'études pour dimensionner des ouvrages hydrauliques (bassin de rétention, étude d'érosion au

pied d'un barrage, etc.). Les maquettes permettent de simuler un écoulement sur un lit de rivière ou en sortie de barrage à échelle réduite en y intégrant des dispositifs pour contrôler l'écoulement. Le laboratoire dispose de plusieurs pompes asservies en débit pour alimenter les maquettes et de systèmes de mesure performants pour mesurer l'écoulement (capteur de vitesse, de hauteur d'eau, LSPIV, PIV, laser scanner photoneo, profileur de vitesse acoustique etc.).

Un canal hydraulique, d'une longueur totale de 14m, d'une largeur de 41 cm et d'une hauteur de 55cm, permet de simuler un écoulement à échelle réduite. Il est alimenté par une pompe pouvant assurer un débit maximum de 130m³/h. Le canal, reposant uniquement sur deux points fixes, peut être incliné de -0.5 % à +2.5 % afin de reproduire la pente d'une rivière. Des études morpho-dynamiques sont réalisables grâce à l'intégration d'un piège à sédiment placé en aval du canal qui capte les sédiments grossiers et d'un circuit de sédiment fermé. Le canal permet de réaliser des études sur le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques (barrages, digues, etc.) et des études d'érosion et d'affouillement au pied de ces ouvrages.

Ces moyens expérimentaux sont associés à des ressources de calcul haute performance qui sont mis à disposition de projets de recherche, permettant ainsi le couplage entre modélisations expérimentales et numériques pour reproduire au mieux la complexité des milieux étudiés. ■



CONTACTS

Abdelkrim Bennabi
abennabi@estp-paris.eu

Adrien Poupardin
apoupardin@estp-paris.eu

Thèses de doctorat pour les Matériaux Constructifs

« **Mécanosynthèse et matériaux de construction : optimisation et application pour la clinkérisation et la géopolymérisation** », soutenue par Othmane Bouchenafa en juillet 2019. Thèse de l'École Doctorale Sciences Ingénierie et Environnement de l'Université Paris-Est, dirigée par Rabah Hamzaoui, co-encadrée par Abdelkrim Bennabi et Johan Colin, financée par la Fondation ESTP Paris.

« **Élaboration et caractérisation de liants géopolymères à base de cendres volantes, de laitiers et d'argiles marocaines** », préparée par Maroua Zerzouri. Thèse en cotutelle entre l'Université Mohammed V Rabat et SIE UGE, dirigée par Saliha Alehyen (Université Mohammed V) et Rabah Hamzaoui, encadrée par Layella Ziyani, financée par l'Université Mohammed V (bourse d'excellence) et une dotation de Signa Entreprise US.

« **Valorisation des fibres végétales dans des matériaux cimentaires et évaluation de leur durabilité. Application : fibres de chanvre pour les bétons à haute performance et des formulations pour des chapes** », préparée par Sergio Pons Ribera. Thèse SIE UGE, dirigée par Rabah Hamzaoui, co-encadrée par Benitha Vasseur et Johan Colin, financée par ADEME, Région Grand-Est, FEDER (Consortium Vicat, FRD, ESTP Paris).

« **Optimisation de la co-maintenance des réseaux enterrés et des structures de chaussées en milieu urbain – Constructibilité à l'interface entre route et réseaux enterrés** », préparée par Antonin Pavard (soutenance prévue à l'automne 2020). Thèse SIE ENPC, dirigée par Bruno Tassin (ENPC), co-encadrée par Anne Dony et Patricia Bordin, financée par la Fondation ESTP Paris.

« **Étude de l'impact physico-chimique des liants dits « régénérants » sur la Constructibilité (performance et durabilité) des enrobés recyclés** », préparée par Faycal Lahjiri (soutenance prévue à l'automne 2020). Thèse de l'Université de Montpellier (ED 166), co-dirigée par Virginie Mouillet (Cerema Méditerranée) et François Henn (Université de Montpellier), encadrée par Anne Dony, financée par Eurovia (Cifre).

« **Étude du comportement thermomécanique des matériaux bitumineux contenant des fibres de palmier** », qui sera soutenue en juin 2020 par Youcef Bellatrache. Thèse de l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics d'Alger (ENSTP), dirigée par Smail Haddadi (USTHB), encadrée par Layella Ziyani, financée par l'ENSTP et l'ESTP Paris.

« **Étude du comportement thermomécanique des enrobés**

contenant des granulats bitumineux recyclés et des bardeaux d'asphalte recyclés », préparée par Abdeljalil Daoudi (soutenance prévue en 2021). Thèse de l'École Technologique Supérieure de Montréal, co-dirigée par Alan Carter (ETS Montréal) et Anne Dony, financée par ETS Montréal.

« **Étude de choix constructifs pour garantir la mise en œuvre et la durabilité des enrobés recyclés à l'émulsion de bitume** », préparée par Yacouba Konaté (soutenance prévue en 2021). Thèse en cotutelle entre INP HB Yamoussoukro et SIE ENPC, co-dirigée par Athanas Konin (INP HB) et Xavier Château (ENPC), co-encadrée par Anne Dony et Layella Ziyani, financée par un contrat C2D.

« **Modélisation du comportement mécanique d'une argile gonflante traitée par ajout de sable** », soutenue par Salima Amri en juillet 2019. Thèse de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, co-dirigée par Abdelkrim Bennabi, Rabah Hamzaoui et Mustapha Akkiche (USTHB), financée par l'USTHB.

« **Traitement et valorisation de sols / sédiments (pollués) par des méthodes de type géopolymérisation** », préparée par Baba Hassane Ahmed Hisseini



(soutenance prévue au printemps 2021). Thèse de l'École Doctorale SIE de l'Université Gustave Eiffel, dirigée par Rabah Hamzaoui, encadrée par Abdelkrim Bennabi, financée par l'Entreprise BET.

« **Étude des phénomènes d'affouillement autour de piles de ponts fondées sur sols cohésifs** », préparée par Jana Zaïdan. Thèse de l'Université Le Havre Normandie, co-dirigée par Ahmed Benamar (Université Le Havre

Normandie) et par Abdelkrim Bennabi, financée par la Région Normandie et la Fondation ESTP Paris.

« **Impact de l'érosion de surface sur les ouvrages hydrauliques** », préparée par Shadi Youssef. Thèse de l'Université Aix-Marseille, dirigée par Pierre Philippe (IRSTEA), encadrée par Abdelkrim Bennabi, Adrien Poupardin et Nadia Benahmed, financée par l'IRSTEA et la Fondation ESTP Paris.

« **Impacts d'hétérogénéités granulaires sur l'érosion interne par suffusion de sols constitutifs d'ouvrages hydrauliques** », préparée par Jean Bruce Nataniel Gboga Ouaga (soutenance prévue en 2021). Thèse en cotutelle entre INP HB Yamoussoukro et SIE UGE, co-dirigée par Athanas Konin (INP HB) et Jean-Claude Dupla (IFSTTAR), co-encadrée par Abdelkrim Bennabi et Rodaina Aboul Hosn, financée par un contrat C2D.





LES OUVRAGES DURABLES





PROGRAMME

**EFFICACITÉ
ÉNERGÉTIQUE**





CONTEXTE ET OBJECTIF

Afin de relever le défi de la transition énergétique, la France a mis au cœur de sa stratégie énergétique le secteur du bâtiment qui, encore aujourd'hui, représente près de 45 % de la consommation énergétique nationale et plus de 25 % des émissions de gaz à effet de serre.

Les actions de l'Institut de Recherche en Constructibilité dans la thématique Efficacité Énergétique sont donc finalisées au développement de solutions adaptées à la réduction des besoins énergétiques et l'empreinte carbone des nouveaux bâtiments tout en garantissant une qualité interne élevée de l'habitat. L'objectif commun des projets afférant au programme de recherche « Ouvrages Durables » est d'aider, d'accompagner et de faciliter l'innovation technologique afin de réaliser des ouvrages plus performants dans les volets : efficacité énergétique, bilan carbone et qualité interne, gestion des risques, à travers la démarche de la Constructibilité.



VERROUS SCIENTIFIQUES

Les verrous à lever concernent à la fois le process (de conception, de réalisation, de gestion) et le produit (les composants aussi bien que l'ouvrage).

Sur le plan du process les verrous à lever concernent le développement de stratégies, méthodes multicritères et outils collaboratifs à soutien du design process visant la garantie de la

performance de l'ouvrage

Sur le plan du produit, les verrous à lever concernent la caractérisation de la performance globale de l'ouvrage et de ses composants. Les actions de recherche visent donc à une meilleure compréhension et représentation du comportement thermo physique de systèmes innovants pouvant améliorer la performance de l'ouvrage, ainsi que des relations entre la performance du composant et la performance globale de l'ouvrage.



AXES SCIENTIFIQUES

L'activité en efficacité énergétique se décline dans les axes suivants :

- La mesure et la caractérisation de la Qualité de l'Environnement Intérieur (QEI), ainsi que l'étude des systèmes de diffusion et des stratégies nécessaires à garantir une QEI élevée.

- La caractérisation des performances de nouvelles typologies de composants d'enveloppe et leur impact sur la performance globale du bâtiment.

- La définition de solutions techniques et

de stratégies de planification urbaine de compensation de l'émission de CO2, orientées à la réalisation de bâtiments à zéro émission.

- Le développement de méthodologies et d'outils à support de la phase de conception, basés sur la Constructibilité et orientés à la garantie de performance demandée.



OBJETS D'ÉTUDE

Les activités de recherche portent sur les constructions à service de la collectivité, comme les logements et les bâtiments tertiaires, avec la prise en compte de l'interaction entre composants d'enveloppe, systèmes de chauffage, ventilation et climatisation, systèmes de production et stockage de l'énergie thermique et systèmes de contrôle et pilotage.



MOTS-CLÉS

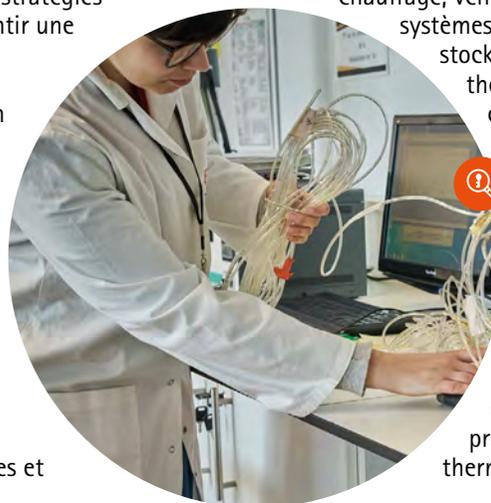
QEI, QAI, confort thermique, bâtiments à énergie positive, bâtiment zéro carbone, adaptives façades, Constructibilité, pré-design, simulation thermo-énergétique.



CONTACT

Andrea Kindinis

Responsable du programme Efficacité énergétique
akindinis@estp-paris.eu



Analyse et optimisation du comportement de façades adaptatives

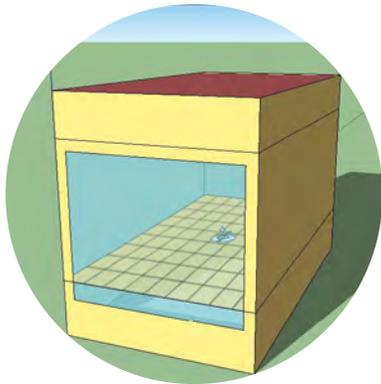
CONTACTS

Andrea Kindinis
akindinis@estp-paris.eu

Francesca Contrada
fcontrada@estp-paris.eu

PARTENAIRES

eErg Research Group –
Politecnico di Milano; COST
TU1403



CONTEXTE

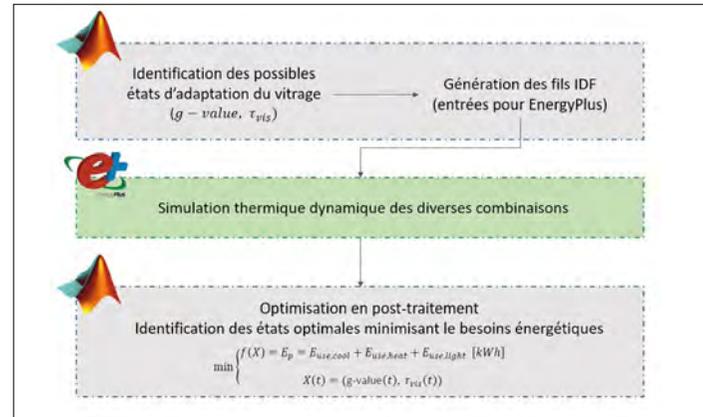
Le secteur de la construction est en évolution rapide, poussé par les exigences d'efficacité énergétique et de haute qualité environnementale intérieure. Des nouvelles solutions de composants d'enveloppe transparente et opaque à comportement dynamique, aussi bien que de nouveaux terminaux de systèmes de chauffage/refroidissement, apparaissent sur le marché. Cependant, leur emploi reste faible, en raison de recherches fragmentées et de capacités limitées des outils de simulation existants pour la performance énergétique. Ces outils doivent mieux évaluer les comportements à une échelle de temps cohérente avec les sollicitations hautement dynamiques qui influencent le mécanisme d'adaptation.

OBJECTIFS

Le but de cette recherche est d'étudier l'efficacité de méthodes simplifiées pour déterminer les combinaisons des propriétés thermo-optiques optimales pour des façades transparentes de vitrage adaptatifs capables de moduler avec une vitesse d'adaptation rapide (5 minutes), deux paramètres: le facteur solaire et le coefficient de transmission lumineuse.

ACTIONS DE RECHERCHE

Les actions en cours concernent l'évaluation de la performance et l'intégration de solutions de façade innovantes dans le processus de construction. Sur le plan numérique, les actions se sont récemment focalisées sur l'optimisation de ces composants. Ce projet représente la suite de précédentes actions de recherche explicitées grâce à une thèse soutenue en 2017. Dans la thèse, réalisée en collaboration avec le Politecnico di Milano, les procédures expérimentales ont été étudiées à travers une modélisation numérique, puis vérifiées à travers des tests effectués sur des cellules-test de nouvelle conception.



RÉSULTATS

Une étude développée dans le cadre d'un stage Master 2, réalisé grâce au programme Erasmus en collaboration avec le Politecnico di Milano a porté sur la proposition d'une nouvelle méthode permettant d'optimiser les paramètres thermo-optiques caractérisant les vitrages à adaptation solaire. La méthode prévoit l'association d'un algorithme d'optimisation, développé en MatLab, à un outil de simulation (Energy Plus) afin de réaliser une optimisation des deux paramètres en post-traitement. Ce travail a été communiqué à la conférence internationale BS2019 (Building Simulation 2019) en septembre 2019.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

• Pelle M., Causone F, Favoino F., Contrada F., Kindinis A. (2019). Évaluation of Post Processing Analysis to determine Optimal Thermo-Optical Properties for Adaptive Glazing Systems with Quick Adaptation Speed. Proceedings of BS2019. ■

Comportement de composants d'enveloppe intégrant béton de chanvre chaux recyclé

CONTEXTE

Avec l'arrivée de la nouvelle réglementation RT2020 et les nombreux labels environnementaux, la construction bas carbone devient un objectif à atteindre. Les matériaux biosourcés tels que le béton de chanvre chaux (mélange de chènevotte, chaux et eau) présentent de nombreux avantages par leur capacité à stocker du carbone et leur contribution à assurer des conditions de confort pour les usagers.

OBJECTIFS

L'objectif de cette étude est de développer et d'évaluer une filière de recyclage du béton de chanvre chaux. Il s'agit de réaliser une étude expérimentale *in situ* du comportement thermo hygrométrique des parois intégrant une certaine quantité de matériau recyclé, établie à travers des essais mécaniques préalables.

ACTIONS DE RECHERCHE

Ce projet représente la suite de précédentes actions de recherche explicitées grâce à 2 PIER (réalisés en 2014 et 2015) et d'un stage de recherche réalisé en 2015. Ce projet se situe dans une dynamique de collaboration entre plusieurs chercheurs de l'IRC, et des partenaires industriels. Le projet a été proposé pour un appel à projet de l'ADEME et sera réalisé concrètement en 2020. La mission d'étude démarre par la mise en place



des protocoles de reconditionnement du béton de chanvre recyclé. Suite à la réalisation de ces protocoles, les essais mécaniques sur plusieurs éprouvettes permettront de déterminer les spécificités selon les différents dosages. L'expérimentation

in situ se réalise dans la Ressourcerie de la caserne Exelmans. La phase d'analyse et de mesure consistera en l'instrumentation du bâtiment construit afin de suivre son état et ses caractéristiques (thermiques, hygrométriques), mais aussi en la réalisation d'une analyse de cycle de vie.

RÉSULTATS

Un stage de Master 2, réalisé grâce au programme Erasmus en collaboration avec l'Università di Pisa a été dédié au développement d'une approche expérimentale et numérique. Un état de l'art des mesures *in situ* et l'analyse du contexte des mesures, a porté à la détermination de l'instrumentation nécessaire et au protocole de mise en œuvre. La modélisation à l'aide logiciel WUFI a permis d'analyser le comportement thermo-hygrométrique des composants d'enveloppe via une simulation en 2D.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Le projet est lauréat de l'appel à Projet ADEME sur l'économie circulaire sous le nom de « Laboratoire cycle chanvre ». ■

CONTACTS

Andrea Kindinis
akindinis@estp-paris.eu

Francesca Contrada
fcontrada@estp-paris.eu

PARTENAIRES

LM Ingénieur, BCB Tradical





Aide à la décision et évaluation de la performance globale basées sur la Constructibilité

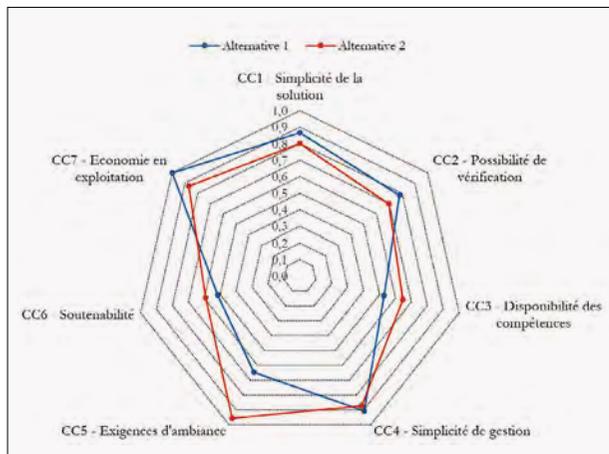
CONTACTS

Andrea Kindinis
akindinis@estp-paris.eu

Francesca Contrada
fcontrada@estp-paris.eu

CONTEXTE

Les objectifs, toujours plus ambitieux, de haute performance énergétique doivent faire face aux enjeux de confort des usagers, de réduction des émissions de CO₂, ainsi qu'au contraintes économiques du processus de construction. Le pré-design représente une étape fondamentale, puisque les choix opérés à ce moment influencent la suite du processus de construction. La prise de décision à cette étape n'est généralement pas confortée par des analyses robustes, ce qui peut impliquer des inefficacités, des risques de dégradation de la performance, des surcoûts et un non-respect du délai établi.



OBJECTIFS

Pour répondre à cette problématique il est envisageable de concevoir des bâtiments en utilisant des méthodes d'aide à la décision multicritères et d'évaluation de la performance globale. Afin de contribuer à une meilleure gestion de la phase de pré-design et de supporter la prise de décision du concepteur, tout en considérant l'interaction entre différents acteurs et phases du cycle de vie, ce projet fait appel à la discipline de la Constructibilité.

ACTIONS DE RECHERCHE

Une thèse, soutenue en janvier 2019, a permis de créer un lien entre la Constructibilité et la performance du bâtiment. L'analyse des bonnes pratiques, des retours d'expérience, de l'interopérabilité entre les outils de simulation énergétique et les outils de gestion du projet (tel que le BIM), ainsi de méthodes d'aide à la décision, ont permis de proposer une nouvelle méthode d'évaluation

permettant de vérifier la pertinence du pré-design vis-à-vis des spécifications programmatiques et de la faisabilité technique de l'ouvrage. L'utilisation de la méthode permet, donc, de supporter le choix en condition d'incertitude. Elle représente un nouvel outil de vérification et d'aide à la décision se basant sur la Constructibilité. La méthode a été appliquée à des cas d'étude en France, ainsi qu'au contexte international grâce à un stage de Master 2 réalisé dans le cadre du programme Erasmus avec le Politecnico di Milano.

RÉSULTATS

La nouvelle méthode facilite le choix en phase de conception en vérifiant la pertinence du pré-design vis-à-vis des spécifications programmatiques et de la faisabilité technique de l'ouvrage. L'évaluation repose sur l'analyse de sept critères : simplicité de la solution, simplicité de gestion, possibilité de vérification, disponibilité des compétences, pertinence vis-à-vis des fonctions d'usage, soutenabilité et économie. L'analyse multicritère utilise la méthode AHP pour établir des matrices de jugement basées sur le retour d'expérience et sur les risques de changement de performance d'un projet.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Le projet est lauréat du concours « Jeunes Ingénieurs et Jeunes Chercheurs 2019 » de l'IMdR.

- Contrada F., et al (2019). An early-design stage assessment method based on constructibility for building performance evaluation. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 609 072070
- Contrada F. (2019). L'apport de la Constructibilité au pré-design. Analyse et support au choix des solutions techniques Ph. D Thesis in Science de l'Ingénieur Université ParisEst. ■

Équipements pour la caractérisation thermo-énergétique des bâtiments (Laboratoire d'Energétique de la Construction Durable, LECD)

Le laboratoire d'énergétique de la construction durable LECD qui se trouve au deuxième étage du nouveau bâtiment Louis Vicat, inauguré en février 2019, offre un espace dédié à la caractérisation de la performance énergétique du bâtiment, par biais expérimental et numérique. Les activités d'enseignement et de recherche portent essentiellement sur la performance thermo-énergétique de l'enveloppe du bâtiment et sur la qualité environnementale interne du bâtiment.

Grâce au financement de la Fondation ESTP Paris, le laboratoire dispose de tous les équipements nécessaires : thermo-fluxmètres ; anémomètres uni et omnidirectionnels pour différents champs de vitesse ; caméra infrarouge pour les applications de thermographie ; plusieurs typologies de sondes de température et humidité ; une porte soufflante pour la caractérisation de la perméabilité à l'air de l'enveloppe ; une station météorologique extérieure, équipée en outre de pyromètre pour la mesure de la radiation solaire directe et diffuse.



Station microclimatique pour la caractérisation du confort de l'occupant.

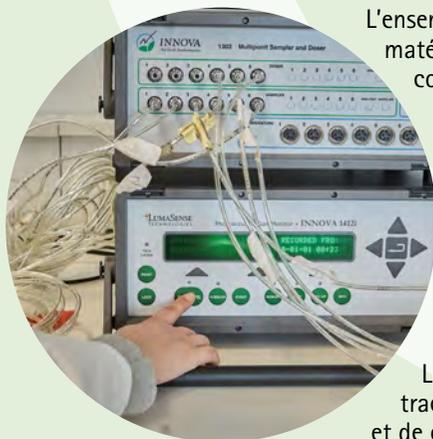
La station (classe ASHRAE, ISO7730) est équipée avec des capteurs de température de l'air, de humidité relative, de vitesse de l'air, et de température radiante à différentes hauteurs.

CONTACT

Andrea Kindinis
akindinis@estp-paris.eu

Spectroscopie photo-acoustique (PAS) et échantillonneur du traceur de gaz

Le spectroscopie est utilisé pour déterminer le temps de vie de l'air à l'intérieur dans plusieurs points et permet de déterminer les indices qui définissent l'efficacité du système de ventilation à renouveler et à dépolluer l'air.



L'ensemble de ces équipements, en collaboration avec les laboratoires matériaux, permet d'accompagner le développement de nouveaux composants d'enveloppe, d'analyser le comportement thermo-énergétique des bâtiments réels, de caractériser la qualité microclimatique interne, et de définir des stratégies de ventilation, rafraîchissement, et chauffage orientées à la satisfaction des usagers et à la réduction des dépenses énergétiques. Parmi les équipements à disposition, le laboratoire est doté de plusieurs stations de mesure pour la caractérisation des conditions microclimatiques des espaces internes, permettant d'étudier la perception de confort thermique des occupants.

Le spectroscopie photo-acoustique (PAS) et échantillonneur du traceur de gaz pour la détermination des indices de ventilation, et de capteurs pour le suivi de la qualité de l'air à l'intérieur. ■





PROGRAMME GÉNIE CIVIL
DES OUVRAGES
COMPLEXES ET
NUCLÉAIRES (GC²N)





CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le projet Génie Civil des ouvrages Complexes et Nucléaires (GC²N) s'adresse aux méthodes de conception et d'évaluation des risques de structures et systèmes complexes tels que les ouvrages du nucléaire. Les travaux de recherche et les thèses (passées et futures) sont finalisés à une investigation des scénarios accidentels, des événements redoutés et de leurs conséquences (séisme, liquéfaction des sols), des comportements complexes (fissuration, endommagement, rupture). Pour les ouvrages du nucléaire, l'objectif principal est de mettre au point des approches bien fondées scientifiquement qui puissent aider à garantir la robustesse des installations vis-à-vis des risques à la conception et lors des réévaluations périodiques de sûreté dans un contexte d'exigences réglementaires à la hausse.



VERROUS SCIENTIFIQUES

- Développer des méthodes avancées de simulation numérique validées expérimentalement pour des structures en béton armé sous séisme.
- Disposer d'outils et de méthodes validés et performants pour la simulation numérique des effets de site à l'échelle kilométrique.
- Disposer de méthodologies de justification, avec un niveau de complexité adapté à l'enjeu des

équipements considérés, validées par des modèles avancés ou des essais.

- Réduire les temps de calcul, d'exploitation des résultats, des études paramétriques et de collecte des données.



AXES SCIENTIFIQUES

Dans un concept de Constructibilité, l'activité Génie Civil des ouvrages Complexes et Nucléaires au sein de l'IRC se décline selon deux axes :

- Évaluer et accompagner le développement de nouvelles méthodes de

conception, construction, rénovation et réparation de structures et infrastructures ;

- Garantir l'amélioration permanente des ouvrages face aux évolutions environnementales, réglementaires et sociétales.



OBJETS D'ÉTUDE

Les activités de recherche et innovation technologique portent sur la Constructibilité et la sûreté avec l'objectif d'anticiper les solutions futures tout en poursuivant l'appui aux structures existantes. Les thématiques abordées sont la statique et la dynamique des structures, l'aléa sismique et les risques de liquéfaction des sols, l'analyse des structures sous chargement sismique, la modélisation des comportements complexes de matériaux et structures, les méthodes de dimensionnement et les calculs de ferrailage.



MOTS-CLÉS

Mécanique des structures, séisme, liquéfaction des sols, endommagement, rupture, modélisation, dimensionnement, ferrailage, simulation numérique.



CONTACT

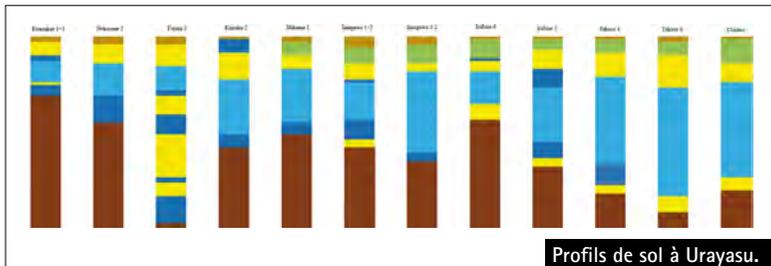
Carine Brault
cbrault@estp-paris.eu



Méthodes d'ingénierie pour l'étude de la liquéfaction de sites et de barrages

CONTEXTE

La révision des Eurocodes pour le bâti courant et les suites de l'accident de Fukushima pour les installations à risque amènent à vérifier la tenue au séisme de certains ouvrages ou à identifier les marges dont ils disposent au-delà du niveau retenu à la conception. C'est le cas des barrages, en particulier des barrages en remblai dont l'expérience a montré que le phénomène de liquéfaction pouvait entraîner la ruine. Sur un site, nucléaire ou non, ce phénomène peut aussi entraîner la perte de portance de certaines fondations.



Profils de sol à Urayasu.

La méthode proposée a été validée par des observations de liquéfaction et non-liquéfaction sur 12 sites de profils variables de la ville d'Urayasu, lors du Grand séisme de l'est du Japon (11 mars 2011). Elle a aussi permis d'interpréter les observations faites sur le barrage d'Aratozawa (Japon) lors du séisme d'Iwate Miyagi Nairiku (2008). La méthode a fait l'objet de la thèse de Ziad Kteich, soutenue à l'ESTP Paris le 7 novembre 2018.

CONTACTS

Pierre Labbé
pierre.labbe@estp.fr
Abdelkrim Bennabi
abennabi@estp-paris.eu

PARTENAIRES

EDF-TEGG, Aix-en-Provence ;
IFFSTAR.

OBJECTIFS

Proposer à l'ingénierie une méthode d'évaluation du risque de liquéfaction d'un site et/ou d'un ouvrage en remblai, sans avoir à mener des calculs transitoires non-linéaires, engendrant des études longues et délicates qu'il est matériellement impossible d'appliquer à chaque cas rencontré.

ACTIONS DE RECHERCHE

Dans la continuité de recherches menées dans les années 90 sur le tassement sismo-induit, on utilise une loi simple de variation de volume sous cycles de déformation de cisaillement et on traduit la variation de volume en montée de pression interstitielle. On détermine le nombre de cycles équivalents à un transitoire sismique par des techniques de la théorie des processus aléatoires. On en déduit

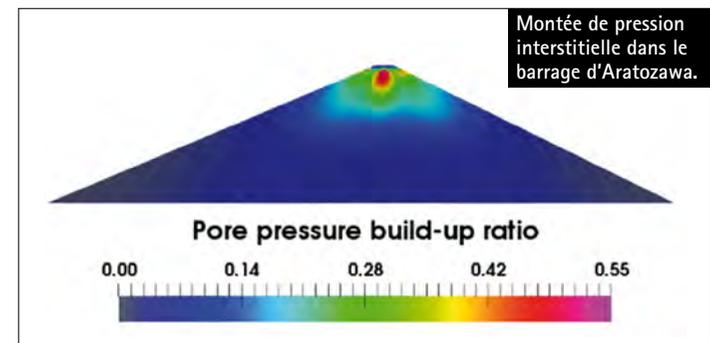
une évaluation du risque de liquéfaction, sans avoir à conduire des calculs non-linéaires. Le risque est avéré si la pression interstitielle dépasse la contrainte effective dans le sol.

RÉSULTATS

La méthode proposée a été validée par des observations de liquéfaction et non-liquéfaction sur 12 sites de profils variables de la ville d'Urayasu, lors du Grand séisme de l'est du Japon (11 mars 2011). Elle a aussi permis d'interpréter les observations faites sur le barrage d'Aratozawa (Japon) lors du séisme d'Iwate Miyagi Nairiku (2008). La méthode a fait l'objet de la thèse de Ziad Kteich, soutenue à l'ESTP Paris le 7 novembre 2018.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

• La méthode a fait l'objet d'une publication dans la revue Soils and Foundations en mars 2019. Elle a été présentée à la réunion annuelle de la Commission Internationale des Grands Barrages en juillet 2019 à Ottawa. ■



Endommagement des tuyauteries sous séisme et méthodes d'ingénierie

CONTEXTE

Les suites de l'accident de Fukushima amènent à vérifier la robustesse, non seulement des ouvrages, mais aussi d'une grande quantité d'équipements qui doivent assurer leur fonction pendant et après un séisme. Les exigences de sûreté sont maintenant de montrer que l'installation dispose de marges importantes même en considérant des événements d'un niveau excédant celui retenu à la conception. Les tuyauteries sont réputées pour leur robustesse, mise en évidence par le retour d'expérience et par l'expérimentation en laboratoire, mais les méthodes actuelles d'ingénierie ne permettent pas d'exploiter ces marges. En outre le dommage contre lequel les normes en vigueur prémunissent, l'instabilité plastique, n'est pas celui de fatigue rochet qui est observé lors des essais.

OBJECTIFS

Proposer à l'ingénierie une méthode d'évaluation des marges de conception des tuyauteries pressurisées sous séisme qui tienne compte du type de dommage effectivement observé lors des essais. Bien que le dommage résulte de comportements hautement non-linéaires (déformation plastique cumulée) la méthode proposée



Déformation plastique cumulée observée lors des essais conduits par la NRC et l'EPRI aux USA.

s'appuiera sur les résultats de calculs linéaires tels que l'ingénierie les pratique de façon courante.

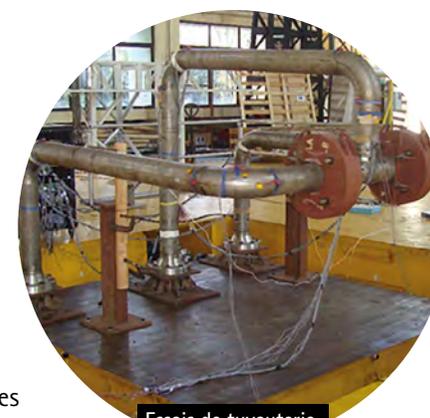
ACTIONS DE RECHERCHE

Le programme de recherche consiste à : 1) identifier des lignes de tuyauteries industrielles représentatives. 2) modéliser et interpréter des essais de composants et de tuyauteries réalisés aux USA dans les années 80 et 90, en France dans les années 90, au Japon dans les années 2000 et actuellement en Inde. 3) adapter les méthodes de linéarisation équivalente développées à l'ESTP Paris au cas des tuyauteries, 4) analyser les dommages d'instabilité plastique et de fatigue oligo-cyclique et proposer de nouveaux critères de conception adaptés à ces dommages.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Les travaux menés à l'ESTP Paris ont déjà permis de mettre en évidence que les marges observées trouvent leur origine dans la dynamique des structures, en particulier dans le rapport entre le contenu fréquentiel de l'excitation et les fréquences propres des structures sollicitées. Ces résultats ont été présentés au congrès ASME-PVP de 2018 et au SMIRT (Structural Mechanics in Reactor Technology) 2019 ; d'autres le seront au congrès ASME-PVP de 2020.

La méthode fait l'objet d'une thèse CIFRE en cours de montage avec la société GDS. ■



Essais de tuyauterie réalisés en Inde au Bhabha Atomic Research Center.

CONTACT

Pierre Labbé
pierre.labbe@estp.fr

PARTENAIRES

GDS, EDF, ENSTA, CNRS-LMA.





PROGRAMME

**ARCHITECTURE
ET MANAGEMENT
DU RISQUE**





CONTEXTE ET OBJECTIFS

Dans le cadre de l'axe « Ouvrages Durables », le programme Architecture et Management du Risque mène avec les entreprises industrielles des programmes ou des opérations de R&D dans l'objectif d'une part, d'apporter des solutions exploitables pour fiabiliser la réalisation de leurs objectifs et d'autre part, d'enrichir les connaissances dans le domaine.

Une difficulté fréquemment rencontrée est de satisfaire conjointement à des exigences de croissance rentable à très court terme et à l'impératif d'une transition écologique qui, elle, s'inscrit dans le temps long.

Si le reporting financier rend compte des premières, le reporting extra-financier (RSE) informe des principaux risques dans les trois domaines : social, sociétal et environnemental. Or, le reporting financier ne peut, compte tenu des principes comptables, intégrer le risque d'entreprise sur un plan quantitatif et le reporting extra-financier n'est pas intégré au reporting financier. Il en ressort une difficulté à positionner des objectifs qui tiennent compte du risque pouvant être pilotés à l'aide de KRI (*Key Risk Indicator*) multicritères.

Ainsi, pour manager efficacement les risques, en complément des référentiels (COSO, AMF, ISO...) pour lesquels la quantification du risque reste du domaine du qualitatif-numérique et le concept de financement du risque

absent, l'architecture digitale du risque d'entreprise permet de modéliser le risque pour l'évaluer globalement. Puis en connectant au réseau l'ensemble des « risk-takers », le système restitue, en temps réel, la probabilité qu'ils ont de réaliser leurs objectifs et les ressources pour l'augmenter. Pour tenir compte de la complexité des organisations, la structure du modèle est multi-échelles (ouvrage, projet, portefeuille de projets, filiales, activités, groupe).



VERROUS SCIENTIFIQUES

- Définir l'attitude par rapport au risque de l'entreprise du fait de l'inversion du cycle de production ;

- Décliner l'attitude par rapport au risque de l'entreprise et l'intégrer à tous les niveaux de décisions par la digitalisation des processus concernés et de nouvelles méthodes et outils ;

- Produire de nouvelles approches technique, économique, comptable et financière prospectives et actualisées en temps réel qui intègre le risque sur le temps long dans les différents dashboard ;

- Faire converger les attitudes individuelles par rapport au risque avec celle de l'entreprise ou s'assurer que la capacité (subjective) des décideurs à prendre des risques est en adéquation avec la capacité objective de l'entreprise à les supporter.



AXES SCIENTIFIQUES

Le premier et second axe, par une modélisation graphique et digitale, recherchent à faciliter l'intégration :

- de nouvelles capacités métier au sein de l'entreprise par l'architecture du risque d'entreprise ;
- du risque à toutes les échelles, ouvrages (infrastructures, bâtiments), projet, portefeuille de projets, activités, entreprise grâce à l'architecture des systèmes complexes ;

Le troisième axe, l'actuariat industriel, regroupe l'ensemble des techniques, méthodes et outils (dont l'IA) qui intègre le risque et le temps dans les calculs avec l'objectif d'obtenir le coût de financement du risque le plus faible sur le temps long pour l'entreprise.



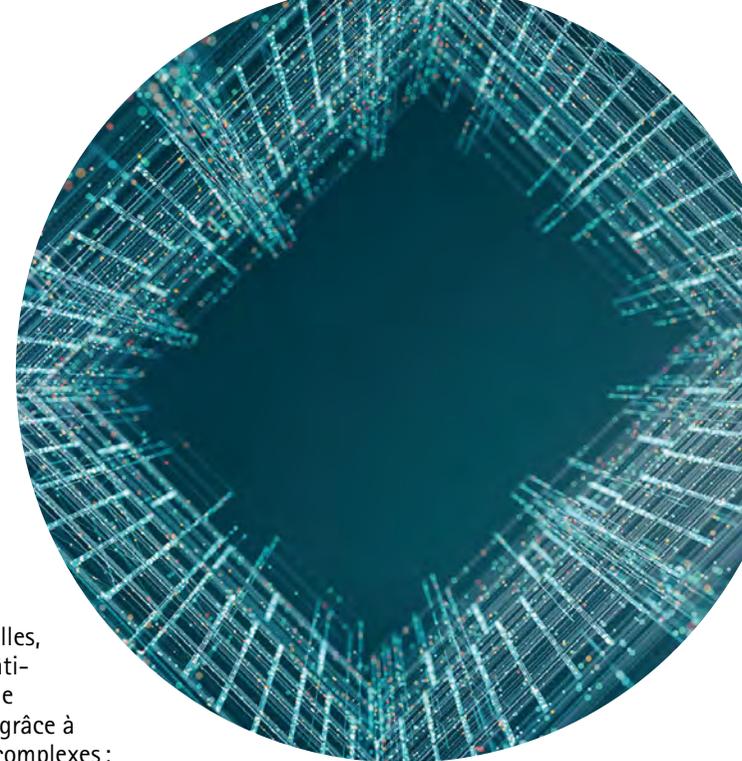
OBJETS D'ÉTUDE

La décision face au risque et à l'ambiguïté dans l'entreprise industrielle. La complexité des systèmes techniques et sociaux-techniques à risques.



MOTS-CLÉS

Inversion du cycle de production, architecture du risque, KRI, décisions, objectifs.



CONTACT

Francis Claude
Responsable du programme
Architecture et Management
du Risque
fclaude@estp-paris.eu



Garanties de performances énergétiques

Modèle de hors-bilan

CONTACTS

Francis Claude
fclaude@estp-paris.eu

Gilles Thing Leo
gilles.thingleo@estp.fr

PARTENAIRES

Bouygues Construction. Risk intelligence & Décisions ©RiD

CONTEXTE

Depuis le Grenelle de l'environnement et les rapports Costa, Jouvent (2012) et Huet, Jouvent (2013), la garantie de performance énergétique est devenue un service commercialisé. Ainsi, pour garantir des exigences performantielles de bâtiments, des entreprises dépassent la réglementation thermique et les labels énergétiques basés sur des règles théoriques et non sur les performances atteintes, pour garantir le fait que les exigences spécifiées soient réellement atteintes.

À l'échelle d'un projet, la quantification des engagements est réalisée très tôt (phase APS), de nombreux intervenants vont avoir un rôle à jouer et, durant le contrat, des événements peuvent ou non survenir (risques) et entraîner des conséquences financières adverses. À l'échelle d'un portefeuille de projets, ces engagements se cumulent et doivent être agrégés, évalués, gérés et financés. Or, les mécanismes comptables ne permettent pas de provisionner « les risques » dans les reporting financier et extra-financier actuels. Il y a donc un risque que les résultats futurs de l'entreprise viennent financer des risques projets pris il y a plusieurs années voire décennies. Un hors-bilan désigne une activité de financement ne figurant pas au bilan.

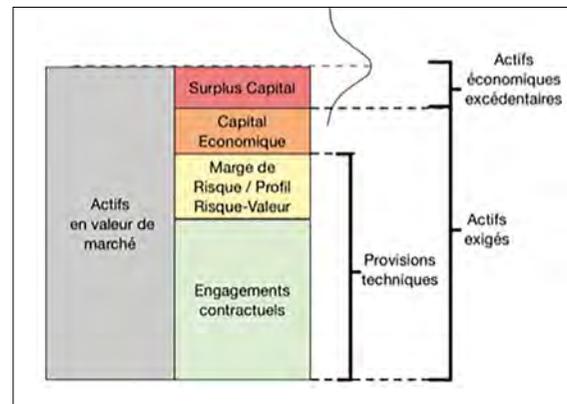
OBJECTIFS

- Fournir une modélisation et une évaluation du risque « GPE » à l'échelle d'un projet et d'un portefeuille de projets jusqu'à l'échéance de la totalité des engagements contractuels ;

- Provisionner le risque « GPE » par le biais d'un hors-bilan ;
- Financer le risque « GPE » sur le temps long et en tirer un avantage compétitif.

ACTIONS DE RECHERCHE

Au moment où le contrat est signé, l'entreprise ne connaît pas avec certitude le prix de revient du service. Ce dernier sera connu au terme des engagements contractuels. En considérant ce nouveau service comme un bien contingent, c'est-à-dire un bien soumis à l'aléatoire, les processus métiers existants ont été enrichis d'approches techniques, économiques, comptables et financières qui intègrent le risque encouru dans cette activité. La structure de risque a été décomposée en engagements contractuels, prime de risque, profit, capital économique et surplus capital de façon à argumenter sur la capacité de l'entreprise à prendre ce risque et le financer sur le temps long.



RÉSULTATS

Un PoC (Proof of Concept) correspondant à un niveau de maturité technologique de 3 – Preuve expérimentale du concept – a été réalisé sous la forme d'une application

digitale en réseau.

Chaque intervenant, dans le cadre de ces activités, est impliqué (experts énergie, commerciaux, équipes de conception, travaux, exploitants).

Le (la) responsable en engagement énergétique dispose du dashboard pour piloter le portefeuille d'engagements sur les plans stratégique et opérationnel. ■

Décisions multicritères pour l'éco-conception de bâtiments durables

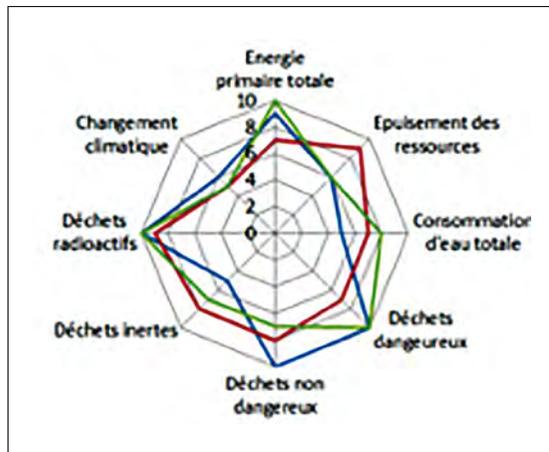
CONTEXTE

L'analyse de cycle de vie est utilisée par la communauté de l'éco-conception pour évaluer puis atténuer les impacts négatifs avec les choix de conception. Néanmoins, compte tenu du nombre important d'indicateurs d'impacts fournis selon les référentiels, il devient complexe en pratique de classer les options de conception possibles afin de réaliser le choix efficient et que celui-ci soit intelligible pour un maître d'ouvrage.

En pratique des représentations de type radial sont réalisées mais elle permettent difficilement de se faire un jugement d'ensemble et il est impossible de comparer objectivement ne serait-ce que deux options. En considérant les connaissances et l'expérience des experts de l'entreprise comme source d'objectivité, l'objet de cette étude a été d'utiliser un algorithme d'apprentissage qui puisse prédire l'impact environnemental d'un bâtiment en une valeur unique de synthèse.

OBJECTIFS

- Modéliser le problème de décision ;
- Déterminer une mesure non-additive pour tenir compte des interactions et redondances entre critères ;
- Renseigner la bibliothèque de cas ;
- Entraîner la machine par apprentissage supervisé ;
- Identifier la solution efficiente.

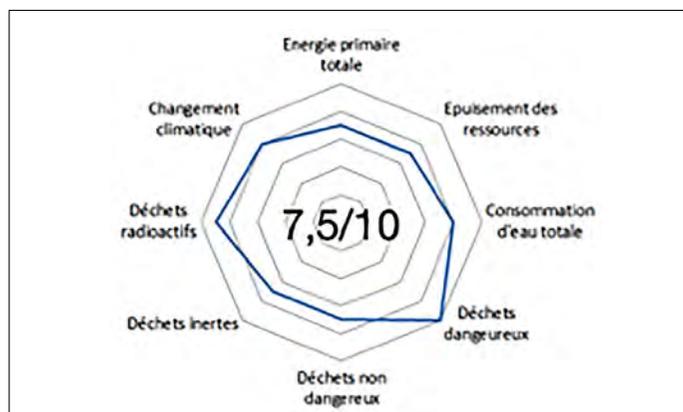


ACTIONS DE RECHERCHE

La première action a consisté à rendre davantage lisible les résultats d'une analyse ACV dans la mesure où les critères sont exprimés dans des dimensions et des grandeurs différentes et que des critères peuvent être incrémentaux ou décrémentaux. La seconde action a permis de regrouper les avis de plusieurs experts en ligne sur une base de référence de bâtiments réalisés par l'entreprise. Enfin, en agrégeant les indicateurs d'impacts et en les considérant comme des critères de décisions, un classement sans équivoque entre les différentes options est réalisé.

RÉSULTATS

L'application a été intégrée au logiciel ©RiD Construction développée lors du projet du FUI 19. ■



CONTACTS

Francis Claude
fclaude@estp-paris.eu

Gilles Thing Leo
gilles.thingleo@estp.fr

PARTENAIRES

Bouygues Construction. Vinci Construction France. Risk intelligence Et Décisions ©RiD.



Thèses de doctorat pour les ouvrages durables



« **L'apport de la Constructibilité au pré-design. Évaluation et support aux choix des solutions techniques** », soutenue par Francesca Contrada en janvier 2019. Thèse de l'École Doctorale Sciences Ingénierie et Environnement de l'Université Paris-Est, dirigée par Christophe Gobin, co-encadrée par Jean-François Caron (ENPC/Navier) et Andrea Kindinis, financée par Efficacity et la Fondation ESTP Paris.



« **Stratégies de conception de bâtiments à énergie quasi nulle en Côte d'Ivoire** », préparée par Bi Dje Felicien Zeoua To. Thèse en cotutelle entre INP HB Yamoussoukro et SIE UGE, co-dirigée par Athanas Konin (INP HB) et Rabah Hamzaoui, co-encadrée par Andrea Kindinis et Rita Sassine, financée par un contrat C2D.





LES SYSTÈMES URBAINS





PROGRAMME SYSTÈMES URBAINS





CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les villes sont des systèmes dynamiques complexes et plusieurs facteurs peuvent influencer sur la réussite du processus de la modélisation urbaine. Dans ce processus, le modèle doit respecter plusieurs contraintes et règles, ce qui peut entraîner une augmentation de sa complexité.

Les travaux de recherche visent à :

- Améliorer notre compréhension des simulations numériques de croissance urbaine en représentant les impacts des constructions, des réseaux et des contraintes environnementales sur l'étalement urbain.
- Accompagner et faciliter la mise au point de l'inscription de l'ouvrage dans son environnement (BIM et CIM) ainsi que la conception des outils d'aide à la décision pour la gestion et l'aménagement des territoires.



VERROUS SCIENTIFIQUES

- À l'échelle « produit » : ils sont liés à l'objet d'étude, c'est-à-dire l'inscription de l'ouvrage dans le territoire, ils sont d'une part l'articulation avec l'aménagement des réseaux et des villes et, d'autre part, l'influence des paramètres d'étude du système urbain (exemple : gestion de l'eau).
- À l'échelle « process » : ils rendent compte de la gestion des territoires et la

prise en compte de la résilience urbaine. Ils concernent la simulation de la croissance urbaine, avec moins de perte d'informations sémantiques, la modélisation de systèmes complexes et la conception des outils de représentation et de gestion du territoire (SIG, CIM, big data, digitalisation).



AXES SCIENTIFIQUES

On retrouve à cette échelle les travaux qui portent sur la confrontation de l'inscription territoriale et les conditions de la transition numérique et la digitalisation, sur l'aménagement et la résilience des systèmes urbains et des dynamiques urbaines ; sur la conception des outils d'aide à la gestion des chantiers de construction en fonction des aléas et enfin sur la modélisation de systèmes complexes.



OBJETS D'ÉTUDE

Les activités de recherche regroupées sous ce thème portent sur :

- La modélisation 3D CIM de l'environnement et la simulation numérique ainsi que sur l'application de la Constructibilité à l'étalement urbain. Cette étude a pour but l'analyse du comportement de l'étalement urbain, la classification des types des bâtiments, la génération des modèles d'utilisation des terres, le développement d'un modèle 3D de la croissance urbaine afin de contrôler les effets de la croissance démographique

sur l'occupation du sol et la consommation d'énergie.

- La Constructibilité à l'interface entre voirie et réseaux enterrés. Cette étude a pour objectif de simplifier la vision de l'infrastructure routière des différents acteurs pour faciliter la communication, d'étudier les avantages et limites des données existantes pour la gestion de l'infrastructure, de proposer une modélisation SIG de l'infrastructure (verticale et horizontale) pour aider les collectivités à la production de données ; et enfin d'analyser les interactions spatiales entre voirie et réseaux, pour nourrir les discussions sur les choix constructifs.

- L'interopérabilité et les formats d'échange standards utilisés dans les maquettes numériques et l'intégration des données IFC dans le SIG et le CIM.



MOTS-CLÉS

Constructibilité, urbanisation, étalement urbain, simulation numérique, modélisation, politique de la ville, voirie, réseaux urbains, gestion de la construction, gestion des risques, SIG, CIM, BIM.



CONTACT

Rani El Meouche
Responsable du programme
Systèmes urbains
relmeouche@estp-paris.eu

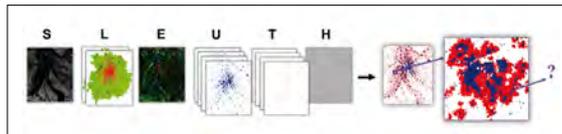




Simulation de croissance urbaine pour représenter les impacts possibles des constructions et des contraintes environnementales sur l'étalement urbain

CONTEXTE

L'urbanisation est principalement due à la croissance démographique, à l'exode rural vers les villes et au changement des modes de vie. Ce processus augmente les terres artificielles, qui affectent la biodiversité, les écosystèmes, le climat urbain et réduit les terres pour l'agriculture et les espaces naturels.



OBJECTIFS

L'objectif de ce projet est de proposer des solutions pour simuler divers scénarios d'urbanisation afin d'améliorer la prise de décision en matière de politiques publiques. Pour ce faire, le modèle SLEUTH est utilisé afin d'évaluer l'impact des types de bâtiments et des règles environnementales sur l'étalement urbain. Dans la méthode utilisée, SLEUTH intègre davantage des données topographiques, des données sur les tissus urbains et démographiques, y compris des caractéristiques géographiques et des contraintes environnementales. Le principal défi de cette recherche est de proposer différents scénarios d'étalement urbain pour plusieurs types de règles environnementales tout en tenant compte du besoin des habitants ou du moins d'une estimation de la croissance de la population. Les objectifs sont de comprendre l'impact des types de bâtiments sur l'étalement urbain, de faire la distinction entre l'étalement urbain et la croissance dense et la simulation avec moins de perte d'information sémantique.

ACTIONS DE RECHERCHE

Afin d'améliorer les résultats de SLEUTH, différents scénarios de simulation de croissance urbaine en 2D ont été définis sur la base du

modèle SLEUTH en ajoutant le type de bâtiment et l'estimation de la croissance démographique en tant que facteurs du tissu urbain. Chaque simulation correspond à des politiques plus ou moins restrictives en espaces considérant ce que ces territoires peuvent accueillir en tant que type de bâtiment et en tant que population globale. De plus, les simulations peuvent aider l'utilisateur à protéger les terrains souhaités, tels que les espaces environnementaux, de l'urbanisation. Ces scénarios montrent la force de la simulation du modèle et permettent d'améliorer notre compréhension de l'étalement urbain.

RÉSULTATS

Trois études de cas de tailles et de populations différentes sont utilisées, Toulouse Métropole, Saint Sulpice la Pointe et Rieucros, afin de donner une idée de l'efficacité de la méthode proposée à plusieurs échelles. L'évaluation des résultats indique que la méthode proposée est capable d'effectuer différentes simulations correspondant à plusieurs priorités et contraintes foncières. Il est utile de voir quels terrains peuvent être protégés (où) et quel type de bâtiment peut être utilisé pour limiter l'étalement urbain (combien). Une représentation en 3D de chaque simulation de croissance urbaine est fournie afin de faciliter l'interprétation de la simulation SLEUTH et de différencier les scénarios. Les résultats permettent d'avoir plusieurs images de la ville de demain pour l'appliquer aux politiques urbaines.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- Eslahi, M. (2019). « Simulations de croissance urbaine pour représenter les impacts possibles des constructions et des contraintes environnementales sur l'étalement urbain - Constructibilité et application à l'étalement urbain » ; thèse de doctorat. ■

CONTACTS

Rani El Meouche
relmeouche@estp-paris.eu

Mojtaba Eslahi
meslahi@estp-paris.eu

Géo-visualisation en 3D de perspective urbaine respectant certaines contraintes d'urbanisation

CONTEXTE

Ces dernières années, diverses recherches sur les modèles de villes virtuelles 3D ont été menées. Les modèles de villes 3D sont utilisés pour représenter les surfaces urbaines et les objets importants qui y sont attachés, y compris les bâtiments et l'environnement à des fins différentes telles que la communication, la gestion du patrimoine urbain, les projets d'urbanisme et la modélisation de simulation en termes de bruit, solaire, pollution, changements climatiques, inondations et étalement urbain. Il existe de nombreuses techniques différentes pour générer un modèle de ville 3D, telles que la création de bâtiments 3D à partir d'empreintes urbaines et la reconstruction 3D et l'intégration de données, qui sont utilisées pour fusionner la photogrammétrie ou le balayage laser avec des données SIG.

OBJECTIFS

Les applications basées sur les SIG nous permettent de créer les bâtiments 3D et d'analyser les informations géographiques. L'objectif est d'illustrer la représentation 3D d'un modèle de croissance urbaine tout en respectant un ensemble de contraintes en utilisant le SIG.

ACTION DE RECHERCHE

Dans cette recherche, les bâtiments 3D sont créés en donnant la troisième dimension aux empreintes 2D des bâtiments. La troisième dimension indique les hauteurs des bâtiments obtenues en fonction de la classe de bâtiment et de la densité de population. Les bâtiments sont illustrés dans des modèles de blocs avec une structure de toit plat (similaire à LoD1 de CityGML). Le modèle de croissance

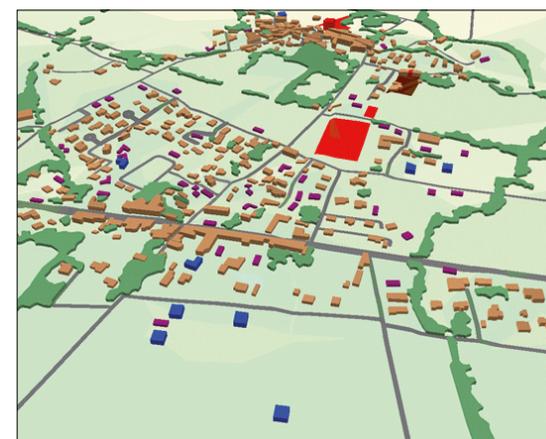
urbaine SLEUTH génère les cartes 2D prospectives contenant certains pixels sur lesquels l'urbanisation est censée se produire. Ces cartes 2D se limitent à des données raster difficiles à interpréter pour les décideurs et doivent être transformées en représentations de bâtiments 3D.

RÉSULTATS

Dans cette recherche, nous avons proposé un algorithme pour transformer les résultats SLEUTH (pixels) en représentations de bâtiments 3D concernant la densité de population, le tissu urbain et certaines restrictions d'urbanisation telles que la direction des empreintes et les distances aux objets urbains et aux caractéristiques géographiques. La hauteur des nouveaux bâtiments dépend de la probabilité de la hauteur des bâtiments adjacents déjà existés en fonction du tissu urbain. Le modèle est appliqué sur les cartes de croissance urbaine simulées de 2050 pour Rieucros. Bien que le modèle 3D fourni soit un modèle primaire et simple, il permet de mieux comprendre les résultats de la simulation et de faciliter l'interprétation de la simulation SLEUTH.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

• El Meouche, R., Eslahi, M., Ruas, A., and Sammuneh, M.A., (2019-2020). From pixels to 3D Representations of Buildings: A 3D Geo-visualization of Perspective Urban Respecting Some Urbanization Constraints, GISTAM proceeding, Soumis. ■



CONTACTS

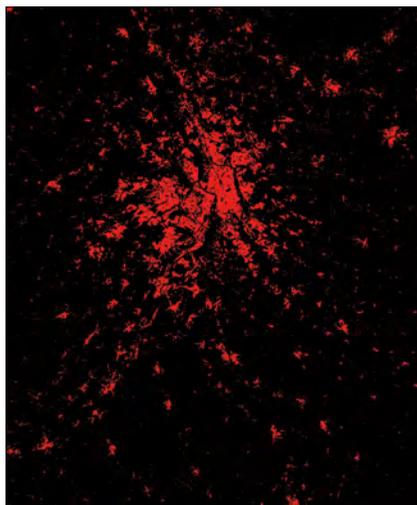
Rani El Meouche
relmeouche@estp-paris.eu

Mojtaba Eslahi
meslahi@estp-paris.eu

M. Sammuneh
msammuneh@estp-paris.eu



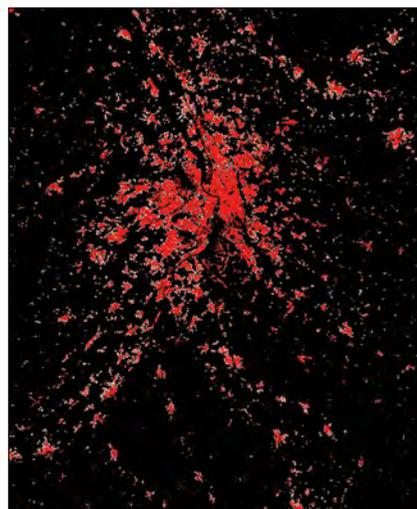
Utilisation des types de bâtiments et des données démographiques pour améliorer notre compréhension et notre utilisation de la simulation de l'étalement urbain



CONTEXTE

De nombreuses études, utilisant différentes approches de modélisation et outils de simulation, ont été réalisées dans le domaine de la croissance urbaine. Une multitude de modèles, aux caractéristiques communes ou spécifiques, ont été développés pour reconstituer l'occupation spatiale et les changements d'affectation des sols. Cependant, aujourd'hui, la plupart des techniques de croissance urbaine utilisent simplement les données géographiques historiques telles que les cartes urbaines, routières et excluent pour simuler les cartes urbaines prospectives.

Dans cette recherche, en ajoutant les bâtiments et les données démographiques comme facteurs du tissu urbain, nous définissons différents scénarios de simulation de croissance urbaine. Chaque simulation correspond à des politiques plus ou moins restrictives de l'espace compte tenu de ce que ces territoires peuvent accueillir comme type de bâtiment et comme population globale.



OBJECTIFS

L'objectif principal de ce projet est d'évaluer

et d'améliorer l'étalement urbain simulé en utilisant la densité topographique et démographique.

ACTIONS DE RECHERCHE

Parmi les techniques de modélisation de la croissance urbaine, on a les modèles dynamiques qui sont basés sur les Cellular Automata (CA). Ces modèles sont les plus courants pour leurs applications en milieu urbain. Ils peuvent être intégrés aux systèmes d'information géographique (SIG) pour avoir un modèle à haute résolution spatiale avec une efficacité de calcul. Le modèle SLEUTH est l'un des modèles d'automates cellulaires, qui correspond à la simulation dynamique de l'expansion urbaine et pourrait être adapté au modèle morphologique de la configuration urbaine et du tissu.

RÉSULTATS

En utilisant le modèle SLEUTH, on propose différentes simulations qui correspondent à différentes priorités et contraintes foncières. Nous avons utilisé des données communes (telles que des données topographiques, démographique et type de bâtiments) pour améliorer le réalisme de chaque simulation et leur adéquation avec le monde réel. Les résultats permettent d'avoir différentes images de la ville de demain pour choisir et réfléchir sur les politiques urbaines.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

• Eslahi, M., El Meouche, R., and Ruas, A. (2019). Using building types and demographic data to improve our understanding and use of urban sprawl simulation, Proc. Int. Cartogr. Assoc., 2, 28, <https://doi.org/10.5194/ica-proc-2-28-2019>. ■

CONTACTS

Rani El Meouche
relmeouche@estp-paris.eu

Mojtaba Eslahi
meslahi@estp-paris.eu

BIM et contribution au développement du pont-IFC : application sur le pont Raymond Barre



CONTEXTE

Le BIM (Building Information Modeling) est un nouveau concept dans l'industrie de la construction et est devenu populaire dans le monde entier ces dernières années. Le BIM est largement utilisé par les particuliers, les entreprises et les agences gouvernementales. Il est appliqué à toutes les phases du cycle de vie de la construction, de la planification et de la conception à la construction et à l'entretien. Il contient différents types de structures de bâtiments et d'infrastructures, y compris l'eau, les ordures, l'électricité, le gaz, les services de communication, les routes, les chemins de fer, les ponts, les ports et les tunnels.

OBJECTIFS

L'application du BIM dans le domaine de la construction est relativement répandue alors que le développement de la méthode BIM dans le domaine des infrastructures est encore en vogue. Dans cette recherche, nous étudions la compatibilité du BIM dans la modélisation du pont en utilisant Autodesk Revit.

ACTION DE RECHERCHE

Dans ce travail, deux données échangeant des normes ouvertes qui sont principalement utilisées dans le BIM, dans le domaine de la modélisation de pont, y compris IFC (Industry Foundation Classes) et CityGML (Geography Markup Language) sont passées en revue. Un modèle de pont 3D paramétrique est établi avec Autodesk Revit afin de réaliser une expérience sur la modélisation des informations de pont. Le pont Raymond Barre à Lyon, France, est utilisé comme étude de cas. Nous avons divisé le processus de modélisation du pont en deux étapes.

La première consiste à structurer les éléments du pont, ce qui signifie générer les différentes parties du pont, y compris les fondations, les parties de pont, les diaphragmes et la corde d'arc ; l'étape suivante consiste à assembler les pièces du pont et à placer ses éléments. Dans le processus de modélisation, un grand nombre de familles de clients sont créées pour représenter les entités de pont manquantes qui pourraient entraîner la perte d'informations dans le fichier IFC.

RÉSULTATS

Nous montrons que l'IFC actuel n'est pas bien développé pour les ponts et qu'il est nécessaire de définir des entités spécifiques dédiées au domaine des ponts. Nous nous référons également aux autres recherches dans ce domaine et à leurs suggestions pour étendre IFC pour



les ponts tels que le dictionnaire de données de pont, le manuel de livraison d'informations, les concepts manquants et les nouvelles entités pour IFC-bridge. Les résultats identifient l'urgence d'améliorer l'IFC pour le domaine des infrastructures, en particulier pour l'IFC-Bridge.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

• Eslahi, M., El Meouche, R., Ruas, A., Doukari, O. (2019). BIM and Contribution to IFC-Bridge Development : Application on Raymond Barre Bridge, Springer CCIS - Communications in Computer and Information Science. ■

CONTACTS

Rani El Meouche
relmeouche@estp-paris.eu

Mojtaba Eslahi
meslahi@estp-paris.eu





Cartographie des processus des projets de construction (Donor-funded construction project)

CONTEXTE

Les projets de construction publique dans les pays en difficulté économique sont financés par des organisations donatrices. Ces types de projets dans les pays à faible revenu ont été négativement influencés par le fossé de communication entre les intervenants, le consultant et l'entrepreneur en construction, qui émerge en raison de définitions peu claires des responsabilités et des problèmes d'échange d'informations. Toutes les parties prenantes sont confrontées à des problèmes importants en raison de cet écart.

OBJECTIFS

L'objectif principal de ce projet est d'identifier et de cartographier les processus des projets de construction financés par les donateurs pour faciliter une définition claire des tâches et des rôles, et soutenir la communication durable dans les projets financés par les donateurs.

ACTIONS DE RECHERCHE

Après une revue de la littérature, le document fournit une analyse des processus actuels dans les projets financés par les donateurs

et présente une carte des processus pour les projets financés par les donateurs qui est développée sur la base d'entretiens avec des experts et de cinq études de cas. La cartographie des processus est validée par un ensemble d'entretiens semi-structurés.



RÉSULTATS

Les cartes de processus développées dans cette étude peuvent être utilisées pour déterminer les exigences en matière d'échange d'informations, qui est un élément clé des approches de modélisation de l'information du bâtiment (BIM) et de livraison de projet intégrée.

VALORISATION ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

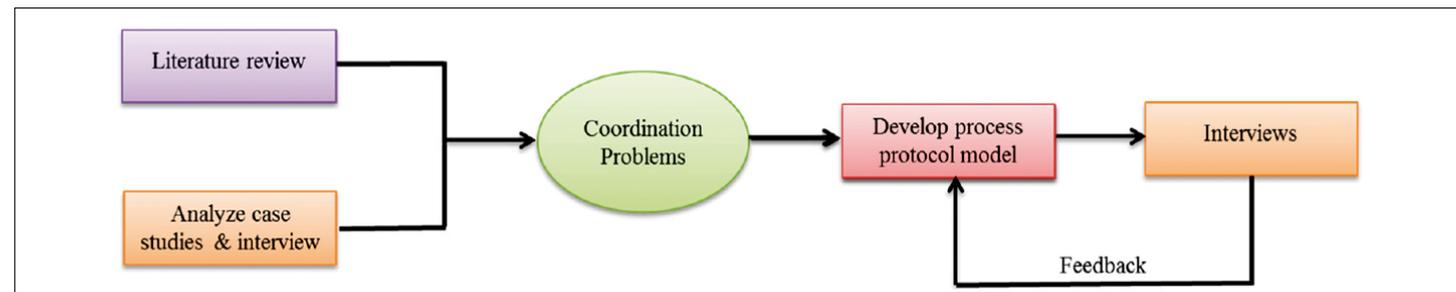
• Hijazi, I., Isikdag, U., Abunemeh, M., Li, X., Hashash, M., El Meouche, R., and Cansiz, S. (2018), Mapping the Processes of Donor-Funded Construction Projects, Sustainability 2018, 10, 2355 ; doi : 10.3390/su10072355. ■

CONTACT

Rani El Meouche
relmeouche@estp-paris.eu

PARTENAIRES

An-Najah National University
(Palestine)



Thèse de doctorat pour les systèmes urbains

« Modélisation 3D-BIM de l'environnement et simulation numérique : Constructibilité et application à l'étalement urbain », soutenue par Mojtaba Eslahi en novembre 2019. Thèse de l'École Doctorale Mathématiques et STIC de l'Université Paris-Est, dirigée par Anne Ruas (IFSTTAR), encadrée par Rani El Meouche, financée par la Fondation ESTP Paris.





LA VALORISATION DE LA RECHERCHE



Les temps forts de l'IRC en 2019

JANVIER 2019

Journée IdB XD consacrée à la réhabilitation de la maison Coignet

Les projets présélectionnés des étudiants de l'ESTP Paris ont été présentés au jury composé des membres de la Chaire Ingénierie des Bétons (IdB) sur le sujet de l'année : concevoir un projet de réhabilitation de la Maison Coignet. Cette maison pionnière, la première habitation construite en béton, leur a inspiré différents projets dans lesquels ils ont pu aborder des thématiques variées dont celles de l'innovation, de l'économie circulaire et du développement durable. De ces travaux en équipes composées de profils variés (élèves-ingénieurs, élèves-architectes, jeunes hommes, jeunes femmes), pour lesquels au total 300 étudiants étaient mobilisés, deux projets se sont démarqués : une Maison du « street art » et un FabLab béton. Le jury a pu apprécier les idées originales et convaincantes proposées pour la conservation de ce patrimoine unique.

> Contact : **Céline Florence**
cflorence@estp-paris.eu

29 JANVIER 2019

1/2 journée innovation routière avec Colas et CapGemini

Pour la troisième année consécutive, a eu lieu sur le campus de Cachan une

initiation à l'acculturation à l'innovation routière. Elle s'inscrit dans le plan d'étude de trois options de troisième année des étudiants de l'ESTP (Routes et Ouvrages d'art/Ingénierie des Travaux souterrains/Entrepreneuriat) ; elle est organisée par des enseignants-chercheurs de l'IRC, sous l'impulsion initiale de la profession, en partenariat avec COLAS et Cap Gemini, en s'appuyant sur une démarche pédagogique innovante.

Après une présentation par Philippe Raffin, directeur scientifique de Colas, des concepts généraux d'une démarche d'innovation en entreprise, une centaine d'étudiants ont réfléchi, échangé, pitché autour de quatre thèmes axés sur la Route et inscrits dans les thématiques de l'IRC, Institut de Recherche en Constructibilité. Coachés par des experts de Capgemini, Colas et des enseignants – chercheurs et responsables de département de l'ESTP Paris, dix-huit équipes se sont ainsi confrontées pour proposer des innovations répondant aux défis suivant :

- Route et sécurité (A. Dony/ K.Allag Ait Mokhtar).
- Route et transition climatique (P. Raffin ; L. Ziyani ; A. Kindinis).
- Route et transition numérique (G. Bordeaux Montrieux ; S. Le Strat)
- Route et le Grand Paris (A. de Jaegere ; A. Pavard).

Des idées riches qui ont conduit les finalistes à se confronter autour d'innovations

faisaient tant appel à des matériaux innovants, qu'à des nouvelles technologies, pour une prise en compte des usagers de la route mais aussi de l'organisation des chantiers...

> Contact : **Anne Dony**
adony@estp-paris.eu

20 FÉVRIER 2019

Inauguration du bâtiment Louis Vicat et de la plateforme technologique Ingénierie des Bétons

L'ESTP Paris a la volonté de développer une expertise dans la maîtrise des propriétés des bétons et des matériaux innovants, ainsi que de leurs applications afin de permettre aux futurs ingénieurs d'acquérir les compétences solides nécessaires dans le domaine des matériaux cimentaires.

La mise en œuvre de la chaire Ingénierie des Bétons (IdB) en juin 2014 initiée à la demande de l'industrie cimentière et soutenue par L'École Française du Béton (EFB) s'est déroulée en deux phases : la modernisation des équipements de l'espace Mortiers Et Ciments du laboratoire IdB et la création d'une salle de caractérisation physico-chimique au rez-de-chaussée du Bâtiment Terzaghi puis la construction du nouvel espace Bétons Et Granulats dans le nouveau bâtiment Louis Vicat.

L'inauguration de la nouvelle plateforme technologique s'est déroulée en février 2019 en présence du Président de Vicat et de son directeur Général. Le laboratoire IdB va permettre dès à présent d'accueillir les élèves ingénieurs pour les Travaux Pratiques et les différents stagiaires M1/M2 ou doctorants pour conduire des études complètes sur : le matériau béton (formulation de nouveaux bétons, la caractérisation des états frais et la performance mécanique), les granulats (caractérisation physico-chimique : détermination de la densité, analyse granulométrique...), la durabilité des bétons (carbonatation des bétons recyclés et stockage de CO₂, lixiviation...) et des travaux sur la géopolymérisation... La Fondation ESTP Paris, la direction de l'ESTP Paris et l'EFB ont contribué aux achats des équipements et à l'aménagement (paillasse, contrôle paramètres laboratoire et rayonnage) de l'espace.

> Contact : **Johan Colin**
jcolin@estp-paris.eu

20 AU 21 MARS 2019 AFGC et Cement Lab à l'ESTP Paris

L'ESTP Paris a accueilli sur son campus de Cachan, les journées techniques de l'Association Française de Génie Civil (AFGC), qui avaient pour sujet « Le Génie Civil au cœur des mutations technologiques et numériques ». En complément de cet événement,

dans le cadre de la Chaire Ingénierie des Bétons (IdB), la 3^e édition du workshop Cement Lab a également été organisée, en partenariat avec l'École Française du Béton (EFB). Une dizaine de start-ups ont pitché et échangé sur leur projet autour du thème « De l'idée à la réalisation : comment j'ai créé ma start-up ». Une belle opportunité pour les étudiants d'apprendre de leurs retours d'expérience.

> Contact : **Céline Florence**
cflorence@estp-paris.eu

16 MAI 2019 Journée Innovation de l'ESTP Paris

Cette journée est le rendez-vous annuel des partenaires, enseignants-chercheurs et étudiants de l'ESTP Paris. La Journée Innovation de l'ESTP Paris consacre les résultats des travaux de recherche innovation de l'école : les PIER, les stages de master recherche et les thèses de doctorat menés durant l'année.

Organisée tous les ans au mois de mai sur le campus de Cachan, en 2019, la Journée Innovation a évolué pour se transformer en un véritable « symposium » scientifique de l'école. 24 PIER, 4 thèses de doctorat et 8 stages de master recherche ont été sélectionnés pour être présentés lors de cette journée, sur les 3 axes de la Constructibilité. Tous les élèves ont présenté leurs posters lors de sessions dédiées.

Innover pour accroître les performances constructives et assumer les enjeux du développement durable et de la transition énergétique, le défi mobilise toujours l'ESTP Paris, ses enseignants, ses étudiants et son réseau de partenaires publics et privés. Avec 110 élèves et 29 enseignants impliqués, la Journée Innovation ESTP Paris, soutenue par CIMBETON, l'EFB et Routes de France, a confirmé le 16 mai 2019 les synergies pédagogiques et industrielles de l'école.

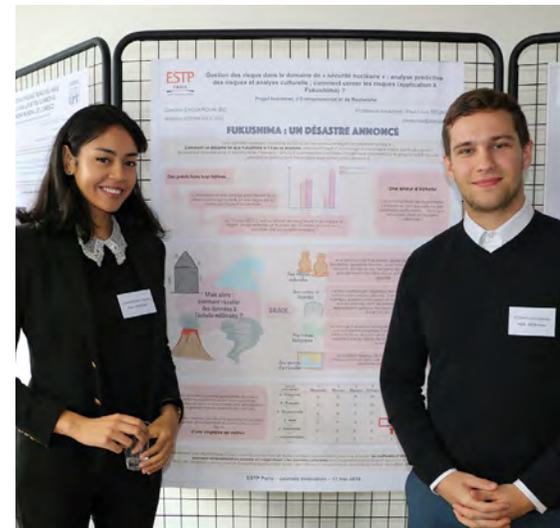
> Contact : **Carine Brault**
cbrault@estp-paris.eu

25 SEPTEMBRE 2019 Refondation des séminaires « Constructic », saison 2

L'activité de ce réseau de cooptation qui réunit des industriels et des universitaires travaillant sur la Construction a été relancée à l'automne 2019.

Il s'agit désormais d'un séminaire de recherche porté par l'IRC qui doit se tenir quatre fois par an. Son objectif est d'articuler la Constructibilité avec les problématiques de la profession et de dégager progressivement des sujets de recherche collaboratifs.

Le premier séminaire de l'exercice 2019-2020 a porté sur la position de la Constructibilité vis à vis des nombreuses méthodes de gestion de projets axées sur une quête de productivité. Le résultat de





cette journée a été la production d'une cartographie situant les différents efforts entrepris en ce sens par les professionnels et autorisant une visualisation des apports spécifiques de la Constructibilité. Les séminaires suivants prévus pour ce premier cycle portent sur le Lean production et l'Industrie 4.0. Une journée de synthèse permettra de préciser le travail suivant. Toutes les recensions de ces échanges devraient faire l'objet d'une parution dans la revue des « Annales du BTP ».

> Contact : **Christophe Gobin**
gobin@orange.fr

3 OCTOBRE 2019 Journée Eco SD à l'ESTP Paris

Pour marquer l'adhésion de l'IRC à EcoSD qui réunit chercheurs et industriels autour de l'écoconception l'ESTP Paris a accueilli le colloque annuel de ce réseau sur le campus de Cachan. Le thème retenu en 2019 a concerné le traitement économique des impacts environnementaux. La question posée est celle de savoir s'il faut les « monétariser » ou les « monétiser ». Dans le premier cas il s'agit de donner une valeur monétaire à chacun d'entre eux. Dans le second l'idée est de les inclure dans la chaîne de valeur des projets sans avoir à leur donner un équivalent monétaire. L'IRC, tenant de la monétisation, a présenté la « démarche performancielle » spécifique

au BTP qui permet de fixer un niveau à atteindre (modélisation ACV) tout en étant une condition obligatoire d'accès au marché. Ce seul fait de les évaluer scientifiquement leur donne une valeur marchande sans rentrer dans une querelle d'expert sur le calcul monétaire. Les premiers contrats de performance énergétique (GPE) en sont une préfiguration mais encore restreinte à une seule dimension. Ce colloque a réuni une cinquantaine de participants et a été l'occasion d'échanges très riches sur la dimension économique que peut avoir la recherche en écoconception. Les actes du séminaire seront publiés aux Presses des Mines.

> Contact : **Christophe Gobin**
gobin@orange.fr

16 OCTOBRE 2019 Séminaire IRC « le numérique au service de la route »

Organisé par une équipe pluridisciplinaire de l'IRC rassemblant géomaticiens et chercheurs dans le domaine des matériaux de chaussées, ce séminaire replace la route au cœur des réflexions. Élément incontournable du monde de la construction, elle fait partie de notre patrimoine et interagit avec d'autres éléments constructifs ; c'est un réseau évolutif, structurant et connectant les territoires avec des enjeux d'aménagement, de mobilité, environnementaux,

sociétaux ou encore de gouvernance. Tout au long de son cycle de vie, différents acteurs de différents secteurs interviennent avec des rôles et des attentes diverses. La prise en compte de son environnement est essentielle pour pouvoir la concevoir avec les bons choix constructifs mais aussi pour bien la gérer. Collecter des données, les échanger, les faire évoluer est donc capital pour le ou les gestionnaires. Le numérique dans le domaine routier est pour cela un véritable enjeu et une opportunité pour optimiser sa gestion complexe au quotidien. Pour répondre à ces enjeux, ce séminaire d'une soixantaine de participants a réuni d'une part différents acteurs intervenant plus ou moins directement sur la voirie, avec des rôles, besoins et approches différents et d'autre part des professionnels développant des moyens numériques potentiels visant à améliorer la gestion de cette voirie à différents niveaux. Les acteurs de la route ont exposé leurs pratiques actuelles et en cours d'évolution (ONR, Observatoire National de la Route, démarche BIM d'une collectivité et développement des PCRS, plan de corps de rues simplifié). Des entreprises opérationnelles intervenant à différents niveaux sur la voirie (conception/entretien ; conception/fabrication de matériels de mise en œuvre ou d'entretien ; service sur les réseaux humides avec installation, maintenance ou réparation de canalisation...) ont présenté

leurs développements actuels (approche BIM, instrumentation de matériels, outils de communication autour des travaux). Des dispositifs allant de la collecte d'informations à l'exploitation de l'information liée à la route ont été exposés tels que des capteurs spécifiques, des outils d'auscultations, des applications smartphone pour la gestion de chantiers. Enfin Antonin Pavard, doctorant de l'équipe de recherche pluridisciplinaire de l'IRC, a exposé la démarche suivie par l'équipe, notamment dans le cadre de sa thèse débutée en octobre 2017. Le séminaire a mis en avant la difficulté liée au changement des habitudes de travail avec ces outils numériques. Il a également souligné l'apport non négligeable de ces outils, bien que le sujet de l'appartenance des données reste pour tous un sujet sensible.

La table ronde a fait ressortir des préoccupations opérationnelles et scientifiques communes telle que la collecte, les échanges et la gestion de données pour une optimisation de l'entretien des voiries en milieu urbain dans une démarche de Constructibilité.

Intervenants: Tristan Hirel (IDRRIM), Jean-Claude Bajou (Département du Val-de-Marne), Pierre Nguyen Trong (GRDF), Charles Edouard Tolmer (Eurovia), Frank Vedrines (BOMAG Groupe FAYAT), Benoît Brossard (SECMAIR Groupe FAYAT), David Demonceaux et Maxime Lasnier (VEOLIA Eau Île-de-France), Cécile Villette

(AltaRoad), Julie Maignol (NextRoad), David Vauthrin (Finalcad) et Antonin Pavard (ESTP-Paris, IRC).

> Contacts : **Anne Dony**
adony@estp-paris.eu

Patricia Bordin
patricia.bordin@geospective.fr

8 NOVEMBRE 2019

Séminaire IRC « La transformation numérique dans la construction »

Le séminaire sur la transition numérique dans la construction a apporté un éclairage pragmatique sur l'avancement de l'apport du numérique dans le monde de la construction, à l'échelle matériau et à l'échelle structure, notamment sur l'interopérabilité des systèmes connectés sous 2 thématiques :

- l'apport des capteurs et l'instrumentation d'ouvrage de Génie Civil
- la transition digitale et numérique dans l'acte de construire (Smart construction) et l'avenir de la construction

Parmi les problématiques soulevées au cours de ce séminaire, la fiabilité des capteurs, les contraintes de mise en œuvre et l'exploitation des mesures (cas des capteurs noyés dans le béton). Ce sujet, peu traité, permettra d'aborder une thématique inter-disciplinaire à fort potentiel de recherche applicatif.

> Contact : **Alaoui Mellal**
amellal@estp-paris.eu



Les publications dans des journaux à comité de lecture 2019

MATÉRIAUX CONSTRUCTIFS

- Bouchenafa, O., Hamzaoui, R., Bennabi, A., Colin, J., « PCA effect on structure of fly ashes and slag obtained by mechanosynthesis. Applications : Mechanical performance of substituted paste (CEMI+ 50% slag /or fly ashes) » *Construction and Building Materials*, vol.203, Issue 4, Pages 120-133
- Hamzaoui, R., Bouchenafa, O., Ben Maaouia, O., Guessasma, S., « Introduction of milled kaolinite obtained by mechanosynthesis to cement mixture for the production of mortar : Study of mechanical performance of modified mortar », *Powder Technology*, vol.355, issue Oct.2019, Pages 340-348
- Amri, S., Akkiche, M., Bennabi, A., Hamzaoui, R., « Geotechnical and mineralogical properties of treated clayey soil with dune sand », *African Earth Sciences*
- Jeong, J., Chuta, E., Ramezani, H., « Reactive transport numerical modeling of mortar carbonation : Atmospheric and accelerated carbonation », *Journal of Building Engineering (Elsevier)*, volume 23, Pages 351-368
- Jeong, J., Chuta, E., Ramézani, H., Guillot, S. « Rheological properties for fresh cement paste from colloidal

suspension to the three-element Kelvin-Voigt model », *Rheologica Acta (Springer)*, Pages 1-15

- Dony, A., Godard, E., Koutiri, I., Pouteau, B., Millien, A., Ollier, S., « Caractérisation des interfaces des couches d'enrobés bitumineux- Première évaluation du prototype », *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, 963, Pages 14-17
- Dony, A., Pouget, S., Beghin, A., Quigniot, S., Faucon-Dumont, S., Poirier, J-E., « Maniabilité des enrobés : vers une harmonisation des méthodes de mesure ? », *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, 968, Pages 50-52
- Dony, A., Pouget, S., Nicolai, A., Faucon-Dumont, S., Poirier, J-E., Sauzeat, C., Decamps, J-A., Baudoin, S., « Multirecyclage des enrobés- Application de la méthode de formulation des enrobés », *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, 968, Pages 41-49

OUVRAGES DURABLES

- Labbé, P., « Should we go ahead with the response spectrum ? », *Pure and Applied Geophysics*, 177, Pages 2411-2420
- Kteich, Z., Labbé, P., Javelaud, E., Semblat, J-F., Bennabi, A., « Extended equivalent linear model

(X-ELM) to assess liquefaction triggering : Application to the City of Urayasu during the 2011 Tohoku earthquake », *Soils & Foundations*, 59 (3), Pages 750-763

SYSTÈMES URBAINS

- Gobin, C., « Le marquage d'un projet : gage d'une réelle confiance », *Technique de l'ingénieur*, 10 avril 2019
- Bretagnolle, A., Guérois, M., Pavard, A., « European small cities and towns : a territorial contextualization of vulnerable demographic situations (1981-2011) », *La Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 2019/4, Pages 443-471
- Bretagnolle, A., Guérois, M., Pavard, A., Gourdon, P., Zdanowska, N., « Following the population of European urban areas in the last half century (1961-2011) : the TRADEVE database », *Cybergeo*, 891/2019
- Gourdon, P., Bretagnolle, A., Guérois, M., Pavard, A., « Des petites villes davantage touchées par la décroissance ? Comparaison des trajectoires démographiques à l'échelle européenne (1961-2011) », *Belgeo*, mars 2019
- Bretagnolle, A., Guérois, M., Pavard, A., Gourdon, P., Zdanowska, N., « A harmonized database to follow the demographic trajectories of European cities, the TRADEVE database (Demographic Trajectories of European Cities) » *Cybergeo*, 892/2019
- Eslahi, M., El Meouche, R., and Ruas, A., « Using building types and demographic data to improve our understanding and use of urban sprawl simulation », *Proc. Int. Cartogr. Assoc.*, 2, 28, 2019
- Ziv, N., Kindinis, A., Simon, J., Gobin, C., « Application of systems engineering for development of multifunctional metro systems : Case study on the fifth metro line of the Lyon metro, France », *Underground Space*, 14 octobre 2019
- Salameh et al., « Monitoring Beach Topography and Nearshore Bathymetry Using Spaceborne Remote Sensing : A Review », *Remote sensing*, 11(19)
- Abadie et al., « La Palma landslide tsunami : computation of the tsunami source with a calibrated multi-fluid Navier-Stokes model and wave impact assessment with propagation models of different types », *NHESS*, juillet 2019
- Deleflie, F., Briand, C., Doerksen, K., Sammuneh, M-A., Sagnières, L., « Atmospheric Density Variations and Orbit Perturbations in Relation to Isolated Solar X-flare Events. », *European Geophysical Union*, Avril 2019

Les contributions à des conférences 2019

MATÉRIAUX CONSTRUCTIFS

- Jeong, J., Colin, J., « Mise au point d'une formulation de premix BFUP pour construction additive », Dixite
- Lahjiri, F., « Étude de l'impact Physico-Chimique des liants dits « régénérants » sur la Constructibilité (Performance et durabilité) des enrobés recyclés », Journées Techniques Route, Nantes, France
- Lahjiri, F., Gazeau, S., Delfosse, F., Dony, A., Ziyani, L., Mouillet, V., Henn, F., « Towards a better assessment of recycling agents effects on bitumen during hot recycling », 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment, International Society for Asphalt Pavements, 11th - 13th September 2019, Padua, Italy
- Bouchenafa, O., Hamzaoui, R., Bennabi, A., Colin, J., « Manufacturing equivalent Clinker by indirect mechanosynthesis process », ILCCC2019, 1st International conference on Innovations in low-carbon cement & concrete technology, London, United Kingdom
- Jeong, J., Schmitt, L., « Carbon dioxide binding ability in concretes: methodology and modeling », CO2STO2019, 24-26 juin 2019, Marne-la-Vallée, France

- Colin, J., Jeong, J., Izoret, L., « Experimental study of accelerated carbonation including NO2 and SO2 on recycled concrete aggregates », CO2STO2019, 24-26 juin 2019, Marne-la-Vallée, France
- Lahjiri, F., Delfosse, F., Dony, A., Gazeau, S., Ziyani, L., Decamps, J.-A., Mouillet, V., Henn, F., « Towards a better assessment of recycling agents effects on bitumen and asphalt mix during hot recycling », 56th Annual Petersen Asphalt Research Conference, July 2019, Albuquerque, USA
- Colin, J., Jeong, J., Izoret, L., « Aptitude de granulats recyclés au stockage de CO2 : essais de carbonatation à base de gaz multi-constituant, CO2, SO2 et NOx », Journée « Le béton recyclé, un puits de carbone ? », Les avancées du Projet National FastCarb, FFB Paris, France
- Maachou, Y., Poupardin, A., Bennabi, A., « Improvement of soils erodibility characterization in the erosion function apparatus by using the particle image velocimetry », IAHR 2019, 1-6 sept. 2019, Panama city, Panama

OUVRAGES DURABLES

- Contrada, F., « L'apport de la Constructibilité au pré-design : évaluation et support au choix des solutions techniques », Journées Jeunes Chercheurs IMDR, Paris, France
- Labbé, P., Sopranzi, U., « PSHA testing against historical seismicity across the border between France and Italy », ICOLD-EWG (Int. Committee on Large Dams-European Working Group), Dams and earthquakes, 6-8 mai 2019, Lisbon, Portugal
- Labbé, P., Nguyen, A., « Input motion transfer by linearization technique for seismic qualification of dam equipment », ICOLD-EWG (Int. Committee on Large Dams-European Working Group), Dams and earthquakes, 6-8 mai 2019, Lisbon, Portugal
- Kteich, Z., Labbé, P., Kham, M., Alves-Fernandes, V., Kolmayer, Ph., « Modified equivalent linear analysis of the Aratozawa dam subjected to the 2008 Miyagi earthquake », ICOLD annual meeting, 9-14 juin 2019, Ottawa, Canada
- Claude, F., « La recherche intervention en sciences de gestion, un cadre intégrateur pour les démarches de recherche et développement de conception innovante en gestion des risques ? », Rencontre Inter-GTR 2019, 27 juin 2019, France
- Contrada, F., Kindinis, A., Caron, J.F., Gobin, C., « An early-design stage assessment method based on constructibility for building performance evaluation », IAQVEC 2019, 5-7 sept. 2019, Bari, Italy
- Pelle, M., Causone, F., Favoino, F., Contrada, F., Kindinis, A., « Evaluation of Post Processing Analysis to determine Optimal Thermo-Optical Properties for Adaptive Glazing Systems with Quick Adaptation Speed », BS2019, 2-4 sept. 2019, Rome, Italy
- Stabile, A., Labbé, P., « Analysis of Pine Flat Dam considering Fluid-Soil-Structure Interaction and a linear-equivalent model », ICOLD Benchmark Workshop Numerical Analysis of Dams, 9-11 sept. 2019, Milan, Italy
- Labbé, P., « Pour une ingénierie sismique sans spectres de réponse », 11^e Colloque National AFPS, 24-27 sept. 2019, Strasbourg, France
- Stabile, A., Labbé, P., « Analyse sismique non-linéaire du barrage poids de Pine Flat par linéarisation équivalente avec prise en compte de l'interaction sol-fluide-structure », 11^e Colloque National AFPS, 24-27 sept. 2019, Strasbourg, France



Les contributions à des conférences 2019



- Labbé, P., El Moumni, S., Nguyen, A., « Etude statistique du glissement sous séisme des barrage-poids », 11^e Colloque National AFPS, 24-27 sept. 2019, Strasbourg, France
- Kteich, Z., Labbé, P., Kham, M., Alves Fernandes, V., Kolmayer Ph., « Méthode linéaire équivalente étendue (X-ELM) : influence de la modélisation de l'amortissement sur la réponse sismique 2D du barrage d'Aratozawa », 11^e Colloque National AFPS, 24-27 sept. 2019, Strasbourg, France
- Thing Leo, G., Claude, F., « Product and Services Development in a Digital World », 9^e CSD&M, Complex Systems Design Et Management, Paris, France

SYSTÈMES URBAINS

- Karam, G., Parison, S., Bobée, C., Berthe, A., Bordin, P., Hendel, M., Royon, L., « The OASIS Project : UHI Mitigation Strategies Applied to Parisian Schoolyards », in 5th International Conference on Coutermeasures to Urban Heat Islands (IC2UHI) International Institute of Information Technology, Hyderabad, India
- Parison, S., Bobée, C., Berthe, A., Bordin, P., Hendel, M., Royon, L., « Developing a GIS Tool for Emergency Urban Cooling in Case of Heat-Waves », in 5th International Conference on Coutermeasures to Urban Heat Islands (IC2UHI) International Institute of Information Technology, Hyderabad, India
- Hendel, M., Bobée, C., Berthe, A., Parison, S., Bordin, P., Royon, L., « Developing a GIS Tool for Emergency Urban Cooling in Case of Heat-Waves », in Special Issue Actes ICUC10 Et 14th Symposium on Urban Environment, New York, USA
- Pavard, A., Bordin, P., Dony, A., « Pour des données sur les matériaux dans les bases de données spatiales de voiries urbaines », INFRA 2019, 2-4 décembre 2019, Montreal, Canada
- Gobin, C., « La fabrication additive : le catalyseur d'une industrialisation de la construction. », Dixite
- Pavard, A., « Interaction entre Voirie et réseaux enterrés - Constructibilité à l'interface entre route et réseaux enterrés », Journée technique Route (IFSTTAR, CEREMA IDRRIM), Nantes, France
- Pavard, A., « Échanges avec des professionnels (route / résilience/territoire) veille technologique et scientifique sur la résilience (route/territoire) » Biennale des territoires, Montrouge, France
- Eslahi, M., El Meouche, R., « BIM and Contribution to IFC-Bridge Development: Application on Raymond Barre », Springer Communications in Computer and Information Science/EURASIAN BIM FORUM, Istanbul, Turkey



LES STAGES DE RECHERCHE



Liste des stages Master en 2019

- Elaboration poudres géopolymères : confection et caractérisation.
- Projet ANR MOVEDVDC : évaluation des propriétés physico-chimiques et rhéologiques de liants bitumineux vieilliss artificiellement en laboratoire et extraits de chantiers routiers.
- Glissement d'un barrage sous séisme, problème de Newmark.
- Développement d'une maquette spatiale urbaine 3D.
- Experimental issues in outdoor thermal measurements on building envelope components.
- Influence du Set-up de houle dans le phénomène combiné du franchissement-submersion.
- Intégration de la Méthode 5 S dans les laboratoires de l'IRC-ESTP Paris.
- Développement de matériaux imprimables par fabrication additive. Caractérisation de leurs performances mécaniques.
- Analyse de la co-présence entre voirie routière et réseaux de distribution à partir de la construction d'un jeu de données spatiales.
- Caractérisation de l'érosion de surface sur un érodimètre EFA.
- Contribution à l'adaptation de solutions constructives pour limiter l'érosion des sédiments autour des piles d'ouvrages.
- Étude du Spectre transféré au travers du barrage mobile dont le comportement est supposé être non-linéaire par la méthode de linéarisation équivalente.
- Étude de la compatibilité des émulsions de bitume sur des matériaux granulaires neufs et recyclés.
- Caractérisation physico-chimique, rhéologique et évolution dans le temps de liants bitumineux issus de matériaux recyclés de la route et de produits d'étanchéité - Modélisation pour la prédiction du comportement mécanique du matériau final avec recyclés.
- Caractérisation de la réponse sismique d'un ouvrage en béton armé par méthode linéaire équivalente appliquée à un calcul spectral.
- Modélisation par la méthode des éléments discrets du comportement de sols hétérogènes soumis à l'érosion interne par suffision.
- Traitement d'un sol argileux à l'aide d'un géopolymère à base de cendres volantes.
- Étude expérimentale sur le parement en béton « coloré » préfabriqué : conception et fabrication.
- Étude expérimentale sur la carbonatation du gaz multi-composant.
- Développement d'un modèle géo spatial urbain 3D.
- Definition of an experimental room for the carcterization of facade elements and microclimatic conditions of the internal space.
- Utilisation des capteurs dans le domaine du génie civil.
- Simulation moléculaire sur la capacité d'observation de CO² dans le calcium silicate.

Liste des PIER encadrés par l'IRC en 2019

- Reconfiguration d'un graphique « Galite » de la SNCF.
- Construire une ville pour tous : repenser l'inclusion des personnes en situation de handicap.
- L'ingénieur du futur : Universal Design Thinking (innovation et accessibilité universelle).
- Les objets connectés : une gestion améliorée des réseaux dans l'habitat. Développement des Smart Cities.
- Développement durable, accessibilité et société.
- L'architecture dans le cinéma. Le cinéma dans l'architecture.
- Étude et réalisation d'un chariot tracteur à énergie solaire pour avion de tourisme.
- Les micro-énergies durables dans le secteur des sites historiques de l'Unesco. Application au site gréco-romain d'Appolonia (Albanie).
- Application du processus ICS (Intégration Conception et Soutien) à une étude comparative « coût/rendement » d'une usine de production d'enrobés bitumineux.
- Visite virtuelle des Campus de l'ESTP Paris.
- Paris JO 2024 - Comment traiter les nœuds de circulation avec les nouvelles technologies de mobilité ?
- Influence des contraintes de roulement sur le rendement des panneaux photovoltaïques pour les routes solaires.
- Les villes du futur : l'inclusion et l'accessibilité vues par la Sci-Fi.
- Recyclage à fort taux des matériaux de chaussées : qualification de la diffusion d'additifs « régénérants » dans le bitume.
- Géopolymérisation à base de Métakaolin élaborée par mécanosynthèse.
- Système d'informations géolocalisé d'aide à la décision pour le risque industriel.
- Développement direction train arrière camion pour maquette 1/14^e.
- Estimation du champ de pression induit par la houle sur une digue à talus en PVC pour réaliser un couplage entre les codes d'hydraulique et le BIM.



Liste des PIER encadrés par l'IRC en 2019



- Conception et réalisation d'un modèle physique à échelle réduite pour simuler des études d'inondation en zone urbaine.
- Modélisation numérique du transport sédimentaire par charriage : application de la méthode des différences finies.
- Adaptation et amélioration des performances d'une imprimante 3D existante.
- Matériaux cimentaires connectés
- Étude et réalisation d'une boucle à verrouillage de phase (PLL).
- Réalisation d'une maquette d'un micro-grid.
- Modélisation énergétique d'un quartier urbain.
- Théorie de VESELAGO, ses applications dans les BTP : utopie ou réalité ?
- Mobilité douce dans Paris : quelles solutions ?
- Quelles nouvelles technologies pour la mobilité dans le développement des villes méditerranéennes ? Application à la ville côtière de Fier sur la côte Adriatique.
- Le bois transparent : une solution consistante avec la Transition Énergétique ?
- Shape Memory Alloy.
- Béton et Biodiversité.
- Programmation de machines industrielles.
- Étude et réalisation d'un robot industriel pour déplacement de palettes.
- Développement mécanique pour orienter un panneau solaire.
- Valorisation des bétons décoratifs dans le mobilier de jardin.
- Béton connecté.
- Visite virtuelle du chantier « Tour Trinity » (La Défense).
- Matières grises : échiquier en béton connecté.
- État des lieux des réseaux d'eau potable en Île-de-France et exploration des techniques existantes pour leur réhabilitation.
- Recherche de solutions pour limiter l'action de la houle sur une digue à talus poreuse : utilisation d'un réseau de capteurs à ultrason pour quantifier l'atténuation de la houle.
- UNIVERT : création d'une machine à désherber les surfaces.
- Optimisation d'une grue de chantier.
- Pistes affectées sur la Seine destinées aux petites embarcations
- Création d'une brouette de chantier asservie
- Développement d'une brique ou béton recréant une réaction de photosynthèse
- Vente d'une entreprise familiale et fusion avec autre société familiale.
- Alimentation électrique à haute disponibilité d'un bâtiment industriel.
- Développement d'un process ou un outil permettant le contrôle et l'exploitation des informations produites par les maquettes numériques dans des projets menés en BIM.
- Calcul du glissement sismique d'un barrage-poids.

Note : Le détail des projets PIER est consultable dans le Rapport Annuel d'Innovation 2018-2019.



Septembre 2020

Direction de la Communication ESTP Paris

Groupe éditorial IRC :

Abdelkrim Bennabi, Éric Croquesel, Claire Damblans,
Alaoui Mellal

Coordination et conception graphique :

xavier.jacobi@orange.fr

Crédits photographiques :

Adobe Stock ; iStock ; ESTP Paris ; 123 RF
Eikon, Antoine Duhamel Photography, Isabelle Morison, Agathe Deusy



INSTITUT DE RECHERCHE DE CONSTRUCTIBILITÉ

28, avenue du Président Wilson
94234 Cachan Cedex

Secrétariat IRC

Tél. : + 33 (0)1 49 08 03 20

✉ irc@estp-paris.eu

Directeur IRC

Éric Croquesel

✉ ecroquesel@estp-paris.eu

www.estp.fr

