



Construction Agile,

Responsable,

Et 4.0

FORMATION

TFE : Développement de l'ACV en terrassement : Application à un chantier naval ATLAS 07

Construction RA4.0 : Recyclage du béton dans le béton

Plateforme expérimentale : Le LASSI

STAGES & PROJETS

Stage : Intégration des fibres d'acétate de cellulose dans une matrice cimentaire en substitution partielle du sable

Le Projet LICORNE : Liquefaction and Cyclic Mobility Representation on Numerical Experiments

PROJETS D'INITIATION À LA RECHERCHE

PRI : Effet de l'ajout de l'huile usée de moteur dans la formulation des matériaux cimentaires sur leur comportement mécanique et de durabilité



L'ESI 1³, l'incubateur de la smart construction

**Accompagner
les jeunes start-ups
dans leur développement**



L'AVENIR DU BTP SE CONSTRUIT ICI



EDITO

La nouvelle version de notre panorama de presse hors-série Recherche, dorénavant intitulé « TC Mag' Recherche », s'articule autour de 3 parties : la Formation, les Stages et Projets de Recherche, et les Projets d'Initiation à la Recherche. Ces rubriques sont toutes en lien avec les 3 thématiques de notre Laboratoire de Recherche : Construction Responsable, Construction Agile et Construction 4.0, qui ont pour but de préparer nos ingénieurs diplômés de l'ESITC Paris aux problématiques environnementales, à l'intégration de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies au sein de leurs réalisations.

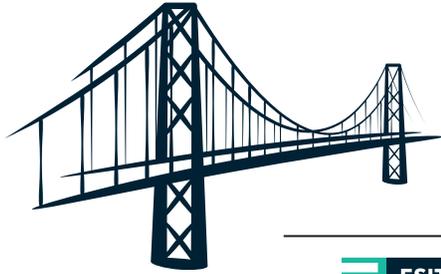
Dans la rubrique **Formation**, vous découvrirez des articles sur des Travaux de Fin d'Etudes rédigés par des **étudiants de 5^{ème} année**, un résumé sur la première conférence mise en place avec l'ESITC de Metz, le 5 octobre dernier, ainsi que le programme des conférences à venir. Enfin, vous est proposée la présentation de l'une des plateformes expérimentales de l'ESITC Paris, le LASSi.

Dans la rubrique **Stages et Projets de Recherche**, nos rédacteurs vous proposent 3 sujets de stages de Master 2 ainsi que 2 projets de recherche auxquels participent nos enseignants-chercheurs : les projets FRESH-ECOPAVERS et LICORNE.

Enfin, dans la rubrique **Projets d'Initiation à la Recherche**, nous vous parlons de 3 types de projets ayant eu lieu l'année précédente, parmi lesquels nous distinguons :

- Les Projets d'Initiation à la Recherche, proposés aux **étudiants de 2^{ème} année** qui consistent en la rédaction d'un article à partir d'un ou deux articles de vulgarisation et d'une recherche bibliographique. Ils sont proposés par nos enseignants-chercheurs.
- Les Projets d'Expériences Scientifiques de Recherche mettant **les étudiants et les apprentis de 3^{ème} année** "dans la peau" d'un doctorant l'espace de quelques jours. Les sujets peuvent être fournis par les enseignants-chercheurs de l'école mais aussi par des partenaires.
- Les Projets de Recherche et d'Innovation, comprenant un travail de recherche bibliographique et une mise en application des nouvelles connaissances acquises. Ces projets sont proposés aux **étudiants et apprentis de 4^{ème} année**, aussi bien par nos enseignants-chercheurs, que par des laboratoires, des entreprises, ou des Start-ups (dont celles présentes au sein de notre incubateur ESI 1³).

Bonne découverte !



SOMMAIRE

FORMATION

TRAVAUX DE FIN D'ÉTUDES

Développement de l'ACV en terrassement : Application à un chantier naval ATLAS 07.....**6**

Entre prévisions et réalité... Analyse des données d'auscultation d'une gare du métro de Copenhague.....**8**

CONFÉRENCES RA4.0

Construction Responsable : Recyclage du béton dans le béton.....**9**

Prochaines Conférences**11**

PLATEFORME EXPÉRIMENTALE

Le LASSI : Laboratoire de dynamique des Sols, des Structures, et des Interactions.....**12**

STAGES & PROJETS

DE RECHERCHE

STAGES RECHERCHE

Intégration des fibres d'acétate de cellulose dans une matrice cimentaire en substitution partielle du sable.....**14**

Valorisation des déchets de polyuréthane dans un composite cimentaire.....**17**

The lifetime distribution of a structure subjected to sequential earthquakes.....**20**

PROJETS DE RECHERCHE

Le Projet LICORNE : Liquefaction and Cyclique Mobility Representation on Numerical Experiments.....**22**

Projet FRESH-ECOPAVERS : Avantages environnementaux des pavés perméables.....**24**

PROJETS D'INITIATION

À LA RECHERCHE

PROJETS D'INITIATION À LA RECHERCHE DES 2^{ÈME} ANNÉE

#1 - Chantiers du futur : Quelles en seront les grandes caractéristiques ?.....**26**

#2 - Des matériaux capables d'améliorer la sécurité incendie dans les bâtiments.....**26**

#3 - Îlot de chaleur urbaine.....**26**

#4 - Techniques et matériaux innovants pour l'isolation acoustique.....**27**

PROJETS DE RECHERCHE ET D'INNOVATION (PRI)

Effet de l'ajout de l'huile usée de moteur dans la formulation des matériaux cimentaires sur leur comportement mécanique et de durabilité.....**28**

EXPÉRIENCES SCIENTIFIQUES DE RECHERCHE

Quand l'empreinte CO₂ conditionne l'adaptation au sol d'un projet de construction sur une friche industrielle.....**30**



TRAVAUX DE FIN D'ÉTUDES

Développement de l'ACV¹ en terrassement : Application à un chantier naval ATLAS 07

Diminuer l'impact environnemental, gagner en qualité et en productivité, telles sont les promesses de la réutilisation des terres. Dans un contexte d'innovation en matière d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) des matériaux et de prise en compte de l'impact écologique et sociétal par les entreprises, le sujet de la réutilisation des matériaux est devenu un levier de réussite pour les projets de terrassement.

PROBLÉMATIQUE

Mon travail de fin d'études portait sur la valorisation, l'optimisation et la réutilisation des matériaux excavés pour la réalisation de l'ascenseur à méga-yacht pour le chantier naval de La Ciotat (ATLAS 07 - Figures 1 et 2). La problématique était fondée sur deux piliers : Géotechnique et Organisationnel. Le cœur du problème était d'évaluer à partir du projet ATLAS 07 la qualité de réutilisation des matériaux excavés et de mesurer leurs performances par des indicateurs.

STRATÉGIE DE RÉUTILISATION DES MATÉRIAUX

Pour explorer le sujet et connaître les perspectives d'amélioration, il a tout d'abord fallu analyser la stratégie actuelle de réutilisation des matériaux, tant au niveau de mon étude de cas que pour d'autres projets. La définition d'une méthode de suivi terrassement m'a permis de faire émerger la complexité et l'intérêt du sujet. Les livrables du programme de recherche intitulé TerDOUEST m'ont permis d'examiner mon projet à la lumière des connaissances

acquises en France. Ce programme, soutenu par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR), s'est déroulé de 2008 à 2012. Piloté par l'IFSTTAR (aujourd'hui l'UGE), TerDOUEST s'est intéressé à l'impact environnemental des terrassements.

L'ACV des matériaux est la méthode la plus pertinente pour évaluer les performances environnementales à condition de l'associer au triptyque du développement durable. En effet, en phase travaux, il est indispensable de développer une vision macroscopique des sujets techniques de terrassement. La première étape consiste à aborder les solutions d'un point de vue géotechnique pour étudier la faisabilité. Ensuite, au niveau de la gestion chantier durant ma période sur le projet ATLAS 07, l'utilisation d'un éco-comparateur m'a permis de mesurer l'impact environnemental des solutions de terrassement.



Figure 1 : Projet de construction global intégré dans le site existant (ATLAS 07)

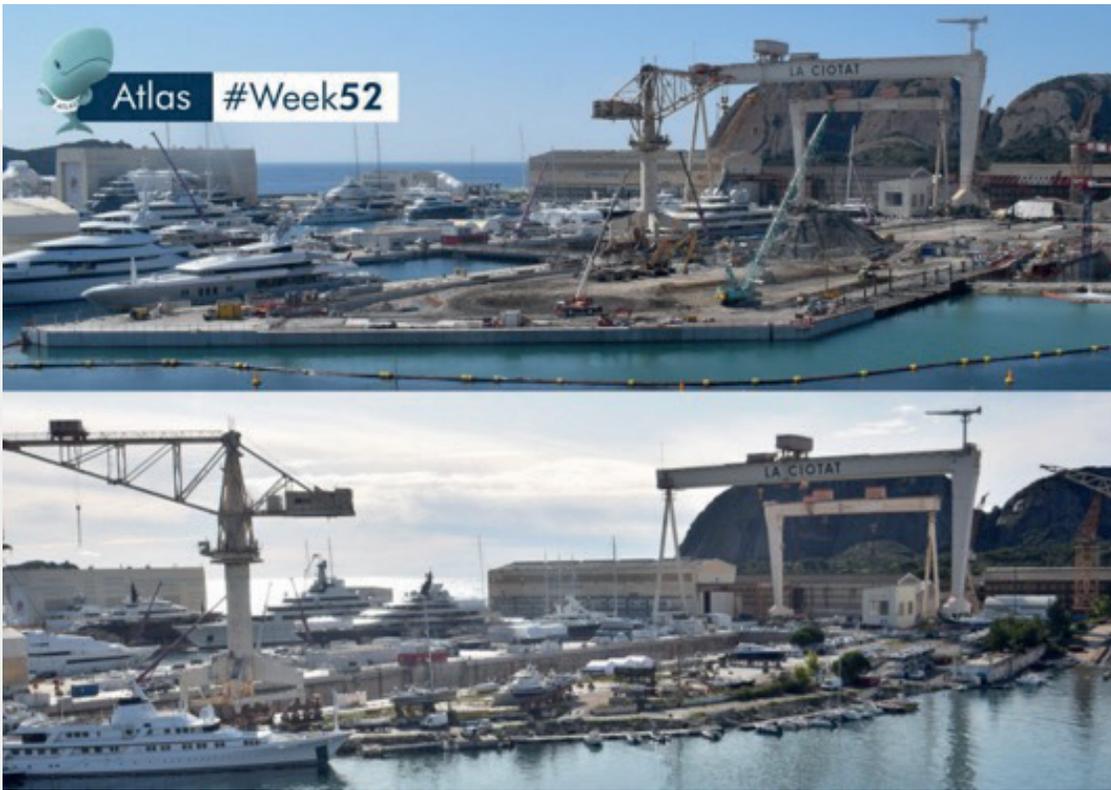


Figure 2 : Comparaison photographique de la différence du chantier en 1 an - Crédit : Communication LCS©

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION

Enfin, la plus-value de mon sujet est de proposer le **développement d'un outil d'aide à la prise de décision en phase chantier** fondé sur des indicateurs d'impacts issus d'un éco-comparateur terrassement. Cet outil identifie les contraintes principales du chantier (gestion de la place, budget, planning, qualité de l'eau, bilan carbone). Ainsi, chaque atelier de terrassement peut interroger, pour identifier la meilleure réponse en termes d'efficacité économique, de gestion sociale équitable et d'impact environnemental limité. L'outil se lit à partir de seuils de contraintes estimés pour chaque paramètre et permet d'identifier par élimination la solution la plus pertinente. Cet outil se veut simple mais ancré dans une démarche d'innovation.

PERSPECTIVES

Le sujet traité est vaste et mériterait un approfondissement (réalisation d'une phase de test de l'outil mis en place sur chantier avec retours d'expérience par exemple). A l'avenir, la mise en place d'un « incubateur de chantier », espace-temps dédié au développement d'idées innovantes permettrait de faire émerger ce type de réponse aux défis de la construction responsable.

Baptiste Mékari, étudiant de 5^{ème} année 2020-21, en stage chez Vinci Construction Terrassement

1 - ACV : Analyse du Cycle de Vie

2 - TerDOUEST : Acronyme de Terrassement Durable - Ouvrages En Sols Traités, il s'agit d'un programme de recherche ANR. *Pour en savoir plus* : Yasmina Boussafir, TerDOUEST - Un programme de recherche ANR pour améliorer les connaissances dans le traitement des sols, GEORAIL 2011 - Symposium International Géotechnique ferroviaire, May 2011, PARIS, France. pp 187-194. ffh1-01205523

TRAVAUX DE FIN D'ÉTUDES (SUITE)

Entre prévisions et réalité...

Analyse des données d'auscultation d'une gare du métro de Copenhague



Le projet de prolongation de la ligne M4 du métro de Copenhague conduit à la réalisation de cinq nouvelles stations souterraines, deux puits de ventilation, ainsi qu'un double tunnel de liaison mesurant près de 5,5 kilomètres de long hors-gares.

Les études de conception se sont déroulées entre début 2018 et mi 2019. Aujourd'hui, les travaux sont bien avancés ; la partie excavation provisoire étant entièrement réalisée. Afin d'anticiper les déformations des gares souterraines lors de leur construction, d'assurer la sécurité des équipes travaux et d'observer l'éventuel impact du creusement du tunnel sur les constructions environnantes, un programme d'auscultation a été mis en place.

LES GARES

Les dimensions des gares atteignent les 65 mètres de long, 20 mètres de large et 22

mètres de profondeur. Elles ont été excavées à l'aide d'un soutènement provisoire en pieux sécants maintenus par butons, bracons et tirants d'ancrage.

L'INSTRUMENTATION

Des capteurs placés sur certains éléments de la structure ont enregistré (de façon automatique dans notre cas) les mesures en temps réel de déformations et contraintes afin de les comparer avec les prédictions de calculs.

Sur chacune des gares, l'auscultation se composait :

- **D'inclinomètres** pour enregistrer les valeurs de déformations de la paroi en pieux sécants ;
- **De jauges de déformation** :
 - Sur les butons et bracons afin de connaître la contrainte qui s'applique sur ces éléments,
 - Sur les tirants d'ancrage pour obtenir les contraintes appliquées,
- **De piézomètres** servant à relever les niveaux d'eau de la nappe.

DÉMARCHE ET CONSTATATIONS

Dans un premier temps du stage, les données d'auscultation ont été triées et analysées pour être ensuite comparées avec les données obtenues par le bureau d'études en 2018.

Des écarts de valeurs ont alors été observés :

- Sur les déformations en tête des pieux : celles calculées lors des études de conception étaient plus importantes que celles obtenues sur chantier.
- Sur les déformations lors des excavations successives : les pieux sécants ne s'ancraient pas dans les couches de calcaire comme prévu.
- Sur les efforts relevés dans les butons : mettant en évidence une sollicitation des butons moins importante que prévue.

Dans un second temps, après observation et identification des écarts (non dommageables à la structure), on a recherché leur origine. Ce travail de recherche a été long puisqu'il a consisté à émettre des hypothèses et à les appliquer ensuite aux modèles de calculs des soutènements (notamment avec les logiciels Plaxis 2D – éléments finis – et KRéa – méthode aux coefficients de réaction).

RETOUR D'EXPÉRIENCE

Le stage s'est clôturé par la rédaction d'un Retour d'Expérience (REX) pour répertorier les points importants rencontrés lors du chantier afin d'en faire profiter les futurs chantiers et transmettre les recherches effectuées aux autres collaborateurs de l'entreprise.

Mélanie Hosti, étudiante de 5^{ème} année 2020-21,
en stage chez Vinci Construction Grands Projets



CONFÉRENCES RA4.0

Le 05.10.21 - Construction Responsable : Recyclage du béton dans le béton



Le 5 octobre 2021, une conférence sur le recyclage du béton dans le béton a été présentée par Amor Ben Fraj, responsable adjoint de l'équipe de recherche « DIMA : Durabilité, Innovation et valorisation des Matériaux Alternatifs » au Cerema.

RÉSUMÉ

Les conséquences du changement climatique sur notre vie sont bien visibles. Aussi, que nous soyons scientifiques, chefs d'entreprises ou ingénieurs, nous nous devons tous d'agir pour diminuer l'impact du dioxyde de carbone (CO₂) sur notre planète.

I- CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

Dans le secteur de la construction, on observe aujourd'hui une émergence des enjeux liés à l'environnement et au développement durable, notamment à cause des émissions importantes de CO₂ et de l'épuisement des ressources naturelles de la planète. Il est donc nécessaire de développer un modèle d'économie circulaire reposant sur le principe de la boucle suivante : produire, utiliser, réutiliser. Cela introduit le principe des 3R « Réduire – Réutiliser – Recycler », ayant pour but de fabriquer en produisant un minimum de déchets tout en trouvant une autre fonction aux objets déjà produits et aux matériaux déjà utilisés.

CONFÉRENCES RA4.0 (SUITE)

Le secteur de la construction produit chaque année 1 billion de tonnes de déchets en Europe, ce qui représente 1/3 du total des déchets produits. La directive européenne 2008/98/CE a donc fixé un objectif de valorisation des déchets à 70% en 2020 et la loi TECV en France encourage la réduction de l'utilisation des ressources naturelles et la valorisation de nos déchets.

En France, en 2010, nous avons utilisé plus de 380 millions de tonnes de granulats en comptant les importations. Il n'y a pas suffisamment de granulats sur le territoire national pour répondre à la demande et construire nos édifices.

II- CONTEXTE NORMATIF

Afin de classer les granulats, nous utilisons les normes NF EN 13369 et NF EN 206/CN. Il en existe 3 types :

- Les granulats récupérés par **lavage du béton frais** ;
- Les granulats récupérés par **concassage du béton qui n'a pas été utilisé en construction**
- Les granulats recyclés, issus de la **transformation des matériaux de déconstruction**.

III- LES BÉTONS À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS

Le béton est séparé des aciers puis tamisé afin de récupérer les granulats recyclés. Ces derniers sont classés en plusieurs catégories selon leurs caractéristiques mécaniques et physiques. Ils peuvent provenir des travaux publics (GR1), des bétons ordinaires de bonne qualité (GR2), ou des bétons à hautes performances (GR3). Différentes études ont montré que les bétons recyclés sont moins résistants qu'initialement. Pour compenser cette baisse de résistance, il faut diminuer

l'eau efficace et augmenter le dosage en ciment. Plus le béton initial est de bonne qualité, moins il faut ajouter de ciment au mélange. C'est pourquoi le tri est la clé d'une valorisation réussie car il représente un gage de qualité des granulats recyclés.

IV- QUEL INTÉRÊT ENVIRONNEMENTAL POUR LES BÉTONS ISSUS DE GRANULATS RECYCLÉS?

Après différentes analyses, les chercheurs se sont aperçus que les bétons conçus avec des granulats recyclés piègent du CO₂.

Si l'on ne prend pas en compte le CO₂ piégé dans le béton recyclé, la distance de rentabilité écologique est de 50 km. Il est donc plus écologique d'utiliser du béton avec des granulats naturels lorsque la distance d'acheminement des granulats est inférieure à 50 km mais plus écologique d'utiliser du béton avec des granulats recyclés lorsque la distance d'acheminement des granulats est supérieure à 50 km.

En revanche, si l'on prend en compte le CO₂ piégé dans le béton recyclé, utiliser du béton avec des granulats recyclés est toujours plus écologique que d'utiliser du béton avec des granulats naturels.

V- CONCLUSIONS

Le tri est la clé d'un recyclage réussi car les granulats recyclés issus de bétons de bonne qualité affectent moins les propriétés du béton. Également, en considérant le CO₂ capté par le béton recyclé, l'usage de béton avec des granulats recyclés baisse l'impact du béton sur le changement climatique et ce, quelle que soit la distance d'approvisionnement des granulats recyclés.

Jade Ravé,

étudiante de 4^{ème} année 2021-2022

PROCHAINES CONFÉRENCES

Le 02.11.21 - Construction Agile : L'armature en fibres de verre Schöck Combar, une alternative durable et économique à l'acier, en collaboration avec l'entreprise Schöck Combar - **à retrouver en replay sur notre chaîne Youtube** (<https://www.youtube.com/watch?v=dybCKBp9obA&t=3s>)

Le 07.12.21 - Construction 4.0 : Comment utiliser le BIM pour améliorer le management de la construction, en collaboration avec l'Université de Florence - **à l'ESITC Paris**

Le 04.01.22 - Construction Responsable : L'Analyse du Cycle de Vie dans les terrassements, en collaboration avec l'Université Gustave Eiffel - **à l'ESITC Paris**

Le 01.02.22 - Construction Agile : L'utilisation de Last Planner et de l'outillage BIM, en collaboration avec le Luxembourg Institute of Science and Technology - **à l'ESITC Metz**

Le 01.03.22 - Construction 4.0 : La logistique autour du chantier avec le Luxembourg Institute of Science and Technology - **à l'ESITC Metz**

Construction



Ces conférences peuvent être suivies en visio.
Inscription gratuite à : conference@esitc-paris.fr

Plus d'informations sur :
<https://innovation.esitc-paris.fr/conferences/>

PLATEFORME EXPÉRIMENTALE

Le LASSI :

Laboratoire de dynamique des Sols, des Structures, et des Interactions



Figure 1 : Appareil triaxial avec ses contrôleurs et des éprouvettes de sols sollicités jusqu'à la rupture

La plateforme expérimentale du LASSI couvre les essais de géotechnique et l'étude de l'interaction sol-structure.

L'ÉQUIPEMENT EN GÉOTECHNIQUE PERMET DE FAIRE DES ESSAIS :

- D'identification des sols, afin de les classifier ;
- De caractérisation mécanique dans l'objectif de dimensionner des écrans ou encore d'estimer les tassements par consolidation des sols fins ou encore de déterminer la teneur en eau optimum pour le compactage.

Certains de ces équipements ont pu être acquis grâce à l'Université Gustave Eiffel.

CETTE PLATEFORME EXPÉRIMENTALE EST MISE À DISPOSITION :

I-Des TP de géotechnique pour les étudiants de 2^{ème} année, avec la participation de la société Technosol :

- TP1. Echantillonnage
- TP2. Analyse granulométrique d'un sol fin par sédimentation
- TP3. La valeur au bleu de méthylène
- TP4. La teneur en eau et limites d'Atterberg (limites de plasticité et de liquidité)
- TP5. Les essais à l'appareil triaxial
- TP6. Les essais œdométriques
- TP7. Les essais Proctor

II-Des TP d'Interaction Sol-Structure dans le cadre du module ISS (Interaction Sol-structure) d'une semaine, dispensés en anglais aux étudiants et apprentis de 4^{ème} année.

III-D'autres TP de géotechnique d'essais *in situ*, réalisés par les étudiants et apprentis de 3^{ème} année à l'université Gustave Eiffel (équipe SRO¹ de GERS²) :

1- Sols, Roches et Ouvrages géotechniques.

2- Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre.

- **Des projets d'initiation à la recherche de 3^{ème} année** dont voici quelques exemples : « Les barrages en terre », « Etude numérique ou expérimentale de la vibration des structures », « Modélisation analytique de la propagation sismique 1D », « Quand l'empreinte CO₂ conditionne l'adaptation au sol d'un projet de construction sur une friche industrielle »³, etc.

- **Des projets d'initiation à la recherche de 4^{ème} année** comme « Capteurs de vibrations intégrés pour le Smart Buildings », « Modélisation numérique d'une fondation superficielle et étude de l'interaction sol-fondation-structure », « Le phénomène de la liquéfaction - entre étude expérimentale et numérique », « Effets des signaux sismiques sur la réponse du sol/de la structure : étude numérique », « Travaux en tranchée : détection de mouvements précoces et alerte », « Amplification et comportement sismique de dépôts argileux », « Influence des charges dynamiques sur les blindages et la stabilité des excavations », « Cape d'invisibilité sismique », etc.

- **De la Recherche** (cf. par exemple les articles de Rosy Al Chedraoui et Christina Khalil dans ce numéro).

Sabrina Perlo,
Directrice Formation Recherche



Figure 2 : Géodimètre



Figure 3 : Vibromètre laser

3- Faisant l'objet d'un article dans ce numéro.

STAGES RECHERCHE

Intégration des fibres d'acétate de cellulose dans une matrice cimentaire en substitution partielle du sable



Figure 1 : Analyse granulométrique des fibres d'acétate de cellulose

De nos jours, le secteur de la construction est responsable de la production de millions de tonnes de déchets et de l'émission d'une énorme quantité de dioxyde de carbone (CO_2) en raison de sa grande consommation d'énergie [1]. À cela, s'ajoute l'utilisation massive de matières premières qui pourraient bientôt arriver à épuisement [2].

Dans ce contexte, l'idée d'introduire des déchets (granulats recyclés, matériaux biosourcés non valorisés...) dans le processus de fabrication des bétons et mortiers s'est imposée comme une nécessité pour les chercheurs. En effet, ces derniers s'efforcent de trouver des alternatives plus vertes pour la production d'un béton à plus faible impact environnemental.

Dans cette étude, le matériau choisi est l'acétate de cellulose qui est un polymère obtenu après acétylation de la cellulose [3].

CARACTÉRISATION PHYSIQUE DE L'ACÉTATE DE CELLULOSE

La caractérisation physique de l'acétate de cellulose est effectuée selon les

recommandations de la RILEM [4]. Le séchage de cette matière est fait à une température de 60°C . Une faible teneur en eau initiale de 2% est mesurée. L'analyse granulométrique n'a pas pu être menée correctement car les particules se détachent très difficilement, elles sont enchevêtrées et occupent un volume important (Figure 1).

La cinétique d'absorption a montré un coefficient d'absorption initiale de 500,13 %. Ce taux augmente en fonction du temps pour atteindre 853,40 % après 48 h. En revanche, la vitesse d'absorption diminue en fonction du temps. En comparant ces résultats à ceux obtenus par différents auteurs sur des granulats biosourcés : Akkaoui [5] sur les granulats de bois (Absorption : 240 %), Page [6] sur les fibres de lin (Absorption : 130 %) et Magniont [7] sur le chanvre (Absorption : 158 %), l'acétate de cellulose semble avoir le taux d'absorption le plus élevé.

En ce qui concerne les masses volumiques et la porosité, les masses volumiques apparentes, avec et sans compactage, ont été déterminées expérimentalement. Les valeurs obtenues sont respectivement de $38,62 \text{ kg/m}^3$ et de $65,43 \text{ kg/m}^3$. La valeur de la porosité, ensuite déduite, est de $94 \pm 2 \%$. Une masse volumique absolue de $1425,9 \pm 0,0024 \text{ kg/m}^3$ est déterminée par le pycnomètre à Hélium, ce qui conduit à une valeur de porosité de 97,3 %. Les particules d'acétate de cellulose sont donc très poreuses. Une conductivité thermique de $0,033 \pm 0,001 \text{ W/(m.K)}$ a été mesurée grâce à un dispositif Hot Disk. Le tracé de la conductivité thermique en

fonction de la masse volumique apparente de différents matériaux d'isolation se trouvant dans la littérature [8] permet d'indiquer que l'acétate de cellulose peut être considéré comme un bon isolant thermique.

FORMULATION ET FABRICATION

Dans cette étude, le sable présent dans le mortier conventionnel a été substitué par des fibres d'acétate de cellulose. Après plusieurs essais préliminaires, quatre mélanges ont été retenus : un mortier normalisé qui a servi de référence pour les taux de remplacement du sable par l'acétate de cellulose de 0,2 %, 1,3 % et 8 %. Pour celui de 0,2 %, l'acétate de cellulose a été mélangé avec l'eau qu'elle absorbe (taux d'absorption 500 %). Pour le taux de remplacement de 1,3 %, l'eau non absorbée a été associée à du superplastifiant (3 % de la masse du ciment). Pour ces deux premiers taux, le rapport E/C est de 0,5. Pour le taux de remplacement de 8 %, l'eau absorbée par l'acétate de cellulose a été ajoutée aboutissant à un rapport E/C de 1,7. Pour chaque taux de remplacement, 12 éprouvettes sont fabriquées au total.

CARACTÉRISATION DES MÉLANGES

a) Ouvrabilité

Pour les taux de remplacement de 0,2 % et 1,3 %, l'ouvrabilité est similaire à la référence avec un rapport E/C constant. Pour le taux de remplacement de 8 %, un manque de cohésion est clairement observé malgré l'eau ajoutée (rapport E/C = 1,7), le cône¹ ne tient pas et s'effondre directement. Une quantité importante d'eau est absorbée par l'acétate

de cellulose.

b) Propriétés mécaniques

Les résistances augmentent en fonction du temps. Cependant, les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation du taux de remplacement du sable par l'acétate de cellulose à 7 et à 28 jours. Les résistances les plus faibles sont observées pour le taux de remplacement de 8 % dont les résistances, en comparant avec celle du mortier de référence, ont énormément diminuées (de plus de 90 % en compression et en flexion). Néanmoins, l'acétate de cellulose joue le rôle de fibres en atténuant la fissuration : destruction moins brutale des éprouvettes.

Pour les autres taux de remplacement (0,2 et 1,3 %), des résistances légèrement plus faibles que celles du mortier témoin sont observées. La masse volumique des mortiers diminue entre 7 et 28 jours en raison de la cure du béton et de l'hydratation du ciment.

c) Retrait

Pour tous les taux de remplacement, le retrait augmente, peu pour les faibles taux de remplacement (entre -500 et -1000 $\mu\text{m}/\text{m}$), mais d'une façon remarquable pour le taux de remplacement de 8 % pour atteindre -5400 $\mu\text{m}/\text{m}$. La plus importante variation s'est déroulée pendant les deux premières semaines en raison de l'évaporation de l'eau. Au bout de 2 semaines, le retrait devient presque constant.

d) Propriétés thermiques

La conductivité thermique diminue progressivement avec l'augmentation du taux de remplacement pour atteindre

1- NF EN 12350-2 : Essais pour béton frais – Partie 2 : Essai d'affaissement, juin 2019.

STAGES RECHERCHE (SUITE)

une valeur de 0,3 W/(m.k) pour le taux de remplacement de 8 %.

Cette diminution pourrait s'expliquer par le rôle joué par l'acétate de cellulose, en raison, d'une part, de sa grande porosité et, d'autre part, de sa conductivité thermique très faible (similaire à celle des isolants thermiques).

CONCLUSION

Ce travail de recherche a permis d'accroître nos connaissances sur les propriétés d'un matériau recyclé dans le domaine de la construction.

Il a été mis en évidence une absorption très élevée des fibres d'acétate de cellulose arrivant à 853,4 %, ainsi qu'une porosité très élevée (supérieure à 90 %). D'un autre côté, l'acétate de cellulose est un matériau très léger ayant une faible masse volumique et se présentant comme un bon isolant thermique. L'augmentation du taux de remplacement des granulats par l'acétate de cellulose s'accompagne d'une diminution importante des résistances mécaniques. La conductivité thermique, quant à elle, est fortement influencée par la quantité de granulats biosourcés substituant les granulats naturels.

Il serait intéressant de poursuivre cette recherche, d'une part, en étudiant la porosité des mortiers fabriqués et, d'autre part, en trouvant une relation entre les essais mécaniques et la porosité.



Joe Tannous, stagiaire de l'ESITC Paris en Master 2, stage co-encadré par Mme Thouraya Salem du LE³-ESITC Paris¹ et M. Othman Omikrine Metalssi de l'Université G. Eiffel

1 - Laboratoire Eco-matériaux, Eau et Environnement de l'ESITC Paris

Références :

[1] Aujollet Y., Douard P., Girardot P., et Legait B., "Les filières de recyclage de déchets en France métropolitaine," Rapport à Madame la ministre de la Transition écologique et solidaire, France, Janvier 2020.

[2] Deodonne K., "Etudes des caractéristiques physico-chimiques de bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental," Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, France, 2017.

[3] Schützenberger P., "Action de l'acide acétique anhydre sur la cellulose, l'amidon, les sucres, la mannite et ses congénères, les glucosides et certaines matières colorantes végétales," Compte Rendu, France, 1865.

[4] Amziane S., Collet F., Lawrence M., Magniont C., Picandet V., et Sonebi M., "Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterization testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity," Article du Journal "Materials and structures", Juin 2017.

[5] Akkaoui A., "Bétons de granulats de bois : Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles," Thèse de doctorat de l'Université PARIS-EST, France, Juin 2015.

[6] Page J., "Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée," Thèse de doctorat de Normandie Université, France, Février 2018.

[7] Magniont C., "Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources," Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III-Paul Sabatier, France, 2010.

[8] « Guide des matériaux isolant » Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), Rapport, Auvergne, France.

Valorisation des déchets de polyuréthane dans un composite cimentaire



Figure 1 : Polyuréthane en granulés (PUG)

Le béton est le composite cimentaire le plus couramment utilisé dans le domaine de la construction. Ce secteur, particulièrement en Europe, a connu ces dernières années une croissance remarquable. Cette augmentation d'activité s'accompagne d'un accroissement proportionnel des besoins en matières premières (ciment, granulats, acier, ...).

En France, de plus en plus de carrières sont classées comme sites protégés, ce qui rend difficile la production de la quantité de granulats nécessaire. L'importation, quant à elle, devient de plus en plus insuffisante [1]. La seconde problématique est l'émission du dioxyde de carbone (CO_2) car la production de ciment en émet 564 kg par tonne, contribuant directement, et à grande échelle, à la pollution de l'environnement [2].

Afin de contrer ces difficultés, plusieurs investigations sont menées visant à éviter l'épuisement des matières premières, à développer de nouveaux matériaux de construction à faible impact environnemental et à favoriser l'économie circulaire, modèle dans lequel le déchet de l'un devient la matière première de l'autre.

Pour répondre à ces problématiques, cette étude cherche à valoriser les déchets de polyuréthane (PU) en les recyclant dans un mortier en substitution du sable. En effet, la production du PU est de 3 millions de tonnes par an dont la moitié sont des déchets n'ayant, ni un processus de recyclage adapté, ni une valorisation appliquée [3].

CARACTÉRISATION DU PU

Le PU de cette étude, qui se présente sous forme de granulés (PUG) cylindriques (Figure 1), est issu du recyclage de produits frigorifiques [4].

Les essais de caractérisation du PU réalisés sont :

- La granulométrie (la taille des granulés est supérieure à 5 mm) ;
- L'évaluation de la masse volumique (617 Kg/m^3), du coefficient d'absorption d'eau (82 %) et de la teneur en eau (1.92 %) ;
- La cinétique d'absorption d'eau, qui n'a fourni que des résultats hétérogènes et non significatifs en raison de la présence d'impuretés constitués de plastique et métal.

FORMULATION ET FABRICATION DU MORTIER

Cette étude a pris pour référence un mortier normalisé ayant un $E/C^1 = 0.5$. Après plusieurs formulations, le taux de substitution adopté est de 5 % de PUG afin de respecter certaines caractéristiques minimales, dont

1- Rapport entre le poids d'eau de gâchage et le poids du ciment d'un béton.

STAGES RECHERCHE (SUITE)

la résistance mécanique et l'ouvrabilité qui ont finalement conduit à un ajout de 1,5 % de superplastifiant (SP).

La fabrication du mortier est conforme à la norme NF EN 196-1¹. Après démoulage, les éprouvettes prismatiques (4 x 4 x 16) sont placées dans l'eau maintenue à 20°C ± 1°C pour la cure², jusqu'au moment des essais.

CARACTÉRISATION DU MORTIER FABRIQUÉ

1- A l'état frais

a. Masse volumique et air occlus

La formulation fabriquée présente une diminution de la masse volumique de 6 % par rapport au mortier de référence et une augmentation de l'air occlus de 13 %. Ces résultats s'expliquent par la faible masse volumique des PUG, et par son aspect poreux favorisant le piégeage de l'air.

b. Affaissement au mini-cône

Le superplastifiant (SP) permet d'améliorer l'ouvrabilité du mortier entraînant une augmentation de l'affaissement au mini cône (NF EN 12350-2³) de 3 cm à 6 cm (Figure 2). Cette valeur est proche de l'affaissement de

référence visée (4 cm).

2- A l'état durci

a. Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques, en flexion et en compression, ont été mesurées à 1, 2, 7 et 28 jours pour les éprouvettes du mortier de référence et pour celles comportant des PUG.

Les résultats de la résistance en flexion montrent une diminution de 30 % par rapport à celle de référence au bout de 28 jours. D'autre part, la résistance en compression à 28 jours diminue de 42 % par rapport au mortier de référence. La porosité des PUG a diminué la résistance mécanique en créant plus de pores (vides) dans les éprouvettes.

b. Retrait

Le but de cet essai (NF P 18-427⁴) est de suivre la variation de la longueur des éprouvettes dans le temps. Les mesures ont été réalisées à 1, 3, 7, 14, 21, et 28 jours. Le retrait à 1 jour pour la formulation contenant les PUG est presque le double de celui du mortier de référence, en raison de l'évaporation de l'eau (retrait de dessiccation) due à l'importante porosité des granulés des PU favorisant cette dernière. Après 24h, le retrait se stabilise plus.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1- NF EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments. Partie 1 : détermination des résistances, septembre 2016.

2- La cure permet de protéger le mortier de sa dessiccation, de façon à ce que l'eau dans le mortier puisse hydrater l'ensemble des grains de ciment, assurant ainsi sa résistance mécanique optimale après durcissement.

3- NF EN 12350-2 : Essais pour béton frais – Partie 2 : Essai d'affaissement, juin 2019.

4- NF P 18-427 : Béton – Détermination des variations dimensionnelle entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci, décembre 1996.

Il est techniquement possible de valoriser les déchets industriels de PU pour la fabrication des mortiers écologiques. Afin de compléter l'étude et d'approfondir la compréhension des phénomènes engendrés par l'incorporation des PU, de nouvelles études devront être réalisées.

En parallèle, de nouveaux protocoles de recyclages dans le but d'améliorer les caractéristiques et l'homogénéité du PU devraient pouvoir conduire à un pourcentage d'incorporation plus important.

Par la suite, des essais de conductivité thermique et de durabilité viendront compléter la caractérisation du nouveau mortier, puis enfin passer du matériau mortier à celui du béton afin de viser une application dans la construction.

Danah Shehadeh, stagiaire en Master 2, stage co-encadré par Mme Thouraya Salem du LE³-ESITC Paris ⁵ et Mme Céline Florence de l'IRC⁶-ESTP

5 - Laboratoire Eco-matériaux, Eau et Environnement de l'ESITC Paris

6 - Institut de Recherche en Constructibilité, département Recherche de l'ESTP Paris



Figure 2 : Affaissement avant l'ajout de superplastifiant



Figure 3 : Affaissement après l'ajout de superplastifiant

Références :

- [1] Laneyrie, C., Beaucour, A. L., Green, M. F., Hebert, R. L., Ledesert, B., & Noumowe, A. (2016). Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 111, 368–378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.056>.
- [2] Costa, F. N., & Ribeiro, D. v. (2020). Reduction in CO2 emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW). *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123302>.
- [3] Mounanga, P., Gbongbon, W., Poullain, P., & Turcry, P. (2008). Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement and Concrete Composites*, 30(9), 806–814. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.007>.
- [4] Deng, Y., Dewil, R., Appels, L., Ansart, R., Baeyens, J., & Kang, Q. (2021). Reviewing the thermo-chemical recycling of waste polyurethane foam. *Journal of Environmental Management*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111527>.



STAGES RECHERCHE (SUITE)

The lifetime distribution of a structure subjected to sequential earthquakes

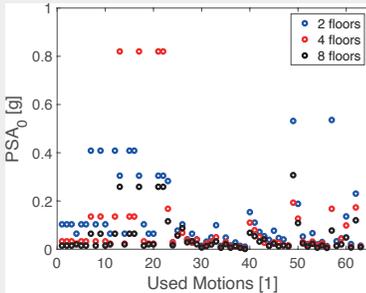


Figure 1: The peak spectral acceleration $PSA_{0.0}$ of the studied buildings

In engineering practice, a given structure is designed to resist independent single earthquakes. The Performance-Based Earthquake Engineering is commonly used to study the seismic response of the structure. However, during its typical working life, the structure is not only subjected to environmental events (e.g. fire, snow) or interior events (e.g. degradation of materials, corrosion), but also to multiple seismic events that can produce an evolution of its damage during time. In this context, a large number of earthquakes database is needed, that can be extracted from historical real database (e.g. PEER, Kik-net). In addition, artificial or synthetic databases generated from ground motion models (e.g. stochastic method, composite source method), and compatible with the hazard analysis of the studied region, are considered as an alternative to the real database.

SEISMIC PERFORMANCE OF STRUCTURE UNDER SEQUENTIAL EVENTS

The objective of this work is to study the seismic performance of different types of structures under a single and sequential events. For this purpose, three buildings, differing in their number of floors (2, 4 and 8 floors), were studied. In addition, the various ground motions are divided into real and synthetic motions. The real motions are extracted from the PEER database, whereas the synthetic motions are generated from the synthetic ground motion model of Rezaeian [1]. The selected site for this purpose is located in Mygdonia, Greece. The reference to the fully probabilistic hazard analysis in this study is based on the work of Aristizábal [2]. In total, 63 earthquakes are used in this study. The work was conducted with the help of the open source code OpenSees that is based on the finite element method. For the sake of brevity only, one example earthquake motion will be analyzed in this brief note.

STUDIED BUILDING

The studied buildings have the same floorplan and are symmetrical in length (X direction). In addition, same reinforcement and cross section properties of beams and columns were considered for the three building types. As for the boundary conditions, the three building are simply supported at the base. The column and beam dimensions used in this study are typical frame element defined as a rectangular section, the height and width is 60cm \times 30cm for the columns, 60cm \times 40cm

for the beams. As for the material properties, they are chosen as 28 MPa for the concrete compressive strength and 25000 MPa for the steel modulus. The fundamental periods of the three buildings are respectively $T_{2f} = 0.57$ s, $T_{4f} = 0.93$ s and $T_{8f} = 1.42$ s. The peak spectral acceleration PSA_0 for all the used motions is shown in Figure 1.

As mentioned previously and for the sake of brevity only, one example motion will be analyzed. It is shown in Figure 2 in the form of an acceleration time history. The analysis during this study evaluated the maximum displacements at the buildings roof, the inter-story drift ratios and the capacity curve. The response of the example motion is shown in Figures 3 and 4.

CONCLUSION

Taking into consideration all the tested motions, this work validated that even if the buildings are subjected to the same dynamic load, each geometry behaves differently. In addition, when the building is high, its response tends to be non-linear. As for the sequential analysis, the results show that the drop of frequency of the tested buildings did not reach 40%, which means that the concerned buildings were able to resist a limited number of sequences.

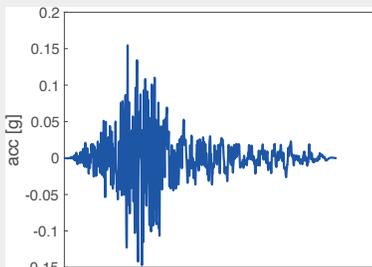


Figure 2: Example of the earthquake motion

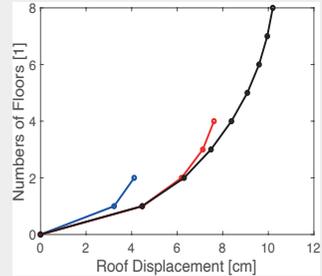


Figure 3: Displacement of the three tested buildings for the example motion

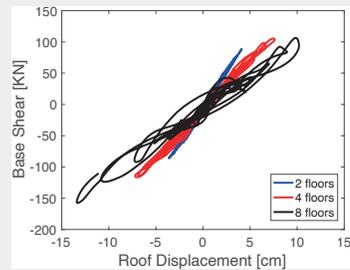


Figure 4: Capacity curve of the three tested buildings for the example motion

Rosy Al Chedraoui, stagiaire en Master 2, stage co-encadré par Mme Christina Khalil du LASSI-ESITC Paris et M. Fernando Lopez-Caballero de CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, France

Références :

- [1] Rezaeian, S. and Der Kiureghian, A. (2012). Simulation of orthogonal horizontal ground motion components for specified earthquake and site characteristics. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(2):335-353.
- [2] Aristizábal, C., Bard, P.-Y., Beauval, C., and Gómez, J. (2018). Integration of site effects into probabilistic seismic hazard assessment (PSHA): A comparison between two fully probabilistic methods on the euroseistest site. *Geosciences*, 8(8):285.

PROJETS DE RECHERCHE

Le Projet LICORNE : Liquefaction and Cyclique Mobility Representation on Numerical Experiments



Figure 1 : Exemples de conséquences dues au phénomène de liquéfaction du sol

Le phénomène de Liquéfaction du sol est depuis longtemps un sujet d'intérêt majeure pour la recherche. Il est défini comme la perte de résistance d'un sol soumis à des contraintes de cisaillement engendrant l'augmentation de la pression interstitielle (pression de l'eau). Ce phénomène (Figure.1) apparaît suite à des mouvements sismiques généralement brutaux et temporaires.

Afin d'identifier et de caractériser le comportement du sol, des essais en laboratoire (e.g. appareil triaxial, œdomètre) ou *in situ* (e.g. CPT¹, SPT²) sont réalisés. En parallèle, afin de mieux comprendre le comportement non-linéaire du sol sous chargements cycliques, des modèles numériques associés à des modèles constitutifs du sol, accompagnent parfois ces essais.

Ainsi, l'un des objectifs du projet LICORNE est d'évaluer les incertitudes associées à la modélisation numérique de la liquéfaction du sol. Le travail consiste en la réalisation d'un banc d'essais de laboratoire virtuels. Pour cela, de nombreuses méthodes numériques basés sur différents modèles

constitutifs du sol sont testées et comparées à un cas canonique³, fourni par l'Ecole CentraleSupélec, issu de la thèse de Khalil [1].

Le projet est divisé en plusieurs parties :

- **Une étude avec des sols à comportement élastique** afin de comparer la réponse du sol obtenue par les différents modèles testés, dans le but de mieux préciser les entrées de chaque code et les calibrations possibles.
- **Une étude avec des sols à comportement non linéaire** nécessitant l'utilisation de vrais signaux sismiques, permettant l'identification du phénomène de liquéfaction dans la couche du sol.

1- Cone Penetration Test (pénétrömètre statique).

2- Standard Penetration Test (pénétrömètre dynamique).

3- Modèle générique à géométrie simplifié.

- **Une étude statistique** de tous les résultats et interprétations générales du projet.

Jusqu'à présent, dix équipes de Recherche volontaires (Cerema, Geoazur, Univ. G. Eiffel, EDF R&D, EDF TEGG, CEA, EAFIT, Fugro, Tractebel) participent au banc d'essais testant 10 codes de calcul. Les données référentes sont basées sur le code d'élément finis GEFDyn[2] et le modèle constitutif de sol de Hujeux dont la géométrie est une colonne de sol de 10 m de profondeur, constituée de deux types de sables (Figure 2).

Le comportement de ces sols est indiqué :

- Dans la Figure 3, avec la courbe du module de cisaillement $G/G^{\max} - \gamma$, mettant en évidence que le sable « Mat. 2 » est lâche et celui « Mat.1 » dense ;
- Dans la Figure 4 par la courbe de liquéfaction CSR - N (rapport des contraintes cycliques - nombre de cycle).

Les premiers résultats ont montré que la majorité des codes utilisés sont capables de modéliser un comportement du sol proche de celui du cas référent. Certains codes ont besoin de calibrations ou de paramètres supplémentaires, ce qui pourrait augmenter le nombre d'incertitudes à considérer dans la suite du projet.

Le projet LICORNE a commencé début 2020, mais en raison du contexte sanitaire, sa mise en place a pris du retard.

Christina Khalil, enseignante-chercheuse au LASSI-ESITC Paris, Fernando Lopez-Caballero de CentraleSupélec, Université Paris-Saclay et Julie Régnier du Cerema de Nice

Références :

[1] Khalil, C. (2021). Seismic analysis of a liquefiable soil foundation-embankment system: life cycle performance and mitigation. PhD thesis, Université Paris-Saclay.

[2] Aubry, D., Chouvet, D., Modaressi, A., and Modaressi, H. (1986). Gedynd: Logiciel d'analyse de comportement mécanique des sols par éléments finis avec prise en compte du couplage sol-eau-air. Manuel scientifique, Ecole Centrale Paris, LMSS-Mat.

[3] Hujeux, J. (1985). Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols. Génie parasismique, pages 287-302.

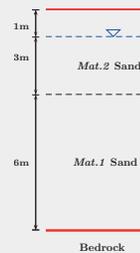


Figure 2 : La géométrie du cas canonique

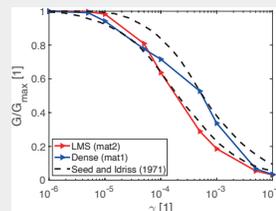


Figure 3 : La courbe du module de cisaillement

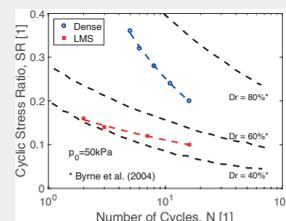


Figure 4 : La courbe de Liquéfaction CSR-N

PROJETS DE RECHERCHE (SUITE)

Projet Fresh-Ecopavers : Avantages environnementaux des pavés perméables

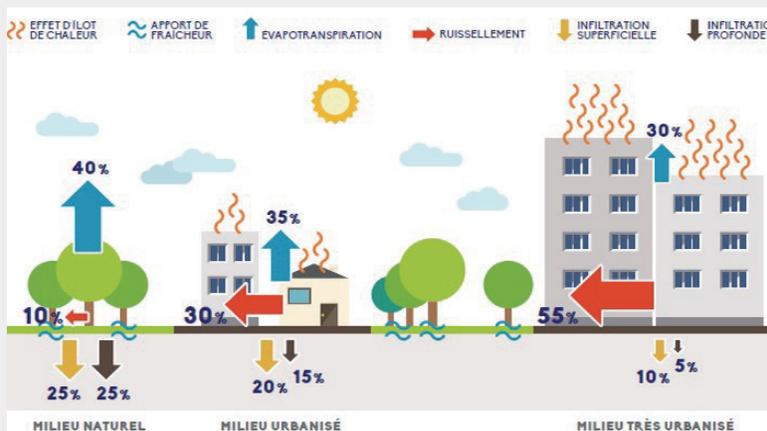


Figure 1. Impact de l'imperméabilisation des sols sur l'hydrologie du bassin versant [1]

L'imperméabilisation des sols en milieu urbain

Le développement des zones urbaines provoque des modifications du paysage, entre autres, par le remplacement des surfaces perméables et semi-perméables par des surfaces imperméables. Ces dernières ont un impact direct au niveau des échanges de chaleur entre les surfaces urbaines et l'air, et sur l'hydrologie du bassin versant (e.g. diminution de la capacité d'infiltration de l'eau, augmentation du ruissellement de surface, diminution de la recharge des eaux souterraines, diminution du taux d'évapotranspiration) (Figure 1). L'urbanisation affecte le microclimat et crée un environnement climatique urbain spécifique tel que les îlots de chaleur urbain (UHI) [2].

Les résultats d'une étude [3] de 20 ans ont

révélé une relation exponentielle positive significative entre la surface imperméable et la température de la surface de la terre. Ils ont indiqué qu'une augmentation de l'imperméabilité de 10 %, où la surface imperméable occupe déjà plus de 70 %, pourrait augmenter la température de la surface de la terre de plus de 3,3 °C.

Le changement climatique, la croissance de la population urbaine et l'expansion urbaine augmenteront probablement les températures dans les zones urbaines et rendront l'effet UHI plus important. En raison de l'urbanisation rapide, une augmentation des surfaces imperméables est attendue, en particulier des surfaces où les propriétés radiatives, thermiques et hydrauliques diffèrent considérablement celles de la roche, du sol ou encore de la végétation. Par conséquent, la mise en place de mesures appropriées pour améliorer le microclimat

urbain devient de plus en plus urgente [2].

Les pavés perméables

Les pavés perméables utilisés en milieu urbain peuvent contribuer à atténuer les effets de l'imperméabilisation des sols. Elles peuvent donc apporter divers avantages environnementaux tels que la réduction du ruissellement des eaux pluviales, la réduction du rejet de la pollution dans les eaux réceptrices, l'amélioration de la qualité de l'eau et la recharge des eaux souterraines. Outre ces avantages, les pavés perméables pourraient également être une solution efficace pour améliorer la température extérieure grâce au refroidissement par évaporation.

Le projet Fresh-Ecopavers

Le projet Fresh-Ecopavers est un projet cofinancé par l'ADEME, la Région Normandie et la Région Île-de-France regroupant 4 partenaires : l'ESITC Caen, l'ESITC Paris, l'Agence Parisienne du Climat et la ville d'Alençon.

Les pavés en béton drainant coquillé (éco-pavés) ont été développés à l'ESITC Caen en 2015.

Dans le cadre du projet Fresh-Ecopavers, les éco-pavés seront utilisés comme une solution potentielle pour améliorer le microclimat urbain.

Dans un chantier expérimental actuellement en cours de réalisation, situé en Normandie, les éco-pavés constitueront l'esplanade de la future halle sportive de Caen (Figure 2).

Grâce à leur perméabilité, les éco-pavés peuvent augmenter l'infiltration de l'eau et favoriser le refroidissement de l'air par

évaporation. Le chantier expérimental sera instrumenté afin d'étudier l'apport des éco-pavés sur la baisse de température de l'air et d'évaluer leur rôle dans la création des îlots de fraîcheur.

Svetlana Vujovic,
enseignante-chercheuse du LE³-ESITC Paris ¹

¹ - Laboratoire Eco-matériaux, Eau et Environnement de l'ESITC Paris

Référence :

[1] Est Ensemble, « Aménagement urbain, assainissement et gestion des eaux pluviales sur le territoire d'est ensemble : Prescriptions relatives à la conception à la réalisation et aux conditions de la remise d'ouvrages », 2016.

[2] Vujovic, S.; Haddad, B.; Karaky, H.; Sebaibi, N.; Boutouil, M. Urban Heat Island: Causes, Consequences, and Mitigation Measures with Emphasis on Reflective and Permeable Pavements. *CivilEng* 2021, 2, 459-484. <<https://doi.org/10.3390/civileng2020026>>

[3] Xu, H.; Lin, D.; Tang, F. The impact of impervious surface development on land surface temperature in a subtropical city: Xiamen, China. *Int. J. Climatol.* 2013, 33, 1873-1883.



Figure 2. Le chantier expérimental en Normandie

PROJETS D'INITIATION À LA RECHERCHE DES 2^{ÈME} ANNÉE

Objectif : à partir d'un ou de deux articles de vulgarisation, les étudiants écrivent un article en s'appuyant sur une recherche bibliographique, selon les cas, pour en introduire le sujet ou le(s) compléter. Ce travail est encadré par les enseignants-chercheurs de l'ESITC Paris. Quatre résumés ont été retenus sur le travail du second semestre de l'année scolaire 2020-2021.

#1 - Chantiers du futur : Quelles en seront les grandes caractéristiques?

Résumé : La France connaît une explosion démographique depuis ces dernières années. On estime qu'en 2050, plus de 72,3 millions de personnes seront logées dans des appartements collectifs. Une problématique émerge donc pour répondre aux besoins de cette population et construire intelligemment l'immeuble du futur.

Cet immeuble devra être écologique dans sa construction, dans sa destruction et dans les matériaux qui le constituent. Il devra comprendre des lieux partagés et modulables, permettant de réduire la surface des appartements. Enfin, celui-ci devra être « connecté » pour en faciliter l'accès avec, notamment la mise en place d'appareils domotiques et d'équipements intelligents. Il est très important d'intégrer les innovations aussi lors de la réalisation des chantiers, afin de soulager les compagnons (figure 1) [2] ou encore d'améliorer la sécurité [1].

Wandrille Ribiollet, Matteo Liguoro
et Anthony Porcuna

[1] Hasina R., Immeuble du futur, quelles en seront les grandes caractéristiques ?, BATIMAT, 26 août 2020 (<https://https://blog.batimat.com/immeuble-du-futur>) (consulté en mars 2021).

[2] Communauté de presse Colas, Colas lance le

déploiement des exosquelettes sur ses chantiers, 19 mars 2018, <https://www.colas.com/fr/presse-mediathèque/communiqués-de-presse/colas-lance-le-déploiement-des-exosquelettes-sur-ses-chantiers> (consulté en mars 2021)

Mots-clés : explosion démographique, immeuble du futur, écologique, connecté, appareils domotiques, durable, qualité.

#2 - Matériaux capables d'améliorer la sécurité incendie dans les bâtiments

Résumé : Cet article s'intéresse à l'utilisation du béton pour lutter contre le feu en traitant des réactions physiques et chimiques du béton durant un incendie. Il présente aussi ses limites, en particulier, ses capacités de recyclage. De plus, il donne des exemples de pistes innovantes pris pour lutter contre le feu tout en étant écologiquement viable sur le long terme. L'article explique ainsi comment mettre en place ces nouveaux matériaux afin d'améliorer la sécurité incendie dans les bâtiments et quels sont leurs avantages.

Maxime Roquain et Maxence Rodés

Mots-clés : sureté au feu ; viabilité écologique, agrégats, isolation thermique.

#3 - Îlot de chaleur urbaine

Résumé : L'apparition des îlots de chaleur urbains (ICU) est le fruit de nombreux facteurs dont principalement la morphologie urbaine et l'utilisation de matériaux à faible

albédo et présentant une porosité presque nulle. A ces facteurs s'ajoutent, la répartition des surfaces, qui ces dernières décennies, a provoqué une réduction des espaces verts dans les grandes villes, entraînant une augmentation des températures et notamment durant les périodes de canicule. De ce fait, le microclimat créé engendre différents problèmes en zone urbaine et ceux sur plusieurs points, notamment la biodiversité et la santé humaine. Afin de lutter contre ce problème, les pouvoirs publics ont cherché des solutions comme lutter contre l'émission de chaleur anthropique liée aux transports, grâce à une urbanisation mieux pensée ou à plus grande échelle par une meilleure distribution des surfaces.

Félicien Paulin, Clément Maintrot,
Gaëtan Marie et Clément Meunier

Mots-clés : zone urbaine, morphologie urbaine, albédo, porosité, stress thermique.

#4 - Techniques et matériaux innovants pour l'isolation acoustique

Résumé : La problématique de l'isolation acoustique est de plus en plus importante dans la société actuelle où écologie et confort de l'habitat ont une importance équivalente. Ainsi, l'isolation acoustique consiste à insonoriser l'habitation des bruits aériens, d'impacts mais aussi d'équipements. Pour y pallier, on peut s'appuyer sur la loi de masse et la loi masse ressort. Cette dernière est la plus utilisée.

De plus, en 2000, de nouvelles règles sont venues enrichir la Nouvelle Réglementation Acoustique (NRA) de 1996. Pour respecter ces nouvelles exigences, plusieurs matériaux peuvent être utilisés comme la laine de verre,

le liège ou encore la paille. Le coût phonique d'un logement peut énormément varier selon la technique, les produits et la main d'œuvre utilisés. Cependant, l'isolation par les fenêtres demeure la plus onéreuse [1].

En conclusion, l'isolation phonique est l'enjeu de notre génération. Il est donc important de l'intégrer dès la conception. Ainsi, au fil des années, des techniques et matériaux sont développés dans le but d'avoir une bonne qualité d'isolation à moindre coût.

Carla Biasutto, Manon Busin,
Romy Djender-Perrochon et Héléna Even

[1] R. Hasina, L'isolation phonique, un enjeu pour le confort des habitants d'un bâtiment, BATIMAT, 18/12/2020 (<https://blog.batimat.com/isolation-phonique>) (consulté en mars 2021)

Mots clés : isolation phonique, acoustique, logement, matériaux, techniques, conception, coût.



Figure 1 : Utilisation du râteau « cobotisé » ExoPush de Colas pour mettre en œuvre manuellement l'enrobé sur la chaussée

PROJETS DE RECHERCHE ET D'INNOVATION (PRI)

Effet de l'ajout de l'huile usée de moteur dans la formulation des matériaux cimentaires sur leur comportement mécanique et de durabilité

Actuellement, l'utilisation de matériaux usagés et potentiellement pollués tel que l'huile de moteur usagée dans la composition des bétons ou des mortiers a du sens pour répondre aux nouvelles exigences environnementales. En effet, le secteur de la construction est l'un des plus néfastes pour l'environnement. C'est pourquoi, depuis plusieurs décennies, des chercheurs travaillent sur l'incorporation de déchets dans la composition des bétons et des mortiers. L'objectif est double ; dans un premier temps, cela permettra de recycler les déchets industriels produits en grande quantité, diminuant ainsi leur impact négatif pour l'environnement. Le second objectif est d'améliorer les caractéristiques des bétons.

Dans un souci de facilité d'exécution, pour notre projet, nous avons choisi de nous concentrer sur les études liées à l'ajout d'huile de moteur usagée dans la composition des mortiers (le béton nécessitant davantage de matériaux).

Les études précédentes ont souvent cherché à comparer les effets de l'huile de moteur usagée avec ceux d'adjuvants industriels tels que les superplastifiants¹ et ont conduit à définir une quantité optimale d'ajout d'huile de moteur dans la composition des bétons et mortiers entre 0,15 % et 0,2 %.

Il ressort de notre étude bibliographique que l'huile de moteur usagée diminue fortement le

temps de prise des bétons, phénomène ne semblant pas se vérifier lors de notre étude sur les mortiers à 10 jours.

Selon notre étude bibliographique, pour les bétons constitués avec 100 % de ciment portland, la résistance à la compression des bétons comprenant de l'huile de moteur usagée diminuait, contrairement aux résultats que nous avons obtenu avec nos mortiers. En effet, nos essais de compression sont quasiment identiques à ceux du mortier de référence.

De plus, selon notre étude bibliographique, les bétons avec ajout d'huile de moteur usagée obtenaient des résultats aux essais d'affaissement et d'étalement comparables à ceux d'un béton avec ajout de superplastifiant, constatations non vérifiées avec nos mortiers, avec une efficacité 5 à 7 fois moindre.

À l'issue de ce travail, nous n'avons pas trouvé d'explications à ces différences. De nouvelles études s'imposent pour résoudre ce mystère...

Charlène Léal et Vincent Meaux, apprentis en 4^{ème} année 2020-2021, PRI co-encadré par M. Othman Omikrine-Metalssi de FM2D²/MAST³ de l'Université Gustave Eiffel et Mme Thouraya Salem du LE³-ESITC Paris⁴

2- Formulation, Microstructure, Modélisation et Durabilité des matériaux de construction

3- MATériaux et Structures

4- Laboratoire Eco-matériaux, Eau et Environnement de l'ESITC Paris

1- Ajout permettant d'améliorer la mise en œuvre



INTERVIEW PRI

Qu'avez-vous particulièrement apprécié dans la réalisation de ce projet ?

Nous avons particulièrement apprécié le fait de pouvoir aller dans un laboratoire de recherche au sein de l'Université Gustave Eiffel où nous avons rencontré des chercheurs avec qui nous avons pu échanger. Nous y avons rencontré notre tuteur et échangé avec des stagiaires et des doctorants.

Comment s'est organisé votre travail au cours de ce projet ?

Il a été très simple pour nous de nous organiser et nous avons progressivement trouvé notre rythme entre les points réguliers que nous avions avec notre tutrice école et notre tuteur à l'université.

Quels étaient pour vous les enjeux d'un tel projet ?

Ils étaient de pouvoir trouver des résultats concrets, d'apporter des réponses aux questions que beaucoup de gens peuvent se poser dans notre domaine. Comme, par exemple, comment réutiliser les déchets issus des matériaux que nous utilisons tous

les jours dans le BTP.

Quelle vision de la recherche aviez-vous avant la réalisation ce projet ?

Nous avions une vision de la recherche très floue. Nous imaginions des personnes dans un laboratoire, le cliché du chercheur qui cherche on ne sait quoi, sans jamais rien trouver de concret.

Et après ?

Notre vision est devenue bien plus concrète ! Nous avons réalisé que les résultats de ces recherches sont bien réels, et très utiles puisqu'ils peuvent être mis en application sur les chantiers.

Qu'auriez-vous envie de dire aux étudiants qui viendront après vous ?

Qu'ils doivent vraiment s'investir, interagir avec le plus de personnes possible, pour s'enrichir et apprendre un maximum de cette expérience.

Charlène Léal et Vincent Meaux

EXPÉRIENCES SCIENTIFIQUES DE RECHERCHE

Quand l'empreinte CO₂ conditionne l'adaptation au sol d'un projet de construction sur une friche industrielle



Dans le cadre de notre formation à l'ESITC Paris, nous avons eu la chance de réaliser un projet de recherche scientifique afin de découvrir cette branche d'activité et d'approfondir nos connaissances sur un sujet spécifique en lien avec la construction. Ce sujet nous a plu car il est en lien direct avec l'actualité et plus précisément avec le développement durable et les moyens permettant de limiter les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) d'un chantier. Aujourd'hui, nous constatons l'importance de ce sujet au travers, notamment du développement durable, de la construction bois ou encore de labels de construction environnementale (tel que le « BREEAM¹ »).

Notre projet consistait en la collecte d'informations au travers de plusieurs documents fournis, de nos connaissances et des différentes recherches que nous avons pu effectuer.

Ces informations nous ont permis de proposer un tableur permettant de comparer plusieurs méthodes de terrassement au regard des aspects budgétaires, de la durée des travaux et des émissions de CO₂. Les techniques que nous avons retenues sont les plus courantes actuellement (purge et compactage dynamique) mais d'autres techniques restent exploitables. Ces chiffres varient selon la surface et la profondeur du terrain à traiter.

La diffusion de ce travail s'est faite via le développement d'un site Internet².

Bastien Dallier, Clément Dary, Clément De La Fourchadière et Martin Dive, co-encadrés par Monsieur Brûlé de l'Entreprise Ménard et Mme Sabrina Perlo de l'ESITC Paris

1- BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) est une certification britannique créée en 1990 pour évaluer l'impact environnemental d'un bâtiment pour une architecture plus écologique.

2- <https://sites.google.com/view/esr-sujet-21/accueil-home?authuser=1>



Obtenir un diplôme
de
l'Enseignement Supérieur
par la
Validation des Acquis d'Expérience

Responsable V.A.E

Emmanuel Natchitz

@ : natchitz@esitc-paris.fr

☎ : 0181801515



79 Avenue Aristide Briand
CS80433
94234 ARCUEIL Cedex





ESITC PARIS
79 avenue Aristide Briand
94 110 Arcueil



✉ contact@esitc-paris.fr

☎ +33 (0)1 81 80 15 15

🌐 www.esitc-paris.fr

