

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

SPECIAL INNOVATIONS ET TRANSITIONS. GESTION DES DEBLAIS PAR QUICK SOIL ANALYSIS. AMENAGEMENT HYDROELECTRIQUE. MATELAS RENO. SEQUESTRATION DU CARBONE BLEU. LINASTER. CHAUSSEES RECYCLEES VEGETALES. RENFORCEMENT DE DIGUE ET RENATURATION DE LA LONE DU RHONE. ANALYSE SPATIALE DU RESEAU EXPRESS VELO LYONNAIS. INNOVATIONS ENVIRONNEMENTALES DANS LES FONDATIONS. LE PROJET "ROUTE DU FUTUR" I-STREET

N° 973 NOVEMBRE 2021



CHAUSSEES RECY-
CLEES VEGETALES :
LIANT BIOPHALT®
© EIFFAGE ROUTE



SANTÉ • PRÉVOYANCE • ASSURANCES • ÉPARGNE • RETRAITE • VACANCES

NOUS AVANÇONS SUR LA MÊME ROUTE QUE LES TRAVAUX PUBLICS

Nous connaissons bien votre métier et tous ses risques. Nous les couvrons avec des garanties adaptées pour mieux vous protéger, mieux vous assurer et vous soutenir en cas de besoin. Et comme nous faisons aussi partie de la famille du BTP, nous ferons toujours route commune.



PRO BTP
GROUPE
www.probtp.com

Directeur de la publication
Bruno Cavagné

Directeur délégué
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fnfp.fr

Comité de rédaction

Erica Calatozzo (Systra), Jean-Bernard Datry (Setec), Olivier de Vriendt (Spie Batignolles), Denis Etienne (Bouygues), Philippe Gotteland (Fnfp), Florent Imbert (Razel-Bec), Nicolas Law de Lauriston (Vinci), Romain Léonard (Demathieu Bard), Claude Le Quéré (Egis), Véronique Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage), Nastaran Vivian (Artelia), Michel Morgenthaler (Fnfp)

Ont collaboré à ce numéro

Rédaction
Monique Trancart (actualités),
Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente

Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copernic - 20 av. Edouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.fr

France (9 numéros) : 190 € TTC
International (9 numéros) : 240 €
Enseignants (9 numéros) : 75 €
Étudiants (9 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)

Publicité

Rive Média
10, rue du Progrès - 93100 Montreuil
Tél. : 01 41 63 10 30
www.rive-media.fr

Directeur de clientèle
Bertrand Cosson -
b.cosson@rive-media.fr
L.D. : 01 41 63 10 31

Site internet : www.revue-travaux.com

Édition déléguée

Com'1 évidence
2, chemin dit du Pressoir
Le Plessis
28350 Dampierre-sur-Avre
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.com

La revue Travaux s'attache, pour l'information de ses lecteurs, à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se réserve le droit de refuser toute insertion, jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux).

Ouvrage protégé ; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957, qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).

Éditions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
ISSN 0041-1906

LA FORCE D'UNE COMMUNAUTÉ DE RECHERCHE



© DR

La renommée d'excellence de la filière française des Travaux Publics est mondiale, et la présence des groupes français à l'international, entrepreneurs et ingénieristes, réputés pour leurs innovations, est permanente.

Cette compétitivité française est fondée sur une approche collective entre l'ensemble des acteurs de la filière. La structuration doit s'amplifier encore. Ainsi des Instituts dédiés à l'orchestration de ces démarches collaboratives, comme l'illustrent l'Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation en Génie Civil (IREX) depuis 1989, la Fondation d'Entreprise FEREC, créée en 2017, et plus récemment la création en 2019 du HUB Innov'Infra, regroupant les forces de quatre clusters régionaux et de l'IREX, démontrent toute leur efficacité.

Les enjeux actuels liés au réchauffement climatique et les opportunités importantes liées aux nouvelles capacités des outils numériques amènent les acteurs des Travaux Publics à envisager les innovations à l'aune de ces deux transitions majeures que sont la transition numérique et la transition écologique (incluant la transition énergétique).

Les travaux menés par la FNTP, avec Carbone 4 et Utopies, montrent ainsi que l'acte de construire les infrastructures représente 3,5 % des émissions de gaz à effet de serre de la France, en incluant les activités des entreprises et de leurs fournisseurs.

Afin d'être en ligne avec la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), la filière devra donc avancer de façon

volontariste vers la mise en œuvre des innovations récentes. Parmi ces innovations sont les évolutions sur les énergies des matériels TP et sur les moyens logistiques, ainsi que la mise en œuvre des matériaux bas carbone, comme les bétons et les aciers, ainsi que le recyclage de matériaux tels que les enrobés.

La transition numérique, avec la mise en œuvre rigoureuse et complète du BIM, du M pour *Modelling* au M pour *Management* (Building Information Management) sur la durée de vie de chacune des infrastructures, contribuera en tant que levier puissant de décarbonation de la profession. Parmi ces impacts des technologies numériques l'on peut citer le dimensionnement des ouvrages pour optimiser les émissions sur le cycle de vie de l'ouvrage, la programmation de la maintenance et le suivi au quotidien des ouvrages pour prévenir les dégradations majeures, mais également le partage des informations nécessaires en instantané. La mise en œuvre de ces solutions nécessitera beaucoup de travail normatif, comportemental et réglementaire. Chacun doit s'y engager.

Mais, quand bien même elles permettraient d'atteindre les objectifs de la France à l'horizon 2030, 40 % de réduction des émissions par rapport à 1990, ces solutions ne permettront pas d'atteindre la cible du zéro-émission de Gaz à Effet de Serre à l'horizon 2050. Pour cela, un travail important de recherche et d'innovation doit prendre le relais des solutions étudiées et en cours de mise en œuvre dans et par les entreprises de Travaux Publics.

Ce sont ces efforts que tous les acteurs de la filière, des maîtres d'ouvrage aux ingénieries et aux entreprises de la construction, en incluant les producteurs de matériaux, de matériels et d'équipements, avec la communauté de la recherche, doivent mettre en œuvre collectivement pour permettre à la filière de se décarboner.

Il faut rappeler à ce stade que les émissions de carbone de l'acte de construire représente 3,5 % des émissions de GES de la France, et que l'usage de ces mêmes infrastructures représente 50 % de ces mêmes émissions.

Forts de nos expériences, forts de nos compétences, nous serons force de proposition pour permettre aux usages des infrastructures d'être également décarbonés.

XAVIER NEUSCHWANDER

PRÉSIDENT DE LA COMMISSION TECHNIQUE ET INNOVATION
DE LA FÉDÉRATION NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS



SPÉCIAL INNOVATIONS & TRANSITIONS

SÉQUESTRATION DU CARBONE BLEU © G. PERGENT & B. MONNIER



04 ALBUM

08 ACTUALITÉ



**ENTRETIEN AVEC
PIERRE RAMPA**
HUB INNOV'INFRA - FACILITATEUR
ET ACCÉLÉRATEUR D'INNOVATIONS
DANS LES INFRASTRUCTURES

**24 FEREC : DÉVELOPPEMENT DURABLE,
MUTATION DES BESOINS ET TRANSITION
NUMÉRIQUE**



**MARCHÉ DE GÉNIE CIVIL
DE LA LIGNE 18
DU GRAND PARIS EXPRESS**
Gestion innovante des déblais
par Quick Soil Analysis



**AMÉNAGEMENT
HYDROÉLECTRIQUE
DE ROMANCHE-GAVET**
Encore plus respectueux
pour l'environnement



LE MATELAS RENO
60 ans d'innovation



**SÉQUESTRATION
DU CARBONE BLEU**
Une solution pour réduire
les impacts du changement
climatique ?



LINASTER
Un outil de gestion de flotte
et de suivi de productivité
au service des chantiers



**CHAUSSÉES RECYCLÉES
VÉGÉTALES**
Recytaal® et Biophalt®



**RENFORCEMENT DE DIGUE
ET RENATURATION
DE LA LÔNE DU RHÔNE**



**L'ANALYSE SPATIALE DU
RÉSEAU EXPRESS VÉLO
LYONNAIS**



**INNOVATIONS
ENVIRONNEMENTALES
DANS LES FONDATIONS**



**LES AVANCÉES DU PROJET
"ROUTE DU FUTUR"
I-STREET**



FONDATEMENTS PROFONDES RESPECTUEUSES DE L'ENVIRONNEMENT

Soletanche Bachy s'emploie depuis l'accord de Paris en 2015 à en respecter les termes sur les chantiers de fondations, visant à réduire de 40 % les émissions de CO₂ en 2030 : conception de matériels électriques de chantier, bétons de fondation à émission réduite de carbone, nouvelles gammes de pieux permettant de réduire les quantités de béton et de déblais.

(Voir article page 84).



© SOLETANCHE BACHY



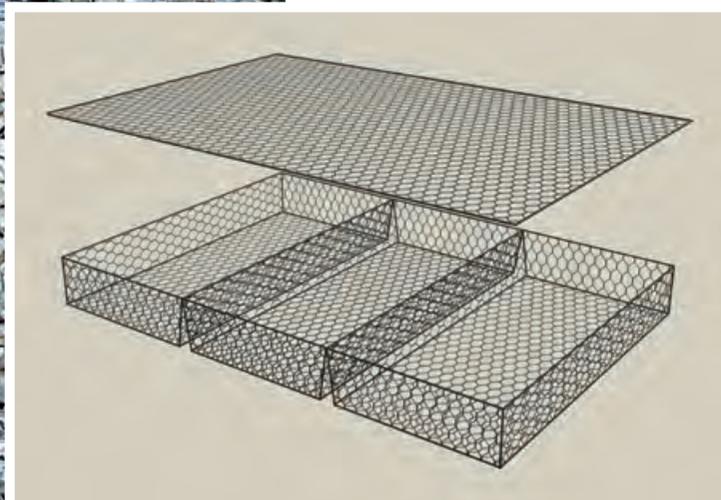
© TIDEWAY - IMAGE2





**PROTECTION
HYDRAULIQUE
EN MATELAS
MINCE
DE GABIONS
60 ANS
D'INNOVATIONS**

France Maccaferri, le spécialiste des structures en gabions, a développé et constamment amélioré le procédé Matelas Reno utilisé en protection contre l'érosion en milieu hydraulique : robustesse et caractéristiques hydrauliques ont fait l'objet de campagnes d'essais apportant les meilleures performances. **(Voir article page 48).**



© MACCAFERRI

USAGES NOBLES DU SOUS-SOL

Le souterrain, ce n'est pas seulement des tunnels et des locaux techniques ou de service. L'Aftes l'a rappelé à son congrès à partir d'exemples en Europe.



Habitations troglodytes créées à partir de grottes fermées par du bâti à Matera (Italie).

« Voir plus loin » que les tunnels et les travaux n'était pas une évidence au congrès de l'Association française des

tunnels et de l'espace souterrain (Aftes, 6-8 septembre). La session "Des projets pour l'espace souterrain" avait pour objec-

tif de mettre de côté la technique et d'imaginer des usages nobles du sous-sol. À Matera (Italie), à 55 km au sud-ouest du port de Bari, les êtres humains ont habité les grottes des flancs calcaires de la vallée de la Gravina jusque dans les années 1950. Près de 17 000 personnes y vivaient alors. L'eau de pluie était stockée dans des réservoirs dans la roche. En mauvais état, ces habitations troglodytes, les sassi, ont été réinvesties par 3 000 habitants après leur inscription au patrimoine de l'humanité de l'Unesco en 1993. Un centre culturel, la Casa cava, y a été aménagé sur 900 m², à partir d'une ancienne carrière.

« Ces villes enterrées sont intéressantes d'un point de vue climat et énergie », a souligné Irene Pace, architecte et chercheuse italienne, qui travaille sur Matera pour une fondation privée. « Le soleil entre en hiver pas en été, la température est constante à l'intérieur, précise-t-elle. Seule fragilité : l'eau qu'il faut contrôler. »

→ **300 000 m² tous les dix ans**

À Monaco, les projets des îlots Pasteur et Charles III sont de grande envergure. Le souterrain est, avec l'extension en mer ou la récupération de friches, un moyen de construire de nouvelles surfaces. « La principauté a besoin de 300 000 m² tous

les dix ans », a témoigné Romain Marcel de la direction des travaux publics.

Autre projet présenté au congrès de l'Aftes : les gares du Grand Paris Express conçues uniquement pour le transport. « Elles ont été dimensionnées pour être des boîtes les plus petites possible à cause du coût à ces profondeurs, jusqu'à 51 m à Saint-Maur-Créteil », a expliqué Sophie Schmitt, directrice des gares et de la ville à la Société du grand Paris depuis juin.

→ **Voir la roche**

« Le sous-sol est le défi de l'urbanité, a rappelé Pierre Veltz, ingénieur sociologue, à la séance d'ouverture du congrès. Il n'y a pas que la technique, il y a l'urbanisme, les travaux souterrains font partie de la construction de la ville, il faut rechercher la qualité. La roche dans laquelle ils sont creusés peut être visible. C'est le cas dans un centre de calculs à Stockholm (Suède) et une poste souterraine en Slovénie. » M. Veltz a également signalé les puits à gradins (pyramides inversées) en Inde⁽¹⁾. Creusés pour atteindre la nappe phréatique, ils abritent parfois des palais et des temples. ■

⁽¹⁾ États de Gujarat, Rajasthan, Haryana (source Wikipedia).

PENSER LA SÉCURITÉ INCENDIE PAR OBJECTIFS EN SOUTERRAIN

« La notion d'air libre dans la sécurité incendie des espaces souterrains est à remettre en cause car il n'est pas possible d'évacuer rapidement vers l'extérieur », a indiqué Bérénice Moreau, responsable adjointe ingénierie de la sécurité incendie du Centre d'essais au feu/Cérib⁽¹⁾, au congrès de l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain.

Selon le Code de la construction et de l'habitat et celui du travail, l'enfouissement maximal pour des ouvrages ouverts au public ou des espaces de travail est de 6 m. Exceptions : les parkings, à 28 m, les gares à 30 m et au-delà si des mesures compensatoires sont prises.

→ **Mise à l'abri en commun**

Par ailleurs, la sécurité incendie est conçue par bâtiment, verticalement, et selon sa fonction. Or, « si des bâtiments étaient connectés entre eux, les personnes pourraient être mises en sécurité par exemple dans un gymnase

voisin, en attendant d'être évacuées à l'extérieur » a proposé Monique Labbé, architecte, directrice du projet national Ville10D et membre du groupe de travail monté en 2018, dont font partie le Centre d'études des tunnels, le Bataillon des sapeurs pompiers de Paris, le Laboratoire central de la préfecture de police de Paris.

Le groupe a redéfini les objectifs de la sécurité incendie en espace souterrain, en étudiant le Forum des halles (Paris, 15 m de profondeur), le Carrousel du Louvre (Paris, 9,15 m publics), Vulcania (Puy-de-Dôme, parc d'attractions, plus de 9 m), les gares du Grand Paris Express. Il a aussi examiné le guide de préconisations jusqu'à 10 m de profondeur, rédigé par la préfecture de police de Paris pour l'appel à projets "Réinventer Paris n°II-Les dessous de Paris".

→ **Gérer dans le temps**

« La réglementation n'aborde pas la gestion de la sécurité dans le temps, a sou-

ligné Bérénice Moreau. Or, un dispositif peut être amélioré et des procédures (qui fait quoi, où, comment) doivent être établies. »

L'approche par objectifs est partagée par l'Acuus, ONG internationale regroupant

des centres de recherche sur l'utilisation urbaine du sous-sol. ■

⁽¹⁾ Centre d'essais au feu du Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton. M^{me} Moreau était rattachée avant septembre 2020 au Centre d'études des tunnels.



Le parc d'attractions Vulcania (Puy-de-Dôme) qui propose des animations sur 2 niveaux de sous-sol, est un des sites analysés par Ville10D.

APPLICATIONS DE PLUS EN PLUS LARGES DU BIM



© JOËL DAMASE / CLERMONT AUVERGNE METROPOLE

Un Bim d'argent a été attribuée à l'extension de la Station d'épuration des trois rivières à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

Le groupe Aéroports de Paris (ADP) a remporté le Bim d'or, concours du *Moniteur*, pour l'utilisation d'une plateforme unique entre tous les acteurs et jusqu'à l'exploitation, lors de la réhabilitation du terminal 2B. Le groupe, maître d'ouvrage, maître d'œuvre et bureau d'études techniques (avec Ingelux), a pour la 1^{re} fois pris en charge le Bim management en phase synthèse, exécution et réception du dossier des ouvrages exécutés. Équipe : ADP avec Bouygues, Brézillon, Baudin-Chateaufort, Axima, Ineo et Alstef.

Dans la catégorie des moins de 5000 m², un Bim d'argent a été attribué à la Communauté de communes de la Châtaigneraie cantalienne avec ACBim, EnerBim et Erea pour la rénovation de 80 bâtiments communaux (fin des travaux 2023). Le processus en Bim vise à instaurer une gestion technique du patrimoine sur le long terme et à « favoriser la montée en puissance des acteurs locaux. »

En projets de plus de 30000 m² en rénovation, un Bim d'argent a été décerné à la métropole de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) pour la démarche appliquée à un ouvrage supplémentaire de traitement d'eau et une unité de valorisation des boues (production de gaz) à la Station d'épuration des trois rivières.

La conception-réalisation a été confiée à Suez Consulting.

La maquette numérique fait la synthèse entre partenaires pendant le chantier puis servira à mettre à jour un plan unique de gestion-maintenance. Aux côtés de la métropole et de Suez Consulting : ITC,

Segmentis, MIB 3D, CHM (architecte) ; Suez TI, NGE Génie civil, Scate Automation.

→ 150 maquettes intéropérables

Signalons dans la catégorie des plus de 30000 m² en neuf : le Bim d'argent pour le pôle d'échanges multimodal à Lyon-Part-Dieu (Rhône). Ici, 150 maquettes numériques sont partagées grâce à l'intéropérabilité. Maîtrise d'ouvrage : Vinci Immobilier, la Société publique locale Part-Dieu, SNCF Gares & Connexions et Réseau.

Le Bim d'argent "infrastructure" est revenu au Canal Seine-Nord-Europe (CSNE). Le Bim, très complet, couvre toute la vie du projet y compris sa déconstruction. Il inclut les données environnementales, fédère tous les métiers et comprend une réalité augmentée pour la présentation aux non-spécialistes.

La Société du CSNE s'est entourée d'Egis, maître d'œuvre avec Ingérop, SBE, ISL, Ney & Partners, AEI Architectures et MDP.

→ Bim, Cim et Lim à Sainte-Luce

Notons aussi le recours au Bim pour 6700 m² bâtis, à livrer en 2025 en front de mer à Sainte-Luce (Martinique). Une maquette hybride multi-échelle est développée à partir des maquettes Bim, Cim (city information modeling) et Lim (landscape information modeling), plus une de topographie du fond marin. Elle est intéropérable avec un système d'information géographique. Sainte-Luce travaille avec Erik Giudice Architecture, Egis Bâtiments Antilles-Guyane et LBD Paysages.

En savoir plus sur :

www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/bim-d-or-2021-decouvrez-les-laureats.53047 ■



© MAQUETTE APD-COMMUNE DE SIRAN

Maquette Bim du "multiple rural" (logement et commerce) à Siran (Cantal), de la Communauté de communes de la Châtaigneraie cantalienne qui a remporté un Bim d'argent.

MOBILITÉ ET RELANCE

Des organisations professionnelles françaises, européennes et internationale*, ont analysé l'impact de la crise sanitaire sur la mobilité et les transports, en particulier l'évolution du soutien financier dans 11 pays : Allemagne, Belgique, Croatie, Espagne, France, Italie, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Royaume-Uni et Suède.

Tous les plans de relance encouragent la motorisation électrique des véhicules et les transports publics à l'heure où la voiture individuelle reste prépondérante.

Les investissements tendent à réduire la place de la voiture mais ce n'est pas une nouveauté " Covid ".

Le chemin de fer est une priorité, en particulier pour les marchandises. Les organisations recommandent de ne pas oublier la route, capable de muter en faveur du bas carbone et des mobilités actives.

L'hydrogène et le déploiement du réseau 5G tiennent une bonne place dans les plans. Afin de bénéficier des fonds débloqués exceptionnellement, une grande partie des pays pousse à la simplification des appels d'offres afin d'accélérer la mise en œuvre des projets.

* FNTP, Routes de France, ERF, Fiec et Cica.



© MT

Tous les plans de relance encouragent la motorisation électrique.

RENOUVELABLES : RACCORDEMENT PLUS RAPIDE

Le raccordement d'une production d'électricité renouvelable (hors hydraulique) devrait coûter moins cher et être plus rapide suite à l'arrêté publié par Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique, le 15 juillet.

L'offre de raccordement dite "alternative" est une expérimentation. Les dispositions de l'arrêté suppriment la garantie d'injecter à tout moment l'électricité produite. Celle-ci peut d'ailleurs être écrêtée dans les limites du contrat entre producteur et gestionnaire de réseau.

De plus, par une autre décision du ministère liée à la loi énergie et climat du 8 novembre 2019, toujours dans un cadre expérimental, Enedis pourra déroger temporairement aux règles de dimensionnement des postes de transformation dans le cas d'électricité renouvelable.

CONSTRUCTYS DE RETOUR

Constructys, organisme paritaire collecteur des contributions formation des entreprises du bâtiment, des travaux publics, du négoce de matériaux et du bois, a été de nouveau agréé comme Opérateur de compétences de la construction (Opc), le 29 juillet, après une suspension liée à une décision du tribunal administratif du 29 juin.

Les partenaires sociaux ont approuvé ce rétablissement à l'unanimité.

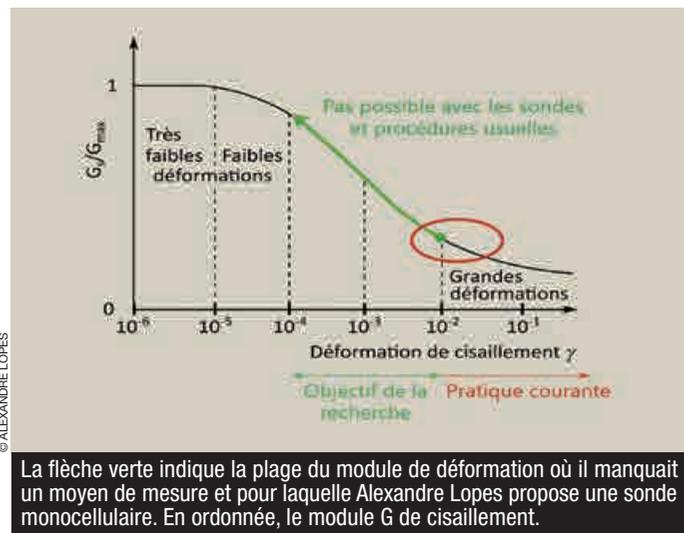
AGIR POUR LA PLANÈTE

La Fédération nationale des travaux publics a créé un site internet "Acteurs pour la planète" pour transformer les infrastructures face à l'urgence climatique.

Considérant que les entreprises de travaux publics sont actrices de la transition écologique, le site propose différents outils pour celles et ceux qui veulent s'engager et échanger.

<https://acteurspourla.planete.fntp.fr>

MESURER LE MODULE DE CISAILLEMENT À FAIBLE NIVEAU DE DÉFORMATION DU SOL



© ALEXANDRE LOPES

La flèche verte indique la plage du module de déformation où il manquait un moyen de mesure et pour laquelle Alexandre Lopes propose une sonde monocellulaire. En ordonnée, le module G de cisaillement.

Alexandre Lopes dos Santos a reçu le prix Boussinesq lors de l'assemblée générale du Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS). Le prix récompense des doctorants qui le sont depuis un ou deux ans⁽¹⁾. « Sur 11 candidats, 4 avaient été retenus, a informé Nicolas Utter, président. Le sujet doit présenter des aspects théoriques et pratiques avec une application

opérationnelle à une échelle de temps relativement courte. »

→ Sonde monocellulaire

Alexandre Lopes a soutenu sa thèse en juin 2020 dans le cadre d'un contrat Cifre Frugo France/École des ponts Paris Tech. Le 28 septembre, il a présenté une nouvelle procédure d'essais de mesure in situ du module de cisaillement d'un sol à faible niveau de déformation, moins

d'1 mm comme, par exemple dans les fondations d'une éolienne offshore, à partir d'une sonde pressiométrique monocellulaire, appliquée au dimensionnement des pieux.

Les sondes usuelles, à trois cellules, mesurent des déformations plus grandes. D'autres moyens comme les géophones détectent les très faibles. « L'essai pressiométrique permet de mesurer directement le module G (cisaillement) qui donne la relation entre les contraintes et la distorsion dans le terrain, » précise Alexandre Lopes.

→ Gagner du terrain sur la mer

Le CFMS avait aussi invité Masaki Kitazume, professeur au Tokyo Institute of Technology (Japon) qui est intervenu sur les techniques durables d'amélioration des sols pour gagner du terrain sur la mer. Masaki Kitazume a publié *The Deep Mixing Method* (Lavoisier 2017).

Au lieu de remplacer les sols sous digue, par exemple, il propose plusieurs méthodes de renforcement sans employer de sables : drain vertical, colonnes de pierre, pieux de compactage du sol, et mélange profond de ciment. ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux n°970, juillet-août 2021, page 11.

CONSTRUCTION DAYS AVANT INTERMAT

Construction Days a accueilli 2 405 visiteurs et 80 exposants à Lyon (Eurexpo) du 14 au 16 septembre. C'est moins qu'annoncé en juin - respectivement 10 000 et 200 - mais les chiffres avant salon, toujours gonflés, et la courte période de préparation expliquent ce résultat modeste pour la 1^{ère} édition du salon des équipements et solutions pour la construction⁽¹⁾. « 72 % des visiteurs sont venus du quart Sud-Est, 10 % d'Île-de-France, 9 % du Nord-Est, 5 % du Sud-Ouest et 4 % du Nord-Ouest, a précisé Isabelle Alfano, directrice du pôle Construction et agro-équipement de Comexposium, organisateur avec le Seimat⁽²⁾. Nous nous attendions à une plus forte part régionale, probablement avon-nous profité de l'absence de salons sur une longue période. 4 % sont venus d'Europe : Suisse, Italie, Belgique. »

Les motorisations électriques, hybrides ou diesel à haute performance ont mar-



Les visiteurs sont venus de toute la France avec une prépondérance du Sud-Est.

© COMEXPSIUM

qué les esprits. Parmi les exposants, ceux des nouvelles technologies et du terrassement étaient les mieux représentés et ont bien interagi.

→ Un salon régional

Pour pallier le manque de main-d'œuvre du secteur, le salon a organisé une matinée emploi-formation et a veillé à bien accueillir les étudiants.

La prochaine édition de Construction Days sera définie avec le Seimat. Elle devrait avoir lieu avant Intermat (avril 2024) et en région, quitte à tourner sur le territoire. ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux n°971, septembre 2021, page 13.

⁽²⁾ Syndicat des entreprises internationales de matériel de travaux publics, mines et carrières, bâtiment et levage.

DEUX TUNNELS D'ÉVACUATION DES EAUX PLUVIALES À LISBONNE

Deux tunnels vont être percés d'est en ouest dans les sous-sols du centre de Lisbonne (Portugal) pour évacuer les grosses pluies vers le Tage et ainsi, éviter les inondations. Les effets des orages sont démultipliés par les constructions à flanc de colline.

Les travaux doivent commencer au 1^{er} trimestre 2022 et durer plus de trois ans.

La Camara municipal de Lisboa (municipalité de Lisbonne) a confié le creusement au groupe portugais Mota-Engil, mandataire, avec Spie Batignolles Génie civil.

Le 1^{er} tunnel, le Tunnel Monsanto-Santa Apolonia (TMSA), mesure 4,5 km de long sur 5,5 m de diamètre intérieur. Il commence à proximité du Parque florestal de Monsanto, quartier de Campolide, par un bassin de filtrage et de dépollution des eaux, et se termine sur la côte de Santa Apolonia où est prévue une station élevatrice.

Sur le tracé, se succéderont trois puits d'une vingtaine de mètres de profondeur, répartis aux endroits stratégiques des zones inondables, sous l'avenue de Libertade, dans le quartier de Santa Marta et sur l'avenue Almirante Reis. Une chambre Vortex, une chambre de captage d'eau et un rameau conduiront les eaux vers le TMSA. Ils feront aussi office de puits de ventilation.

→ Tunnelier à pression de terre

Le second tunnel, le Chelas-Beato (TCB) court sur 1,1 km à partir de la station de métro Olaias. Il traverse les quartiers



Inondation dans le quartier de Sao Domingos de Benfica, à proximité du Parque florestal de Monsanto (Lisbonne) d'où part la 1^{re} galerie d'eaux pluviales.

de Beato et Braço de Prata sur la côte, avant de rejoindre le fleuve. Il compte deux puits, entrée et sortie.

Dans les deux cas, le tunnelier à pression de terre creusera des sols durs ou meubles : roches volcaniques, calcaire, argile et sable. Il mesurera 120 m de long et son outil d'excavation, 6,41 m. Il sera partiellement démonté pour son transfert entre les deux ouvrages.

Les galeries seront revêtues de voussoirs de 0,3 m d'épaisseur après avoir été revêtues d'un mortier. Les voussoirs seront acheminés par train sur pneus à l'intérieur.

→ Croisements avec le métro

Les études devront préciser les risques liés aux habitations et fondations aux

alentours du percement. Des distances de 7 m à 70 m devraient les en séparer. Autres contraintes à prendre en compte lors du creusement : les croisements entre le TMSA et le métro.

Le marché signé en septembre se monte à 133 millions d'euros HT dont 40 pour le groupe français. ■

PLUS D'AMÉNAGEMENT PAYSAGER

Spie Batignolles se renforce en aménagement paysager. Le groupe avait déjà repris Vallia en novembre 2019.

En septembre dernier, Spie Batignolles Vallia a pris des parts majoritaires dans MSV et dans Paysages de l'Oust.

MSV est spécialisée dans les travaux forestiers, l'entretien d'espaces naturels, la végétation aux abords des infrastructures et le bois énergie. Paysages de l'Oust apporte, en plus de ses compétences en aménagement paysager, les revêtements de sols extérieurs.

Dans Vallia, figurent également Vallois (création et entretien d'espaces verts), et Valbois (ouvrages en bois extérieurs).

DÉCONSTRUCTION PAR DEMCY

Eiffage Génie Civil a placé ses activités de déconstruction sous la marque Demcy. Ainsi Demcy intervient-elle actuellement sur la déconstruction du lycée Mounier à Grenoble (Isère), de l'usine Ford à Blanquefort (Gironde), des ateliers Française de mécanique à Douvrin (Pas-de-Calais), d'immeubles à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) et à la prison des Baumettes (Bouches-du-Rhône).

La marque regroupe 270 collaborateurs, dirigés par Bruno Cahen.

Cette activité résulte de l'acquisition par Eiffage Génie Civil de trois entreprises : Perez & Morelli, Boutté et Chastagner.

Eiffage contribue ainsi à réduire ses émissions de gaz à effet de serre par la réutilisation de matériaux et le non-recours à des sols agricoles pour construire.



Déconstruction au lycée Mounier à Grenoble (Isère), chantier Demcy qui se termine fin 2021.

PARIS : LE TRAMWAY GAGNE L'OUEST

La RATP a signé début septembre deux contrats avec Colas portant sur 3,2 km du tramway au nord-ouest de Paris (porte d'Asnières-porte Dauphine).

Le 1^{er} contrat, de 29 millions d'euros, concerne les études d'exécution et les travaux d'implantation de l'infrastructure au sol.

Le second contrat, de 4 millions d'euros, porte sur les études et la construction de la ligne aérienne de contact de 6,4 km.

Mise en service : fin 2023.



Les pluies torrentielles dévalent les rues en pente du centre de Lisbonne (Portugal), ici rue Santa Marta.

EGIS ACCOMPAGNE LE SYTRAL

Egis accompagne le Syndicat mixte des transports pour le Rhône et l'agglomération lyonnaise (Sytral) sur plusieurs projets. Outre le prolongement de la ligne B du métro et son passage en automatique, il est mandataire de la maîtrise d'œuvre de la prolongation du tramway T6. À ses côtés : Ingérop et Gautier-Conquet, atelier d'architectes, urbanistes et paysagistes.

Le T6 Nord est une extension de 5-6 km du T6 Sud mis en service en 2019. Il desservira Villeurbanne, Bron et de grands équipements. La mise en service est prévue début 2026.



Egis intervient déjà sur le prolongement de la Ligne B du métro de Lyon.

FONDS HYDROGÈNE

Vinci Concessions participe à un fonds de développement d'hydrogène vert, produit à partir d'électricité renouvelable et non d'énergie fossile (hydrogène gris), aux côtés d'Air liquide et de Total Énergies.

Chacun s'est engagé à verser 100 millions d'euros dans Hy24, fonds destiné à de grands projets depuis la production jusqu'aux usages finaux, « dans les régions les plus prometteuses d'Amérique, d'Asie et d'Europe, » selon un communiqué.

Au 1^{er} octobre, 800 millions d'euros étaient enregistrés dans Hy24 sur un objectif de 1,5 milliard.

VINCI REMPORTE 3 MARCHÉS À L'INTERNATIONAL



Seymour Whyte, filiale de Vinci Construction, va réaménager des infrastructures ferroviaires et routières dans le port de Melbourne (Australie).

□ n Australie, Seymour Whyte, filiale de Vinci Construction, va concevoir et construire le réaménagement des infrastructures ferroviaires et routières du port de Melbourne (Australie), un marché de 77 millions d'euros (125 millions de dollars australiens) en Early Contractor Involvement.

Les travaux commencent en octobre jusqu'à 2023. Ils concernent le terminal existant et la construction d'un nouveau. Ils devraient désengorger la ville de Melbourne.

Des dispositions de protection de l'environnement sont au programme : traitement des eaux souterraines contaminées, recyclage du bitume et du béton, étude pour réemployer 33 000 m³ de déblais sur place et réemploi de 80 % des matériaux de démolition.

→ Collecteur d'orage à Toronto

Vinci Construction, à travers Bessac Canada, filiale de Soletanche Bachy, a aussi remporté en groupement avec l'entreprise canadienne EBC, la construction

d'un collecteur d'orage à Toronto, ville de près de 3 millions d'habitants sur la rive nord du lac Ontario, au sud-ouest de Montréal (Canada).

Le contrat du Fairbank Silverthorn Storm Trunk Sewer System se monte à 124 millions d'euros (184 millions de dollars canadiens). Les travaux ont débuté en septembre et s'achèveront en 2024. Ils devraient résoudre le problème des inondations répétées des sous-sols dans le quartier de Fairbank Silverthorn et des refoulements dans 4 600 foyers sur 140 ha.

Le projet consiste à construire des tunnels de transport et de stockage d'eaux pluviales en direction d'un nouveau déversoir, dans un parc à Black Creek. Le collecteur gravitaire est constitué d'un tunnel principal de 2 400 m au diamètre interne de 4 500 mm, qui pourra descendre jusqu'à 50 m, et d'un second, de 1 782 m en 1 800 mm de diamètre rejoignant le déversoir ou les collecteurs locaux auxquels il est raccordé par des

puits à des profondeurs entre 14 et 43 m, selon EBC.

Le collecteur d'orage principal sera réalisé par un tunnelier Bessac. Le contrat comprend aussi 21 puits, des tronçons de collecteurs latéraux creusés par fonçage ou micro tunnelier, un collecteur en tranchée couverte, et l'ouvrage de rejet des eaux.

→ Route fédérale en PPP

Enfin, Vinci Concessions a bouclé fin septembre le partenariat public privé (PPP) d'une route de 22 km en Allemagne avec 6 km de voies d'accès. La route fédérale n°B247 reliera Mühlhausen et Bad Langensalza en Thuringe, land du centre du pays.

Le contrat de 30 ans avec la Deges, autorité publique de développement des infrastructures de transport, se monte à 500 millions d'euros dont 350 de travaux. Les travaux confiés à Eurovia Deutschland et Vinci Construction Terrassement, ont débuté en octobre et s'étalent sur quatre ans. ■

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

Retrouvez l'actualité de la profession, les chantiers en images, les interviews des grands décideurs, le point de vue des ingénieurs. Pour réserver votre emplacement publicitaire dans Travaux, contactez :



Bertrand COSSON
Tél. 01 41 63 10 31
b.cosson@rive-media.fr

Prochains numéros :

- TRAVAUX n° 974 « Soils et fondations »
- TRAVAUX n° 975 « Énergie »

RÉCUPÉRER L'ÉNERGIE DES VAGUES DANS LES PORTS



Dessin du système houlomoteur Eco Wave Power à deux fois 4 flotteurs pilonnants, connecté au réseau en 2016 sur la jetée à Gibraltar (Royaume-Uni).

© CEREMA

La production d'électricité à partir de l'énergie mécanique des vagues était au programme de la journée sur les travaux maritimes et fluviaux du Comité français de mécanique des sols et de géotechnique, le 16 septembre. En effet, "l'analyse des systèmes de récupération d'énergie marine en interaction forte avec les infrastructures côtières et portuaires" est l'objectif du projet de recherche national Énergies marines, côtières et portuaires (Emacop), lancé en 2012⁽¹⁾.

« Les travaux sur les ouvrages de protection pour parer à la montée du niveau de la mer sont propices à l'installation de systèmes houlomoteurs "bord à quai" (digue, jetée), » a spécifié Philippe Sergent, directeur technique d'Emacop, par ailleurs directeur scientifique du Cetmef (Cerema). « Les systèmes à flotteurs, par exemple, atténuent les efforts des vagues sur les digues et les navires ont besoin d'électricité. »

Emacop a abouti en 2020 à la rédaction d'un guide sur les systèmes houlomoteurs

en bord à quai (Cerema). La puissance électrique qui en est tirée va jusqu'à 10 kW par mètre contre 40 kW au large (machines flottantes) ou au fond (hydroliennes).

→ Projets de démonstrateur

Quatre grandes familles de machines produisent de l'électricité à partir de l'énergie mécanique de la houle : système à franchissements, à colonne d'eau

oscillante, à batteurs oscillants ou à flotteurs.

La filière est en évolution constante. Le guide de 180 pages du Cerema est un outil d'avant-projet. « Nous aimerions démarrer des démonstrateurs en France, a informé Philippe Sergent. Sur 22 sites analysés, nous en avons dégagé 9 pertinents sur la côte basque, en Bretagne et en Normandie. »

Le Grand port maritime de Marseille a répondu à l'appel à projets Green Port (programme européen H2020) en janvier avec un démonstrateur bord à quai Eco Wave Power (société suédoise fondée en Israël) de 1 MW en complément du solaire photovoltaïque diurne. Un démonstrateur Dikwe du consortium réunissant le groupe Legendre, Geps Techno et l'Ifrermer, est en préparation à Audiernne-Esquié, au sud-ouest de Douarnenez (Finistère).

→ Part du génie civil

Emacop a analysé les coûts de différents dispositifs. Ils vont de 35 000 euros/m (250 m) pour un système houlomoteur à flotteurs pilonnants à 119 100 euros/m s'il est à franchissements (60 m).

La part du génie civil est plus importante sur les franchissements (66 %) et la colonne d'eau oscillante (72 %) qu'avec les volets oscillants (30 %) et les flotteurs (37 %) où c'est l'électromécanique (compresseur) qui domine avec 62 et 55 %.

Les prix en euros par kilowattheure produit (Levelised cost of energy) varient de 2,17 à 0,23, bien au-dessus des autres énergies nouvelles renouvelables.

En savoir plus sur : www.emacop.fr/actualites. ■

⁽¹⁾ 30 partenaires dont le Cerema (pilote), l'Université du Havre et l'École centrale de Nantes.

SYSTÈMES HOULOMOTEURS BORD À QUAI EN FONCTIONNEMENT

Nom projet	Localisation	Mise en route	Puissance maxi
Wavestar	Port d'Hanstholm (Thisted/Jutland/Danemark)	2009	600 kW
Mutriku	Port de pêche de Mutriku (Pays basque/Espagne)	2011	300 kW
Pecem	Port de Pecem (Brésil)	2012	50 kW
Eco Wave Power	Gibraltar (Royaume-Uni)	2016	100 kW

SOURCE : GUIDE CEREMA 2020

INNOVATIONS BAS CARBONE

Le dessalement solaire Osmosun de Mascara est un des lauréats du 3^e appel à solutions du club industriel Sekoya. La solution fonctionne à l'électricité solaire sans appoint en batteries. Parmi la quarantaine d'unités installées dans le monde, citons celles à Bora Bora (Polynésie française), à l'Ile Maurice et à Witsand en Afrique du Sud. La solution bénéficiera comme les 10 autres lauréats d'un accompagnement par les membres du club Sekoya qui pourront les intégrer dans leurs consultations. Sekoya est la plateforme présentant des solutions techniques bas carbone d'Eiffage avec Impulse Partners. En font partie Ceebios, Covivio, le CSTB, Gerflor, Legrand, Saint-Gobain, l'Union sociale pour l'habitat, Vicat, Rexel et Lited.

Outre les innovations purement bâtiment et celle de Mascara, notons l'accompagnement par Caudex de projets de valorisation des sols avec végétalisation et la production d'électricité par hydrolienne d'Eel Energy.

www.sekoyacarbonate.com
www.sekoyacarbonate.com



© OSMO SUN / MASCARA

Unité de dessalement d'eau alimentée en électricité solaire sans batterie à Witsand, station balnéaire d'Afrique du Sud.

PELLE À RAYON COURT

La pelle sur chenilles 245XR est une 220X améliorée.

Elle a un déport arrière 40% inférieur, à 1720 mm.

Elle fait partie de la famille des 22-26 tonnes.

Des chenilles de 600 à 900 mm au choix stabilisent l'engin, ce qui sécurise les levages.

Le bruit interne s'élève à 69 dB(A). De nombreuses options sont disponibles.

Citons le siège "super deluxe" chauffant ou refroidissant, avec un support lombaire électrique.



Les chenilles de 600 à 900 mm de large stabilisent la pelle.

HYDROLIEN : ACCORD FRANCO-BRITANNIQUE

Le Syndicat des énergies renouvelables et le UK Marine Energy Council ont signé un protocole d'accord le 24 septembre pour développer l'énergie hydrolienne (électricité tirée des courants au fond de l'eau).

Les partenaires qui bénéficient d'une bonne ressource dans le domaine, partageront analyses, bonnes pratiques et expériences.

INFRA BIM OPEN EN JANVIER

Le congrès international de la transformation numérique des infrastructures, Infra Bim Open, se tient finalement à Lyon du 10 au 12 janvier. Les personnes qui voudraient y assister en chair et en os bénéficient d'une réduction de 20% par le code "orglBo21". Infra Bim Open propose 57 conférences. Il est organisé par Buildingsmart France, Innov'infra (Indura), Minnd (Irex) avec le soutien de la FNTF, Syntec Ingénierie et Buildingsmart Finlande.

PRIX IMBP : VISION GLOBALE DES MESURES EN FAVEUR DE LA BIODIVERSITÉ

« Les maître-mots du traitement des continuités écologiques longitudinales sur l'A480 en traversée de Grenoble sont la transversalité des compétences et la continuité du dossier », estime Hippolyte Pouchelle, expert écologue chez Egis, à propos de l'aménagement qui a remporté un des prix Infrastructures pour la mobilité, biodiversité et paysage 2021 (IMBP), catégorie "projet prometteur", de l'Institut des routes, des rues, des infrastructures et de la mobilité. Les équipes réunissent des spécialistes en réglementation, environnement, écologie, paysage tout au long du projet. « Il faut veiller à ce que les arrêtés soient traduits dans le dossier de consultation des entreprises, que les mesures soient reprises dans leurs réponses et mises en œuvre, et tenir les objectifs malgré les changements », précise-t-il.

Ces exigences ont été vécues à l'occasion de l'élargissement à 2 fois 3 voies de l'autoroute à proximité de la confluence de la Drac et de l'Isère piloté par Area (APRR). Outre la limitation des largeurs occupées et de l'éclairage, les murs acoustiques et/ou de soutènement ont été végétalisés et accueillent la faune. Nids et gîtes ont été insérés dans les gabions des parois. Des bergeronnettes des ruisseaux n'ont pas attendu la fin des travaux (2022) pour nicher.

→ Périodes d'intervention

Dans l'Hérault, le plan routes et biodiversité (PRB), approuvé par l'assemblée départementale le 10 mai dernier, a reçu



Renaturation de l'Ensigaud à proximité de la déviation de Montagnac (Hérault).

le prix IMBP "sensibilisation et communication". Le PRB se décline en fiches-actions et s'inscrit dans le management durable des routes lancé en 2010.

Le département a des conventions avec des associations. Le personnel recense les habitats de la faune lors des visites de ponts, et prend conseil auprès d'elles. Des périodes d'intervention, du rouge au vert, sont déterminées selon les cycles biologiques des espèces (reproduction, hivernage).

Un jour est consacré à la plantation d'arbres sur les délaissés. Il implique les agents des routes et des enfants. Citons également dans l'Hérault, la renaturation du ruisseau l'Ensigaud, à proximité de la déviation de Montagnac.

→ Résorber les points de collision

En Pyrénées-Atlantiques, le plan biodiversité et infrastructures routières du département, approuvé début 2021, a été distingué par le prix IMBP "génie écologique". Le département travaille notamment sur la réduction des points noirs de collisions entre faune et véhicules. 1^{re} étape : leur enregistrement par les patrouilleurs. Un tronçon en sortie de Bayonne vers Ustaritz est particulièrement meurtrier pour les chevreuils, les putois, belettes et martes. Des grillages ont été posés au printemps.

Autre solution, à l'étude, dans le même secteur : des banquettes sur la paroi d'une buse afin que les visons, espèce protégée, passent à sec, quelle que soit la hauteur d'eau de l'Urdains.

Ex-æquo dans la catégorie "génie écologique" : la Collectivité européenne d'Alsace qui étudie les clôtures anticollisions pour écarter micromammifères et amphibiens. Murets en béton avec réglette anti-escalade et tôles en acier galvanisé à 40 cm au moins sont recommandés, sauf pour la grenouille agile à qui ça ne fait pas peur. ■



Lors de l'élargissement de l'A480 à Grenoble, les gabions ont été très vite investis par des bergeronnettes après adaptation de la grille pour correspondre à l'entrée des nids.

La CNETP regroupe près de **8 300 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues au près de **270 000 salariés**.



NOS MISSIONS

- La gestion des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics
- la mise en œuvre du régime de chômage intérimaires auprès des entrepreneurs de Travaux Publics

CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

NOUS CONTACTER

📍 31 rue le Peletier 75453 PARIS CEDEX 09

☎ Entreprises : 01.70.38.07.70

☎ Salariés : 01.70.38.09.00

sur Internet : www.cnetp.fr

sur l'appli mobile : **CNETP Salarié**






Membre du Réseau Congés Intérimaires BTP

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

Malgré l'amélioration de la situation sanitaire, nous invitons les lecteurs à toujours vérifier par internet que les événements annoncés dans cette rubrique sont maintenus, à quelle date et dans quelles conditions (en présentiel et/ou en ligne). Des manifestations reportées en 2022 ont conservé "2021" dans leur nom.

• **2 DÉCEMBRE**
Fascicules 70-1 et 71, canalisations d'eaux, révisions 2019
Lieu : à distance
<https://formation-continue.enpc.fr>

• **3 DÉCEMBRE**
Bim retours d'expériences (AFGC / Aftes / Edubim)
Lieu : Paris 13^e (Ensam)
www.afgc.asso.fr

• **10 AU 12 JANVIER**
Infra Bim Open 2021
Lieu : Lyon ou à distance
www.infrabimopen.com

• **18 AU 20 JANVIER**
48^e congrès Atec ITS France
Lieu : Montrouge (Hauts-de-Seine)
<https://congres.atec-its-france.com>

• **25 JANVIER**
Analyse du cycle de vie en génie civil
Lieu : Puteaux (La Défense)
<https://augcavv.sciencesconf.org>

• **25 ET 26 JANVIER**
9^e assises nationales sur la qualité de l'environnement sonore
Lieu : Paris (Jussieu)
www.bruit.fr

FORMATIONS

• **6 AU 8 DÉCEMBRE**
La ville de demain : pistes pour un renouvellement des pratiques de l'urbanisme
Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

• **6 AU 9 DÉCEMBRE**
Ouvrages hydrauliques d'infrastructures linéaires
Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

• **8 DÉCEMBRE**
Gestion des terres excavées, réemploi et valorisation
Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

• **8 AU 10 DÉCEMBRE**
Résistance des matériaux : fondements des calculs et du dimensionnement
Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

• **13 ET 14 DÉCEMBRE**
Gestion financière et contractuelle d'un chantier d'ouvrage souterrain
Lieu : en distanciel
<https://formation-continue.enpc.fr>

NOMINATIONS

AFGC :
La Délégation Île-de-France et Centre de l'Association Française de Génie Civil est désormais présidée par Claude Rospars (U. Eiffel et IREX). Elle prend la suite de Claude

Servant (Eiffage) qui a présidé la délégation depuis sa création en 2014 jusqu'en 2021.

EDF :
Valérie Dijkstra est la nouvelle directrice performance et développement du groupe.

EIFFAGE :
Bruno Cahen dirige Demcy, la marque des activités de déconstruction d'Eiffage Génie Civil, lancée en septembre.

IDRRIM :
Pierre Dumas remplace Tristan Hirel en tant que chargé de mission de l'Observatoire national des routes piloté par l'Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité.

OCCITANIE :
Guy Kauffmann a été nommé directeur de projet sur les lignes nouvelles à grande vitesse, notamment Toulouse-Bordeaux, auprès du préfet de la région Occitanie.

HUB INNOV'INFRA FACILITATEUR ET ACCÉLÉRATEUR D'INNOVATIONS DANS LES INFRASTRUCTURES

Nouveau dans le domaine de l'aménagement, des Travaux Publics et des infrastructures, le hub Innov'Infra donne une dimension nationale à la dynamique d'innovation de la filière. Il construit son ambition sur les actions et vocations de ses 5 partenaires fondateurs, fortement ancrés sur leurs territoires, qui constituent un réseau de plus de 700 adhérents : bureaux d'étude et d'ingénierie, entreprises de Travaux Publics, industriels, industrie nucléaire, friches industrielles, maîtres d'ouvrage, collectivités, urbanistes, laboratoires et universités, centres techniques... **Pierre Rampa, président d'Innov'Infra, présente à Travaux les objectifs et les ambitions de cette structure originale.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1- Pierre Rampa,
président du
hub Innov'Infra.

Quelles sont les origines d'Innov'Infra et quelles sont ses missions ?

Le hub Innov'Infra est né le 27 novembre 2019 à l'occasion de la journée des innovations Travaux Publics organisée par la FNTP.

Ses 5 partenaires associés sont répartis sur une grande partie de l'hexagone : Ecorse TP en Bourgogne – Franche-Comté, Indura en Auvergne-Rhône-Alpes, Novabuild en Pays-de-la-Loire, Odeys, en Nouvelle-Aquitaine auxquels s'ajoute l'Irex, Institut pour la Recherche Appliquée et l'Expérimentation en Génie Civil.

Dans sa prérogative d'organisation nationale, le hub ambitionne de développer 4 missions principales :

- Favoriser et accélérer le montage de projets d'innovation collaboratifs au niveau national ;
- Concourir à la visibilité du domaine et à la cohérence d'actions ;
- Coordonner des actions à l'international ;
- Caractériser des cibles à l'international.

Il s'agit d'abord d'animer un lieu de convergence et de mise en synergie. À travers le hub, les partenaires cherchent à approfondir le partage d'expé-

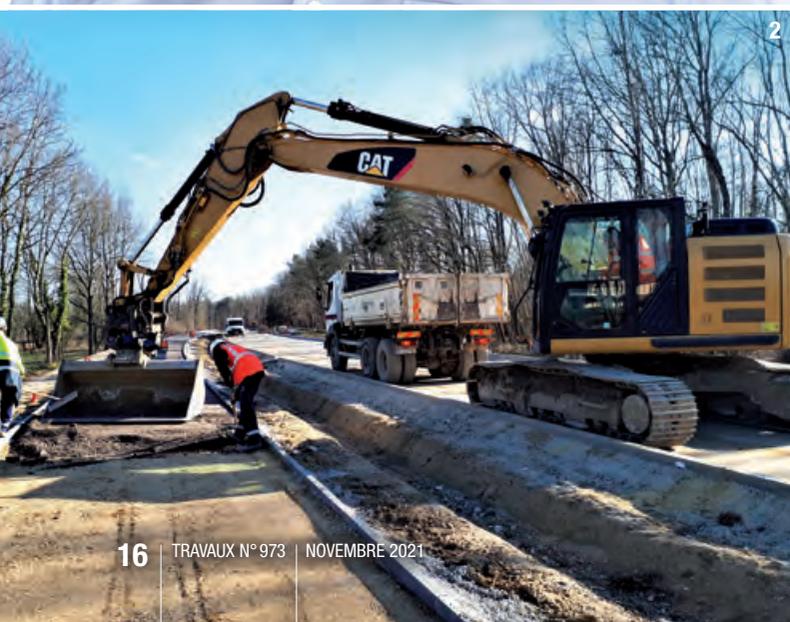


FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © ECORSE TP - FIGURE 3 © INDURA

2- Chantier de voirie écologique en Bourgogne - Franche Comté (Ecorse TP).

3- Station d'essais de chutes de blocs de l'université Gustave Eiffel à Montagnole (Savoie). Événement co-organisé par Indura, I-RISK - le cluster montagne - l'université Gustave Eiffel et Geolithe (ingénieurs-conseils en géologie, géophysique et géotechnique).

4- Pierre Rampa, président du hub Innov'Infra et du groupe Rampa.

5- Visite du chantier du viaduc du Charmaix en Savoie, organisée par Bouygues Construction.

6- Visite d'un chantier à Lyon - Part-Dieu, organisée par Soletanche Bachy.

riences et entrevoir des synergies de projets. La mutualisation des informations et des savoir-faire régionaux augmentera la pertinence de la recherche, du développement et de l'innovation. Nous avons également défini une procédure de labellisation partagée entre nous pour des projets de recherche ou d'innovation. Cette procédure converge vers une qualité équivalente à celle des pôles de compétitivité. Elle repose sur une méthode d'évaluation partagée, garantissant une qualité, une crédibilité et une reconnaissance vis-à-vis des instances qui émettent des appels à projet et/ou qui les financent.



© PAMPA
4

PIERRE RAMPA : PORTRAIT

Pierre Rampa qui a présidé l'entreprise Rampa TP à la tête de laquelle son fils Paul lui a succédé, est président de ce groupe familial actif dans la canalisation, les réseaux secs, la préfabrication (Delta préfabrication) et la promotion immobilière. Pierre Rampa est le troisième dans la lignée, après Jean Rampa et Marc Rampa.

Après un bac scientifique puis Sciences Eco à Lyon, il rejoint rapidement le terrain : pour lui l'entreprise est la vraie école de la vie, une école où l'on apprend tout.

Pierre Rampa dit avoir eu plusieurs précepteurs dans sa vie : son père Serge pour la rigueur du raisonnement, son oncle François Pélissier pour l'organisation technique de l'entreprise, des conducteurs de travaux et des anciens pour lui apprendre les ficelles du métier.

Il devient directeur financier de Rampa à l'âge de 25 ans avant de rejoindre la branche "canalisations" et de contribuer activement au développement de ses implantations à Lyon, notamment, un véritable défi, et dans les Bouches-du-Rhône ainsi qu'à Grenoble et en Haute Savoie.

Pour Pierre Rampa, Rampa Entreprises est demeurée une entreprise familiale dont les capacités de réaction sont rapides et qui a su donner au fil des années une image de sérieux et de qualité.

De tout temps, il s'est également impliqué dans les instances professionnelles : Fédération Régionale des Travaux Publics, président de la chambre syndicale des Canalisateurs du Sud-Est depuis 2017, cluster Indura, dont il a été le président-fondateur de 2009 à 2017.

Développer ensemble des solutions innovantes répondant aux enjeux sociétaux et environnements actuels, c'est également l'objectif de Rampa Entreprises dont il est président du directoire depuis 2009 et de Rampa Travaux Publics aux destinées de laquelle il préside depuis 1990. Pierre Rampa est président du hub Innov'Infra depuis novembre 2019.

Le hub a pour objectif évident d'accélérer le montage de projets collaboratifs de recherche ou d'innovation. Il s'agit aussi bien de projets compétitifs portés par un acteur économique, ayant vocation à développer un nouveau produit ou service commercial à moyen terme⁽¹⁾ que les projets d'intérêt collectif, notamment les Projets Nationaux qui permettent de mettre en œuvre une recherche collaborative à caractère appliqué, de manière à produire de la doctrine technique de référence et partagée.

Si tous les partenaires ont la capacité d'animer leurs propres membres et d'accompagner des projets d'innovation, tous les dossiers n'arrivent pas systématiquement à un dépôt ou un financement. À travers la mutualisation du hub les partenaires souhaitent optimiser leur efficacité.

Ainsi, le hub permet de partager les expériences des partenaires, d'élargir le consortium à des acteurs extra-régionaux (projets inter-cluster) et d'identifier la meilleure ingénierie financière pour le projet.

Les partenaires allient ainsi leur connaissance des opportunités pour augmenter le nombre de projets réussis de la filière.

En ce qui concerne la visibilité ?

L'une des vocations du hub est de rendre plus visible l'originalité, la technicité et l'intérêt des métiers de la construction, de l'aménagement et des infrastructures. Ceci concerne également les échanges avec les instances comme les ministères : à l'image d'un pôle de compétitivité, nous souhaitons jouer un rôle de représentation des écosystèmes régionaux, de remontées de projets compétitifs ou d'intérêt collectif. ▶



© INDURA
5



© INDURA
6

INNOV'INFRA : QUATRE CLUSTERS ET L'IREX

ECORSE TP, LES TRAVAUX PUBLICS S'ENGAGENT

Après 10 ans de bons et loyaux services, et une année 2020 qui a popularisé le mot "cluster", le cluster Ecochantiers est devenu Ecorse TP.

En effet, combiner enjeux environnementaux, sociaux, économiques et aménagement du territoire reste la mission principale de la structure, articulée autour de deux axes principaux :

- Accompagner les acteurs, (entreprises, maîtres d'ouvrage, ...) et les projets d'aménagement du territoire,
- Promouvoir les bonnes pratiques, sensibiliser et informer les acteurs de l'aménagement mais aussi les futurs acteurs que sont les apprentis et les étudiants.

C'est ainsi qu'Ecorse TP entend contribuer à la transition énergétique des territoires, aux côtés de ses partenaires et grâce à eux.

Il est le réseau d'entreprises, de collectivités et de laboratoires qui contribuent à l'aménagement durable du territoire dans une dynamique d'innovation et de préservation de l'environnement en Bourgogne – Franche-Comté

Il a accompagné la communauté d'agglomération du Grand Auxerrois dans une démarche d'écochantiers dans le cadre de l'aménagement d'une friche en zone artisanale et commerciale, la ZAC AuxR'Parc.

La démarche d'écochantiers s'est articulée autour de critères environnementaux de la commande publique, de méthodologies et d'organisation de chantier, mais aussi d'indicateurs de suivi qui ont permis à l'ensemble de la chaîne du projet, du maître d'ouvrage à l'entreprise en passant par le maître d'œuvre, de contribuer à la préservation de l'environnement.

Ecorse TP est présidé par Christophe Ribette.

INDURA

Indura a été fondé fin 2009 par 22 membres créateurs (entreprises, ingénieries, laboratoires). Pierre Rampa en fut le premier président jusqu'en 2017 et en reste un membre actif depuis. Labellisé cluster en 2014 par la région Auvergne-Rhône-Alpes, il a pour missions principales l'animation et l'accompagnement des projets d'innovation et d'internationalisation de ses 123 membres issus du monde des infrastructures de transport et d'énergie.

Dans ce cluster, les principes d'accompagnement de l'innovation se déclinent autour de trois axes stratégiques : accélérer la transition écologique, numérique et énergétique des infrastructures d'énergie et de mobilité, transformer les espaces et réseaux urbains pour les usages de demain, construire différemment pour anticiper les risques climatiques, naturels et technologiques.

Le cluster Indura est présidé actuellement par Paul Galonnier (Sitétudes). Un nouveau président sera désigné en 2022.

NOVABUILD

Né en 2003 à l'initiative de centres de recherche, le Pôle Génie Civil Eco-construction, devenu Novabuild en 2012, se situe à la fois comme cluster du BTP en Pays-de-la-Loire et centre de ressource de la construction durable dans la dynamique ciblée par le Grenelle de l'environnement.

Positionné jusqu'à maintenant comme "Accélérateur des transitions", dans sa feuille de route 2020-2022, Novabuild est aussi l'allié "Solutions Climat de la construction, de l'aménagement et de l'immobilier en Pays de la Loire". Ce cluster regroupe l'ensemble des acteurs de la construction (bâtiment et travaux publics) de l'aménagement et de l'immobilier, unis par une même volonté de construire plus durablement.

Les 5 grandes parties de son offre de services : l'information et la sensibilisation, les animations, les groupes de travail, le soutien à l'innovation et l'expertise Novabuild.

Plusieurs thématiques sont abordées dans le cadre de groupe de travail dont un sur les graves recyclées qui a amené à la rédaction d'un manuel⁽⁴⁾.

Novabuild a notamment labellisé Néolithé en 2020 dans le cadre du Hub Innov'Infra. Néolithé développe un procédé breveté de fossilisation consistant à la transformation de déchets non-recyclables, non-inertes et non-dangereux en granulats minéraux normés utilisables dans les sous-couches routières et le béton.

L'association Novabuild est présidée par Jérôme Le Gall (directeur général Exécutif de Sofradi).

ODÉYS

Odéys est né de la fusion entre le pôle CREAHD et le cluster Eco Habitat en 2019. Il est le cluster construction et aménagement durables en Nouvelle Aquitaine. Présent sur tout le territoire grâce à 5 implantations, l'ambition d'Odéys est d'être un catalyseur, un facilitateur et un accélérateur des transitions environnementale, énergétique, digitale et sociétale ainsi que de la mutation des comportements dans la filière BTP et matériaux. Avec un réseau de près de 350 adhérents, Odéys a pour mission de développer la compétitivité, d'améliorer la prise en compte du développement durable dans les entreprises et les projets et d'impulser une action d'innovation transversale dans ces secteurs.

Ainsi, le projet Valosed a été labellisé par Odéys en 2019 dans le cadre du hub Innov'Infra. Ce projet est soutenu financièrement par le Conseil Régional de Nouvelle-Aquitaine, la FNTP et le Grand Port Maritime de Bordeaux. Son objectif est la valorisation des sédiments de dragage à travers leur incorporation dans de nouvelles formulations de bétons écologiques. Piloté par l'Université de Bordeaux et en partenariat avec ses homologues et laboratoires spécialisés régionaux, les différentes applications envisagées dans le projet sont étudiées en étroite collaboration avec les besoins, tant en construction qu'en aménagement, de maîtres d'ouvrages tels que les différents ports de Nouvelle-Aquitaine. Des entreprises de Travaux Publics en capacité de mettre en œuvre les pistes de développement sur des chantiers



© ODÉYS

7



© ADOBESTOCK

8



expérimentaux, viennent compléter le consortium regroupant une douzaine d'acteurs publics et privés sur les 3 années de travaux prévus.

Le cluster Odéys est présidé par Christophe Philipponneau (Tipee).

IREX

L'Irex (Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation en génie civil) est une association loi 1901 à but non lucratif fondée en 1989, conjointement par l'État et la FNTF (Fédération Nationale des Entrepreneurs de Travaux Publics), qui développe la recherche et l'innovation collectives entre secteurs publics et privés par la

coordination des projets nationaux de recherche dans le domaine de l'aménagement et des infrastructures.

L'institut a pour objet principal le montage et le suivi d'actions de recherche collectives - financées en commun par plusieurs partenaires - dans le domaine de la construction, avec l'objectif de produire des résultats ayant des retombées opérationnelles pour la conception et la maintenance des ouvrages ou la réalisation des chantiers.

Les projets coordonnés par l'Irex constituent des réponses opérationnelles aux défis écologiques, numériques et économiques et des moyens efficaces pour développer l'innovation auxquels les réseaux d'infrastructures sont confrontés.

Il intervient en particulier dans les Projets nationaux. Un Projet National (PN) est une procédure spécifique de mise en œuvre de la recherche collaborative et de l'innovation dans le domaine de la construction, soutenue par le ministère de la transition écologique et solidaire, dans le cadre du réseau "Recherche appliquée en génie civil". Un PN regroupe de 25 à 60 participants, pour un travail de quatre années en moyenne et un budget de 2 à 4 M€ HT. L'activité de l'Irex correspond à une dizaine de projets en activité et un budget propre de 450 k€.

En fédérant les acteurs de la filière des Travaux Publics et du Génie civil, l'Irex est un vecteur de transfert de l'innovation du monde académique vers la profession⁽⁶⁾.

En 2021, l'Irex fédère 300 organismes privés et publics dans le cadre des Projets Nationaux autour des quatre thématiques :

- La réduction des impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires ;
- L'optimisation de la conception, des procédés et des performances ;
- L'exploitation et la maintenance des infrastructures ;
- Les matériaux et procédés innovants.

L'Irex est présidé par Jacques Roudier.

Nous souhaitons aussi concourir à la reconnaissance des innovations mises en œuvre sur le territoire auprès du grand public.

En effet, la technicité et la technologie de la construction sont mal connues du public. Elles représentent cependant

sur des innovations majeures intégrant des technologies issues du numérique, de la robotique, de la biotechnologie, de la nanotechnologie, etc., toutes au service de la conception, de la construction et de la gestion durable des infrastructures.

Ayant constaté qu'aucun pôle de compétitivité ne couvre le domaine de l'aménagement et des infrastructures, notre hub souhaite jouer un rôle structurant vis-à-vis des Comités stratégiques de filière concernés (construction, énergie renouvelable). Les priorités développées sont au cœur des clusters partenaires dans leur vocation d'accompagnement de projets :

- Accélérer la transformation numérique du secteur de la construction en mettant à disposition des entreprises un environnement pour les échanges numériques ;
- Développer la technologie et les usages des matériaux communicants ;
- Optimiser le processus de construction et de rénovation pour moins de sinistralité.

Ainsi, le hub inscrit pleinement son action dans le thème de l'entreprise du futur. Cela permettra de répondre à une attente de toutes les entreprises, particulièrement les TPE et PME.

Le positionnement complémentaire des clusters partenaires du hub aura une réelle plus-value dans ce sens.

Quelles peuvent être les actions du hub à l'international ?

La première est d'identifier les opportunités de projets européens pour les membres. L'Europe déploie un programme de soutien aux projets de recherche, de développement et d'innovation basés sur la collaboration européenne. ▶

7- Projet Valosed de valorisation des sédiments portuaires de Nouvelle Aquitaine : la drague du Grand Port Maritime de Bordeaux.

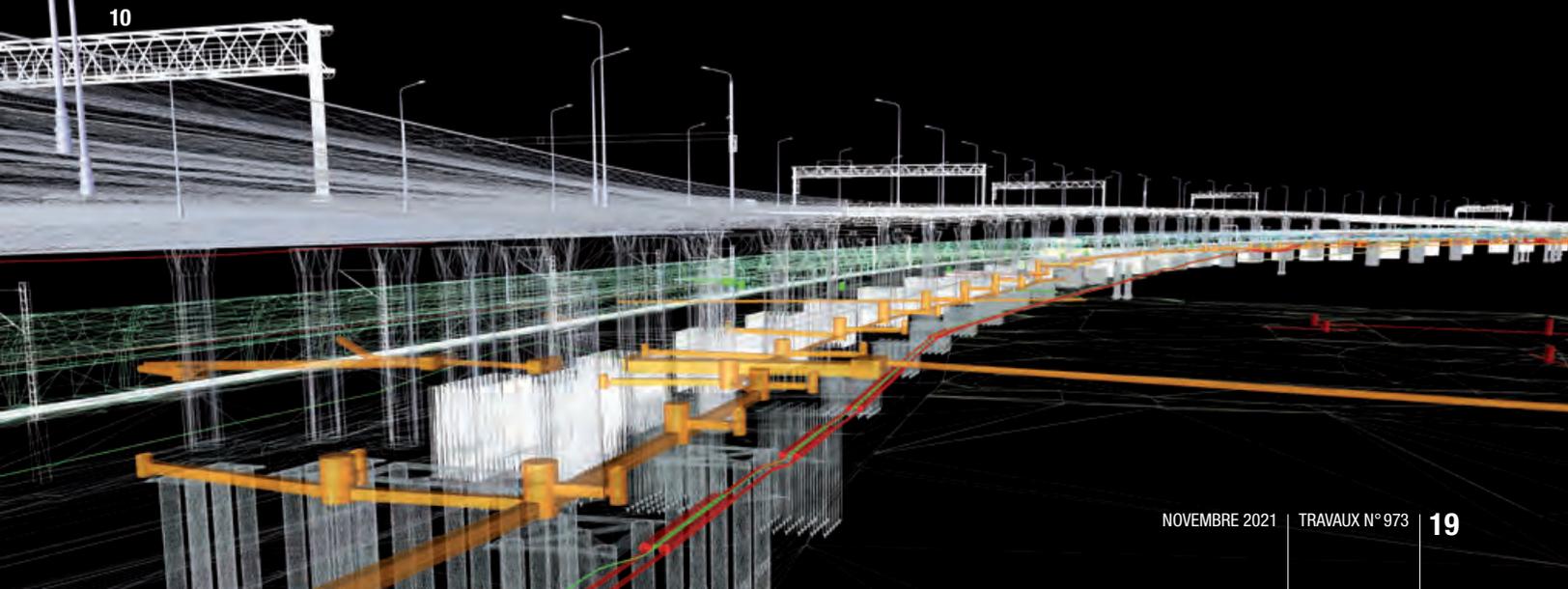
8- Le Projet National MINnD de recherche collaborative a pour objectif de favoriser le développement du BIM pour les infrastructures en améliorant la structuration des données des projets pour des échanges et partages des informations plus efficaces par un processus de digitalisation des ouvrages.

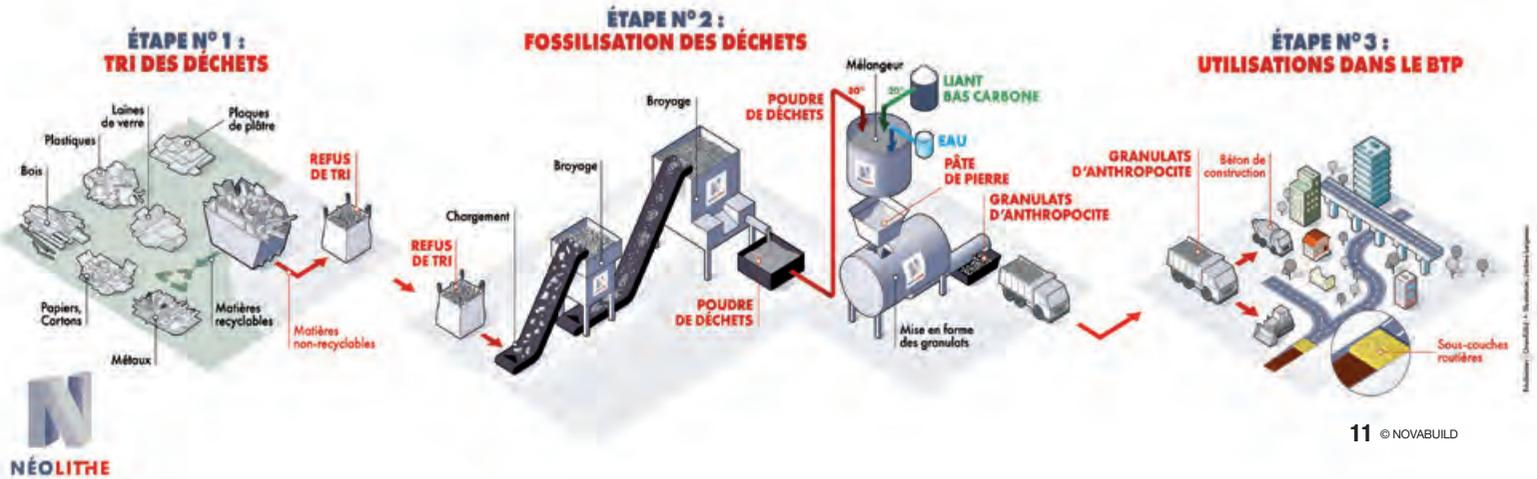
9- Les cinq membres du hub Innov'Infra : Ecorse TP, Indura, Irex, Novabuild, Odéys.

10- Le BIM est utilisable dès maintenant par tous sur des projets d'envergure tels que les infrastructures linéaires, les terrassements et l'aménagement du territoire.

© ADOBESTOCK

10





11 © NOVABUILD

Le hub contribuera je l'espère à identifier les opportunités propices à la filière et à l'accompagnement de ses partenaires, et plus largement de leurs membres.

Notre objectif est par exemple de nous investir dans les programmes interrégionaux Interreg⁽²⁾. Ces projets visent à améliorer la politique de cohésion par l'échange d'expériences, le transfert de bonnes pratiques et les initiatives conjointes entre gouvernements locaux et régionaux, ou des structures représentatives comme des chambres consulaires ou les clusters.

Les partenaires du hub ont tout intérêt à s'investir dans des projets Interreg et à partager les avancées de chacun pour en faire profiter leurs propres membres.

Un autre intérêt est d'initier un premier niveau de collaboration au niveau européen avec des partenaires développant une même thématique. Ces premiers projets Interreg sont par ailleurs souvent au fondement de relation plus poussée entre les membres, leur permettant de monter des projets européens plus facilement. Les Régions administratives ont

également un rôle de relai à jouer avec chacun de ses clusters.

Comment les clusters membres de Innov'Infra interviennent-ils au niveau des régions ?

Chacun des clusters régionaux constitutifs d'Innov'Infra a des liens très étroits avec son territoire dans tous les domaines qui concernent le Génie Civil et les infrastructures : Travaux Publics, routes, canaux, travaux souterrains, aménagement du territoire...

Il regroupe des entités partageant la même vision du métier, capables de passer d'une région à l'autre, de recenser les projets chacune dans son secteur et d'en faire profiter les autres, offrant de très fortes capacités de mobilisation, en s'appuyant sur la vision nationale dont bénéficie l'Irex.

Quels exemples de réalisations pouvez-vous déjà mettre en évidence ?

Par nature, les clusters sont des organismes de spécialité, des écosystèmes territoriaux nés d'une spécialité territoriale. Par exemple, Indura, en

Auvergne - Rhône-Alpes, c'est plutôt la montagne et les fleuves, l'énergie de montagne. Dans les Pays-de-la-Loire, chez Novabuild, c'est plutôt l'aspect côtier qui domine. Il en est de même pour Odéys, en Nouvelle Aquitaine, auquel s'ajoutent les aménagements routiers et urbains. Avec Ecorse TP, en Bourgogne - Franche Comté, l'activité est très focalisée sur l'économie circulaire, notamment le recyclage sous toutes ses formes.

Les clusters ont des relations étroites avec les Régions administratives qui participent d'ailleurs pour une part importante au financement de leurs activités. Ils représentent toute la chaîne de valeurs, des laboratoires à l'industrie en passant par les centres techniques, les écoles et les centres de formation, les collectivités, les fédérations d'entreprise et d'ingénierie (FRTP et Syntec) ce qui en fait des outils agiles et transverses. Ce ne sont pas des syndicats professionnels ; leurs missions sont différentes, complémentaires pour une entreprise. Nous avons dans notre entreprise bien compris l'intérêt de cette complémentarité.

Je peux citer deux exemples : le projet national MURE, de "Multi-Recyclage des Enrobés Tièdes" et le projet national C2ROP, tous deux projets Nationaux administrés par l'Irex et qui ont eu des implantations d'actions fortes en région, dont AURA. Ces deux projets sont coanimés dans les Régions avec les clusters du hub Innov'Infra.

MURE vise principalement à répondre à deux questions en traitant tous les aspects : techniques, matériels, sanitaires, environnementaux, économiques, normatifs et réglementaires : la première question concerne la mise en œuvre conjointe du recyclage et de l'abaissement des températures de production des enrobés, les enrobés tièdes ; la seconde trouve son origine dans le fait que le recyclage commence à concerner des couches d'enrobés qui contiennent déjà des matériaux recyclés : combien de fois peut-on recycler sans altérer les performances d'usage des enrobés ? En traitant le sujet du multi recyclage à tiède des enrobés bitumineux le PN MURE contribue au développement de l'économie circulaire de la construction routière.



© ADOBESTOCK

12



© NOVABUILD

13



14
© ECORSE TP



15
© FNTP

11- Process Neolithé, labellisé Novabuild.

12- En traitant le sujet du multi recyclage à tiède des enrobés bitumineux, le Projet National MURE contribue au développement de l'économie circulaire de la construction routière.

13- Visite et démonstration de la navette autonome Navya de Nantes Métropole.

14- Lancement de Ecorse TP le 13 juillet 2021 avec Stéphanie Modde, Vincent Martin et Christophe Ribette.

15- L'équipe du hub Innov'Infra lors de son lancement en novembre 2019.

16- Visite de "Planète Recyclage", plateforme de recyclage des déchets de démolition de l'entreprise Charier, en partenariat avec Novabuild, une rencontre autour du recyclage des matériaux de déconstruction.

17- Visite du chantier de la Ligne B du métro de Rennes.

Depuis le début du projet, au sein de MURE, neuf chantiers de démonstration ont été réalisés. Leur évolution, tout au long de leur vie en service est une source unique de données et d'observations relatives à la durabilité des performances des enrobés multi-recyclés. Ce service s'achèvera bien après la fin du PN. C'est pourquoi les partenaires du projet se sont attachés à organiser des auscultations annuelles pendant plusieurs années après cette fin.

Jusqu'à présent tout va bien et aucun des chantiers dont le taux de recyclage est de 40 ou 50 % ne présente de dégradations anormales. Ce projet a produit 10 guides et recommandations à destination des professionnels de la filière.

Et C2ROP ?

Le projet C2ROP concerne les "Chutes de blocs, Risques Rocheux et Ouvrages de Protection". Il a pour objectif d'apporter des réponses concrètes et fiables à l'ensemble des acteurs concernés par la problématique des risques rocheux et des chutes de blocs. Projet fédérateur, C2ROP vise à rassembler l'ensemble des parties prenantes du secteur (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et bureaux d'études, entreprises de construction, industriels et sphère académique). Administré par l'Irex, le cluster Indura en assure une animation régionale en Auvergne-Rhône-Alpes. Ce projet intéresse tout particulièrement la SNCF, évidemment pour les zones alpines et montagneuses mais aussi pour les régions Bretagne et Norman-

die car il s'agit de territoires où la voie ferrée est fréquemment entre remblais sur des terrains propices aux effondrements et aux glissements de terrain. Ces deux projets nationaux émanent d'un travail avec les territoires.

Le secteur des Travaux Publics est très maillé, ce qui a deux conséquences. La première conséquence de ce maillage est que, lorsqu'une innovation voit le jour dans une entreprise, elle demeure souvent sur son territoire alors qu'elle pourrait en intéresser d'autres. L'entreprise n'a pas forcément la volonté ou l'intérêt de la transmettre. Par l'intermédiaire du hub, nous communiquons sur les innovations issues de nos adhérents. Une bonne réalisation novatrice peut ainsi être connue de tous nos membres.

Pour la deuxième conséquence, je prendrai l'exemple de la région Auvergne – Rhône-Alpes dans laquelle nous rencontrons régulièrement des problèmes au niveau des digues de canaux ou de rivières. À l'évidence, la connaissance technique des phénomènes d'érosion de berges se situe plutôt dans la région Nouvelle Aquitaine ou dans les Pays-de-La-Loire. Dans ce cas particulier, le hub permet l'essor d'une solution en mettant en relation les adhérents des différents clusters : Odéys ou Novabuild d'une part, et Indura d'autre part : celui qui porte la problématique peut trouver la solution chez ses partenaires. ▷

HUB INNOV'INFRA : LE BUREAU

Président : Pierre Rampa – (Indura – groupe Rampa)

Vice-Président : Jacques Roudier – (Irex)

Alain Denat – (Odéys – AD Urban Conseil)

Valery Ferber – (Novabuild – Charier)

Paul Galonnier – (Indura – Sitétudes)

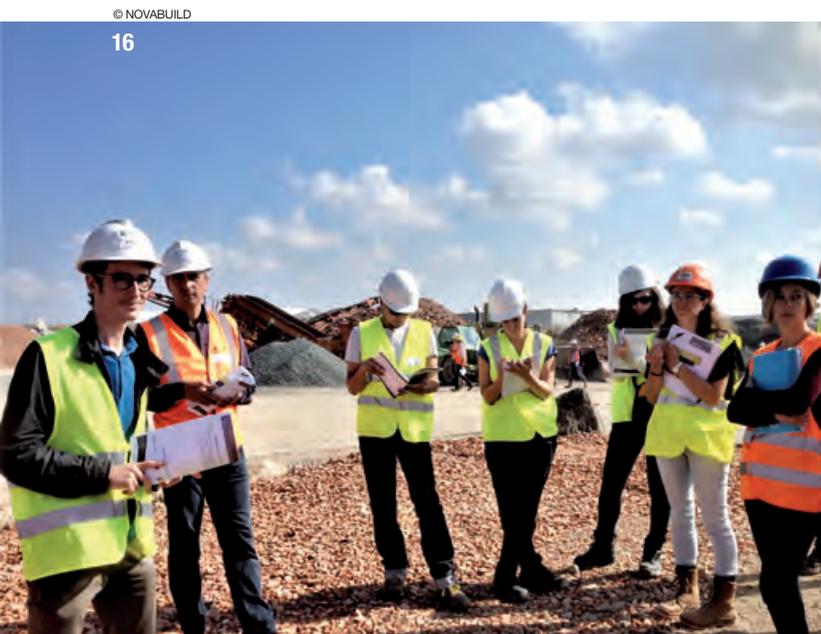
Mathieu Leclerc – (Novabuild – Artelia)

Xavier Neuschwander – (Irex – Consultant)

Philippe Pages – (Odéys – Eiffage Route)

Patrick Vaillant – (Ecorse TP – Cerema)

Christophe Ribette – (Ecorse TP-Groupe Roger Martin)



16
© NOVABUILD



17
© NOVABUILD

Innov'Infra joue et jouera encore plus dans ce cas un rôle de facilitateur et d'accélérateur.

Il peut en être de même lorsqu'il s'agit d'aider une entreprise à obtenir des financements publics.

Les clusters pratiquent une veille active sur les dispositifs de soutien au développement économique. Ces appels à projet (offrant souvent une aide en subside ou en avance remboursable) sont opérés par des organismes européens, nationaux ou régionaux.

Dans ce dernier cas, grâce à l'implication qu'ils ont avec leurs conseils régionaux respectifs, chaque cluster bénéficie d'une vision plus précise des opportunités à venir et également des objectifs recherchés sur le territoire : ils sont ainsi contributeurs de la spécificité régionale revendiquée par chacun de leurs territoires. Souvent, si l'entreprise n'est pas dotée d'une structure de recherche de financement, le hub offre des opportunités.

Quels sont les axes de communication déjà mis en place par Innov'Infra ?

Innov'Infra, a organisé dès 2020 et en 2021 deux cycles de "webinaires" sur des thèmes d'actualité. Il s'agit de conférences courtes, synthétiques, en visioconférence, qui, du fait de la crise sanitaire que nous avons vécue, ont remplacé les séminaires traditionnels.

Ceux organisés en 2021 avaient pour objectif de démontrer que le BIM est utilisable dès maintenant par tous sur des projets d'envergure tels que les infrastructures linéaires, les terrassements et l'aménagement du territoire. Parmi les thèmes traités : économie circulaire et déconstruction, des ponts pour franchir le cap du BIM,

CARACTÉRISER DES CIBLES À L'INTERNATIONAL

La présence française sur les salons est souvent encouragée ; la marque FrenchTech est d'ailleurs reconnue comme succès marketing important à l'international.

« *Notre filière présente des particularités à l'international, précise à ce sujet Pierre Rampa :*

- *La vente de service ou produits liés à la construction d'infrastructures ne se déroule pas sur des salons internationaux. La mise en concurrence passe par des appels à projet internationaux, législativement très encadrés ;*
- *Des mécanismes d'État (comme le FASEP) permettent souvent de mettre en avant la compétence française et de participer au financement des grands projets. Ils ont la réputation d'être réservés aux majors. Un travail d'information doit être fait auprès d'acteurs plus petits pouvant avoir une prétention internationale ;*
- *L'usage mondialement répandu au sein de la maîtrise d'ouvrage est d'attribuer des marchés principalement à des entreprises locales d'exécution (cette habitude est moins vraie au niveau des études de conception). Ainsi, l'internationalisation des entreprises passe principalement par de la croissance structurelle par acquisition.*

Chacun des clusters partenaires est encouragé par sa région à développer des actions à l'international. Ainsi le hub Innov'Infra sera le contact auprès des instances nationales afin de participer aux actions montées par les ministères auprès de gouvernements étrangers. Ceci permettra d'intégrer, dans les délégations, des acteurs du monde des infrastructures, complémentaires à ceux qui y participent régulièrement. »

grands linéaires et petits BIM, les terrassements en BIM : une solution d'avenir ?

D'autres documents sont disponibles en "replay" sur chacun des sites des partenaires et pour le hub : digitalisation et robotisation des chantiers par Sitech, actifs numériques et cybersécurité par ScredIN d'Ingérop, chantier connecté et cas d'étude par Arkance System (projet PORR en Roumanie), les bénéfices environnementaux du BIM Infra par vision setec.

18- Pitches de l'innovation Eco-chantiers, devenu Ecorse TP lors du carrefour des collectivités locales à Micropolis (Besançon) en octobre 2019.

19- Pierre Rampa : « La technicité et la technologie de la construction sont mal connues du public ».

En 2021, le hub a participé avec Indura et la FRTP AuRA des "Innov'Day TP Digital"⁽³⁾ sous forme de pitches vidéo de trois minutes consacrés à des innovations dans le domaine des infrastructures (transition numérique et robotique, sobriété énergétique, green technologie) dont les lauréats ont été désignés le 25 mai, parmi plus de 60 candidats. Autre événement de l'année : les Infra-BIM Open, qui compte tenu de la situation sanitaire, sont reportés du 10 au 12 janvier 2022 : ce congrès technique international consacré au BIM dans les infrastructures a eu lieu pour la première fois à Lyon après trois éditions en Finlande. Unique en son genre, il a mis en valeur le secteur économique des infrastructures en pleine mutation numérique.

Enfin, le hub a participé du 16 au 18 novembre 2021 derniers à la cinquième édition du symposium Rock Slope Stability, organisée dans le cadre du Projet National C2ROP (Chutes de Blocs, Risque Rocheux et Ouvrages de Protection), coorganisé avec Irex. Avec le hub Innov'Infra, nous mutualisons la recherche et l'innovation du génie civil français. Nous construisons ainsi les infrastructures du futur, respectueuses du développement durable. □

1- Projets FUI (Fond Unique Interministériel), PIA (Programme d'Investissements d'Avenir), ADEME, Région, européens, ...

2- Interreg est un programme européen visant à promouvoir la coopération entre les régions européennes et le développement de solutions communes dans les domaines du développement urbain, rural et côtier, du développement économique et de la gestion de l'environnement.

3- www.innovdaytp.com

4- https://www.novabuild.fr/sites/default/files/actualite/pdf/2020/03/guide_graves_recycles_2019_v5.pdf

5- <https://irex.asso.fr/le-rapport-dactivite-2020-est-en-ligne/>

© ECORSE TP

18



© EROLF PRODUCTION / VHERBULOT

19





BET Fluides¹

DPE²

AMO HQE³



Pompe à chaleur

Chauffe-eau solaire

Isolation thermique par l'extérieur



Isolation

Matériaux biosourcés

Chauffage & ECS⁴ à énergie renouvelable

L'Auxiliaire
accompagne
tous les acteurs de
**l'efficacité
énergétique.**
quels que soient leurs projets.

Retrouvez toutes nos solutions
d'assurance sur www.auxiliaire.fr

l'Auxiliaire
BTP
Entreprendre avec assurance

50, cours Franklin Roosevelt - BP 6402 - 69413 Lyon cedex 06

Tél : 04 72 74 52 52 - auxiliaire@auxiliaire.fr

Siret 77564905600014 - D 324 774 298 RCS Lyon - Code APE 6512 Z

Entreprise régie par le code des assurances - Société d'assurance mutuelle à cotisations variables

¹ Bureau d'études techniques - fluides / ² Diagnostic de performance énergétique

³ Assistance Maîtrise d'Ouvrage - Haute qualité environnementale / ⁴ Eau Chaude Sanitaire



1

© C.POWER / NICOLAS JOB

FEREC DÉVELOPPEMENT DURABLE, MUTATION DES BESOINS ET TRANSITION NUMÉRIQUE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

LA FONDATION FEREC A POUR OBJET DE CONTRIBUER AU DÉVELOPPEMENT DE LA RECHERCHE COLLECTIVE ET À SON TRANSFERT DANS LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION ET DES INFRASTRUCTURES DE GÉNIE CIVIL, DE PARTICIPER, AU TRAVERS DE PROJETS, À LA PROMOTION DES ACTIONS NATIONALES ET EUROPÉENNES, DE SOUTENIR ET FACILITER LA DIFFUSION DES NOUVELLES CONNAISSANCES ET NOUVELLES TECHNIQUES EN LIEN AVEC L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION, DE FAVORISER L'INFORMATION VERS LE PUBLIC. PHILIPPE RAFFIN, PRÉSIDENT DE LA FONDATION FEREC ET DOMINIQUE CHEVILLARD, SECRÉTAIRE GÉNÉRAL, FONT LE POINT SUR SES ACTIONS DEPUIS SA CRÉATION EN 2017.

Les Infrastructures de mobilité et de réseau constituent des éléments essentiels du cadre de vie des concitoyens, de l'attractivité des territoires et de la compétitivité des acteurs. Elles sont donc confrontées à des défis écologiques, numériques et économiques.

La fondation d'entreprise Ferec a pour objectif de favoriser l'innovation dans ces domaines.

Elle assure un soutien vers des actions de recherche collaborative sur des

thématiques d'actualité, via des appels à projets annuels, en suggérant par son aide l'investissement des acteurs.

Les projets lauréats sont ensuite invités à poursuivre dans des actions plus ambitieuses du type Projets Nationaux. « *L'un des objectifs de la Fondation, précise Philippe Raffin, est de générer des idées et solutions à des problématiques d'actualité que le conseil d'administration aura pu définir comme prioritaires en essayant de couvrir l'en-*

1- La fondation Ferec : des éléments de réponse aux défis écologiques, numériques et économiques.

semble des thèmes qui sont au cœur de l'activité de Travaux Publics : transition numérique, résilience, adaptation au changement climatique, économie

circulaire, intelligence appliquée à la maintenance et à l'acceptabilité des infrastructures... »

Les acteurs français du secteur des infrastructures ont un savoir-faire internationalement établi, acquis de longue date, dans le cadre d'une politique nationale d'ouverture à l'innovation associant les entreprises, les ingénieries et les maîtres d'ouvrages, dont l'État, longtemps le donneur d'ordre dominant. C'est dans la continuité de cette ouverture que s'inscrit la fonda-

tion, en accompagnant l'écosystème des acteurs de la construction des infrastructures face à leurs nouveaux défis.

« *Maintenir la technique française à son niveau dans la concurrence internationale nécessite un effort permanent et soutenu de recherche et d'innovations, ajoute Philippe Raffin. Cet effort est d'autant plus efficace qu'il est partagé entre les nombreux acteurs sous la forme d'une recherche collaborative, validée par des expérimentations de terrain et faisant évoluer en continu la "technique française" » pour les infrastructures.* »

Les infrastructures, dans leur conception, leur réalisation et leur exploitation, et, plus généralement, l'ensemble du secteur de la construction, sont concernés par les défis que sont :

- Le développement durable, avec ses économies de ressources et d'énergies, la lutte et l'adaptation au changement climatique, ainsi que la préservation de la biodiversité et des différents aspects du patrimoine technique et culturel ;
- Les changements des besoins des usagers liés à l'urbanisation, aux évolutions des territoires et de leurs interconnexions, ainsi qu'au vieillissement de la population ;
- La transition numérique.

Pour contribuer au renforcement de cette recherche collaborative, cinq acteurs ont décidé d'unir leurs moyens dans le cadre d'une fondation d'entreprise : Recherche collective pour la construction et les infrastructures (FEREC).



2

PHILIPPE RAFFIN : PARCOURS

Ingénieur en génie civil, diplômé de Polytech¹ Clermont-Ferrand et du Centre des Hautes Études de la Construction (CHEC), Philippe Raffin, a débuté sa carrière en 1989 chez Dumez en tant que responsable du bureau d'études structures en Arabie Saoudite puis directeur de travaux adjoint en France.

En 1995, il rejoint le groupe Colas en qualité de responsable études et méthodes au sein de la filiale réunionnaise GTOI.

En 1998, il est nommé Directeur technique bâtiment et génie civil à la direction régionale de l'océan indien.

Philippe Raffin rejoint le siège en tant que directeur technique bâtiment génie civil en 2007.

Depuis 2011, il a en charge le poste de directeur technique, recherche et développement du groupe Colas.

Membre au sein de plusieurs instances professionnelles dont l'IDRRIM, Route de France et l'Irex, il occupe les fonctions de co-président du Bureau de Normalisation des Transports, des Routes et de leurs Aménagements (BNTRA), ainsi que la présidence de Ferec.

2- Philippe Raffin, président de la Ferec.

3- La fondation favorise l'innovation dans le domaine des infrastructures de mobilité et des réseaux (chantier Eurovia).

C'est ainsi que la fondation a été créée fin 2017 par Colas, Eiffage, Eurovia, SNCF Réseau et Vinci Construction, rejoints en 2021 par TotalEnergies. Ferec tient quatre conseils d'administration par an visant notamment la définition des appels à projets à lancer. Cette définition est suivie par la sélection puis l'audition des lauréats ainsi que par l'attribution d'un parrain

à chacun d'eux. Ces parrains veillent à ce que chacun des projets s'inscrive dans une démarche collaborative et partagée. Tous les rapports de fin de projet sont rendus publics et mis à la disposition de la communauté sur le site de la fondation⁽¹⁾.

« *L'opération se déroule de la façon suivante, indique Dominique Chevillard : Si l'on prend, par exemple, l'appel en cours pour l'année 2021 : l'appel a été lancé début juin pour une réponse le 16 septembre ; une phase de pré-sélection est alors opérée ; un certain nombre de candidats est retenu puis une journée complète d'audition permet à chacun d'eux d'exposer l'objet de sa recherche et à quel titre elle est hautement collaborative ; enfin, une sélection définitive des projets est opérée. Est organisée ensuite une rencontre entre les lauréats de l'édition précédente et ceux de l'édition en cours vont présenter. À l'issue de cette rencontre, un communiqué de presse est diffusé sur le site de la Ferec, sachant que l'objectif final est de permettre aux projets lauréats de connaître un aboutissement concret.* »

Les origines des candidats sont de toute nature : entreprises, bureaux d'étude et d'ingénierie, universités, écoles et instituts, start'ups..., et les projets associent souvent plusieurs acteurs faisant perdurer ainsi les collaborations public/privé, gage d'efficacité dans le monde des infrastructures.

Des appels à projet sont lancés tous les ans afin de contribuer au financement et au développement d'idées novatrices de recherche et leur valorisation. ▷



© EUROVIA
3



© OXYGÈNE DRONE 4



5

© SGP / GÉFARD ROLLANDO



6

© EUROVIA



7

© MARC MONTAGNON



8

© SNCF RÉSEAU

APPEL À PROJETS 2018

Le premier appel à projets a été lancé en mars 2018 sur le thème : "Des innovations numériques pour la conception, la construction, l'évaluation et la maintenance des infrastructures". 38 dossiers ont été déposés. 9 d'entre eux ont bénéficié d'un financement de la fondation d'entreprise.

Les projets lauréats : CINC-RSF : Caractérisation des interfaces de structures de chaussées par technique radar à sauts de fréquence

Le projet porté par Xavier Derobert (Isttar) porte sur la caractérisation des

interfaces de chaussées avec un radar à sauts de fréquences (RSF) très haute résolution.

On se focalisera sur le développement de nouvelles méthodologies associées pour détecter les décollements d'interface entre la première et la deuxième couche des chaussées et pour estimer les épaisseurs des premières couches sans carottage. Un travail de développement outil sera initié pour une intégration multi-antennes au prototype RSF.

Deux expérimentations seront menées : la première sur le manège de fatigue de l'Isttar, la deuxième sur la base de dalles de chaussées contrôlées au Cerema.

4 à 8- La fondation Ferec a été créée fin 2017 par Colas, Eiffage, Eurovia, SNCF Réseau et Vinci Construction.

LOCA 3D : Outil de localisation 3D et classification des réseaux enterrés par radar à saut de fréquence multi-antennes (figure 12)

Le projet porté par Jean-Noël Gaudin (Cerema) s'inscrit dans une action plus globale de partenariat entre le Cerema, l'ESEO et l'entreprise Logiroad. Il porte

sur la contribution au développement d'une chaîne d'instrumentation innovante basée sur une technique radar à saut de fréquence (RSF) multi-antennes visant in fine à détecter et localiser en 3D et par différentes approches inverses les réseaux de canalisation enterrés. Il se positionne en phase amont d'une thèse Cifre que les partenaires ont lancé en 2019.

L'équipe Cerema-Logiroad optimisera ainsi une nouvelle chaîne d'acquisition (RSF + réseau d'antennes associé à un switch électronique) dont le principe sera validé sur des structures tests. Le projet a permis aux différents partenaires Cerema, ESEO et Logiroad de s'inscrire depuis 2019 dans une action

collaborative. Un contrat de thèse a été mis en place. Les travaux menés ont permis de poursuivre le développement de la chaîne d'instrumentation innovante autour de la technique RSF multi-antennes.

Le travail de développement s'est concentré également sur des méthodes de traitement innovantes permettant ainsi la constitution d'un premier prototype et la mise au point d'une méthodologie performante de détection, localisation et classification des réseaux enterrés.

Les premières évaluations in situ ont été lancées en 2020 sur la ville de Rennes, dans le cadre d'un projet "démonstrateurs industriels ville durable" lancé par Rennes Métropole et une expérimentation à l'échelle de quelques rues visant la cartographie en surface et en sub-surface de la chaussée.

AVUS : Augmented Visualisation of Underground Services

L'objectif de AVUS, porté par Sébastien Magnat (Eurovia), est la création d'une plateforme de modélisation et visualisation en temps réel des réseaux souterrains. En effet, à l'heure actuelle, il n'existe pas de technologie innovante qui permette de prévenir les facteurs de risque liés aux travaux à proximité de canalisations et réseaux enterrés.

BioBIM : Biodiversité, BIM et Infrastructures

Le projet porté par Sylvain Moulherat (Terroiko) vise à sensibiliser et informer les acteurs de la vie des infrastructures de transport en charge de la gestion environnementale sur les opportunités offertes par la transition numérique dans leurs activités.

MorphoPredict : Outils hybrides pour le monitoring et l'évaluation non destructive des Infra- structures

Morphosense (start-up du CEA-Leti disposant d'une technologie unique de monitoring de structures) et le Cerema se sont associés début 2018 pour le développement d'une technologie disruptive pour la maintenance prédictive des infrastructures vis-à-vis de la corrosion.

L'objectif de ce projet porté par Mikael Carmona (Morphosense) est de développer une technologie disruptive pour répondre à la problématique de maintenance prédictive.

© MARC MONTAGNON



9

DOMINIQUE CHEVILLARD : **PARCOURS**

Dominique Chevillard est ingénieur de l'école Centrale Paris (1989). L'essentiel de son parcours professionnel se situe dans des entreprises spécialisées dans le traitement de l'eau ou de l'air : ingénieur procédés à la direction de l'ingénierie chez Air Liquide (1989/1992), ingénieur projets, puis ingénieur commercial et marketing Europe chez Degremont (1992/1997).

Après un passage chez Elis, société de service, il rejoint en 1999 MPR Industries (machines pneumatiques rotatives industrielles) en tant que directeur commercial et marketing et directeur général adjoint.

Entre 2008 et 2012, Dominique Chevillard est directeur du développement commercial de G.Brière Pompes Broquet, concepteur et concepteur de pompes pour matières visqueuses.

De 2012 à 2017, il est directeur général de R&O Dépollution, concepteur et fabricant d'équipements pour le traitement des eaux résiduaires.

Après un an chez AD'Missions, en tant que responsable de l'accompagnement de PME à l'exportation, il rejoint la FNTP (Fédération Nationale des Travaux Publics) en 2018 en qualité de directeur technique et de la recherche.

9- Dominique Chevillard, secrétaire général de la Ferec.

10- Les cinq fondateurs ont été rejoints en 2021 par TotalEnergies.

TeD Infra : Du diagnostic à la gestion de patrimoine : optimisation des données pour Infrastructures linéaires

L'évaluation et la gestion des infrastructures linéaires (collecte, partage traitement et exploitation des données)



10

© MARC MONTAGNON

sous-exploite les nouvelles technologies elles-mêmes en constante évolution. Les difficultés trouvent notamment leur source dans le manque de registre commun du format et de la qualification des données en plus de leur interopérabilité. Ce projet porté par Yann Lefeuvre (Colas) en vise l'amélioration. L'objectif est de transférer une information exploitable rapidement.

Diagway Smart :

L'objectif de ce projet porté par Tien Sy Nguyen (Diagway) est de développer l'utilisation d'une solution à bas coût, à partir d'un smartphone, afin de collecter des données caractéristiques de l'infrastructure. Diagway Smart doit permettre aux gestionnaires visés d'avoir un état des lieux objectif et une gestion efficace du patrimoine comme cela peut l'être avec les moyens plus onéreux.

SWS : Smartvia Wireless Sensor

L'usure d'une structure de chaussée repose sur la fatigue des matériaux qui la composent. Lors du dimensionnement de la structure de chaussée, plusieurs hypothèses sont réalisées afin de prédire l'évolution des paramètres mécanique des différentes couches de matériaux dans le temps.

L'objectif de SWS porté par Kamal Barrada (Eurovia) est d'équiper les structures de chaussées neuves ou existantes avec un capteur permettant de remonter en temps réel la durée de vie résiduelle de la structure.

Outils Acquisitions Données : Améliorer la connaissance du patrimoine routier

Le département de la Haute-Garonne se place au 4^e rang des départements ayant le réseau routier le plus important à gérer. Ce réseau, majoritairement constitué de chaussées souples est donc extrêmement dense avec des voies aux fonctions très différentes, allant de la desserte de villages en montagne jusqu'aux différents accès de la métropole toulousaine.

L'objectif du projet porté par Erick Constensou (Conseil Départemental de la Haute-Garonne) est de développer une méthode d'acquisition de données de dégradation pour le réseau secondaire.

APPEL À PROJETS 2019

La Ferec a lancé son deuxième appel à projets en avril 2019 sur le thème "Résilience et acceptation : quels outils pour les infrastructures ?".



11

© FEREC

25 dossiers ont été déposés. 8 d'entre eux ont bénéficié d'un financement de la fondation. Prolonger la durée de vie des infrastructures tout en les adaptant à de nouveaux usagers et de nouveaux usages ; faire face à des perturbations accrues engendrées par le changement climatique, améliorer l'acceptabilité par les riverains, maintenir et transformer les infrastructures avec un minimum de perturbations sur l'exploitation sont autant de défis pour les maîtres d'ouvrages et toute la filière des acteurs intervenant sur les infrastructures.

D'où le besoin de développer des outils, des solutions ou des concepts innovants pour y répondre, en améliorant résilience et acceptation de ces infrastructures.

Les projets lauréats :

**GIR :
Gestion patrimoniale
des Infrastructures Routières
et gouvernance locale**

L'objectif de GIR est de comprendre les dynamiques sociales qui sous-tendent la gestion patrimoniale, produire une analyse sociotechnique et identifier les modes de gouvernance adaptés à la gestion locale du réseau, de la connaissance de l'état et des modalités de prise de décision jusqu'aux formes contractuelles à mettre en œuvre.

**MINE-BPL :
Monitoring Intelligent d'Infrastructures
sous Exploitation -
Ligne à grande vitesse Bretagne
Pays de Loire**

L'objectif de MINE BPL, porté par Juliette Blanc (Ifsttar) et Diego Ramirez

(Eiffage Infrastructures) est de développer une procédure de traitement automatique des données enregistrées sous le passage des TGV commerciaux. L'évolution des mesures dans le temps sera ensuite étudiée, Mine BPL pourra alors déterminer des paramètres clés pour le suivi de la voie, proposer des indicateurs de suivi et une instrumentation allégée. L'intérêt de ce projet est de proposer une solution de monitoring des voies LGV qui pourrait être utilisée par tous les gestionnaires.

**Road&Eau :
 Désimpermeabilisation
des surfaces revêtues,
enjeux et stratégies**

Le projet Road&Eau porté par Marie Colin (Cerema) a pour objectifs d'identifier les enjeux de la désimpermeabilisation des surfaces, de mettre en avant les bénéfices et limites et de proposer des pistes pour faciliter l'analyse des zones vulnérables et l'identification des solutions les plus pertinentes et aussi proposer une capitalisation des retours

d'expérience pour l'aide à la décision des constructeurs et collectivités dans un contexte budgétaire contraint.

**MARI-CC :
 Méthodologie d'Analyse de
la Résilience des Infrastructures
au Changement Climatique**

Les ouvrages de génie civil des infrastructures linéaires sont de plus en plus affectés par les effets du changement climatique. Ces événements doivent être pris en compte dans la stratégie

OBJECTIFS GLOBAUX DU PROJET LOCA_3D
PORTÉ PAR LE CEREMA

Engineering	Signal Processing	Software Development
<ul style="list-style-type: none"> Building Customized Multi Antenna Array Ultra wide band Step Frequency Radar 	<ul style="list-style-type: none"> Detection of the utility pipes Estimation of medium properties Estimation of depth Estimation of diameter 	<ul style="list-style-type: none"> Real time acquisition and 3D visualization Post Signal Processing

12

© CEREMA

11- Les lauréats 2019. De gauche à droite : Louis Janodet (Egis), Dominique Allagnat (Egis), Pascal Di Maiolo (Irstea - représentant Corinne Curt), Marie Colin (Cerema), Jean-Luc Dabert (APRR), Diego Ramirez (Eiffage Infrastructures), Juliette Blanc (Ifsttar), Maxime Velay (Resallience), Karim Selouane (Resallience), Michaël Gonzva (Resallience), Camille Vignotte (Resallience) et Pierre-Allain Duvillard (laboratoire Edytem).

12- Objectifs globaux du projet LOCA_3D porté par le Cerema.



13
© VINCI CONSTRUCTION



14
© MARC MONTAGNON

de maintenance des ouvrages. L'objectif du projet MARI-CC, porté par Louis Janodet (Egis), Jean-Luc Dabert (APRR) et Dominique Allagnat (Egis) est de proposer un outil simple d'analyse de la vulnérabilité géotechnique des ouvrages puis de définir des actions pratiques et chiffrées en matière d'Asset management. Basé sur le retour d'expérience d'Egis (RIMAROCC ou ROADAPT) et de gestionnaires, l'outil proposé permettra d'adapter au contexte local français, et de manière pratique, les recherches déjà réalisées à un niveau international.

STAAF :
Stratégies d'Adaptation pour les infrastructures construites sur le permafrost dans les Alpes Françaises (figures 16a et 16b)

Dans le contexte de réchauffement climatique, la haute montagne alpine est affectée par des changements majeurs tels que la dégradation du permafrost (réchauffement des terrains gelés en permanence). Celle-ci peut déclencher des mouvements de masses rocheuses à l'origine d'un risque direct de déstabilisation pour les infrastructures (refuges, remontées mécaniques). Ce projet porté par Pierre-Allain Duvillard (Edytem) vise à développer une meilleure connaissance et un meilleur suivi des terrains supports afin d'aider les gestionnaires.

CAAIRN :
Démarche de Caractérisation et d'Amélioration de l'Acceptabilité des Infrastructures par les Riverains (figures 19 et 20)

Le projet CAAIRN, porté par Corinne Curt a permis de développer des

13- La première structure imprimée en 3D, précontrainte et végétalisable à destination des opérateurs télécoms et des collectivités territoriales, en cours de construction (XtreeE / Vinci Construction).

14- L'une des toutes premières stations TotalEnergies équipée de bornes de recharge électrique rapides à Paris-La Défense.

15- Screenshot detection (EASY-DD).

démarches de caractérisation et d'amélioration de l'acceptabilité des infrastructures par les riverains. « *Au cours de ce projet nous nous sommes plus particulièrement penchés sur les infrastructures de gestion des inondations et des eaux pluviales urbaines. Les travaux ont permis plusieurs avancées et proposent des éclairages nouveaux sur la question de l'acceptabilité des infrastructures. Les résultats sont le fruit d'un travail interdisciplinaire mobilisant de concert : l'aide à la décision, la géographie, la psychologie, les sciences de gestion et la sociologie. Certaines des productions n'ont été possibles que grâce à l'accueil et la forte mobilisation de plusieurs collectivités et d'habitants volontaires.* »

Plus spécifiquement, dans l'Action 1, des freins et des leviers jouant dans l'acceptabilité d'infrastructures ont été

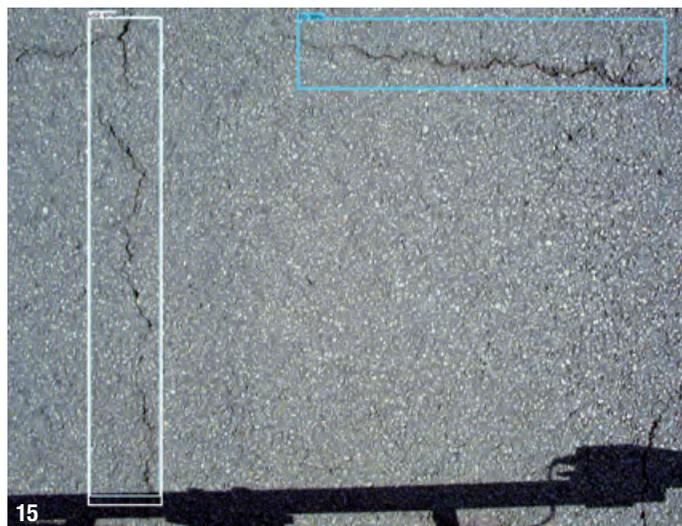
identifiés, au travers de la littérature grise et de la littérature scientifique, à tous les stades de la vie des ouvrages. Les travaux de l'Action 2, centrés sur le cas de deux infrastructures situées dans la ville de Vitrolles, ont montré que les modes d'appropriation que les habitants et usagers interrogés ont de ces deux ouvrages s'accordent de façon cohérente avec la façon dont ils vivent et habitent leur ville.

L'Action 3 a proposé une approche originale, basée sur l'approche d'argumentation abstraite, pour formaliser et analyser les controverses autour de projets d'infrastructure.

En se basant sur le cas de la requalification de l'avenue de Marseille située à Vitrolles, l'application de cette approche a permis d'acquérir des connaissances supplémentaires sur les débats liés à un projet d'infrastructure et ainsi de mieux comprendre les enjeux de l'acceptabilité des infrastructures.

L'Action 4 a permis d'identifier les caractéristiques pertinentes de trois territoires pour ce projet et leur mode de communication interne et externe.

« *Nous avons aussi mis en évidence que chaque métropole a son identité propre et a mis en œuvre des actions phares. La communication est abordée selon quatre strates : une communication interne très forte avec la volonté de changer d'abord en interne ; une forte communication des collectivités avec les aménageurs et entre collectivités avec une visée d'abord technique mais également de sensibilisation et d'éducation ; une communication vers le grand public dans des réunions institutionnelles, d'incitation et de participation,* ▽



15
© UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

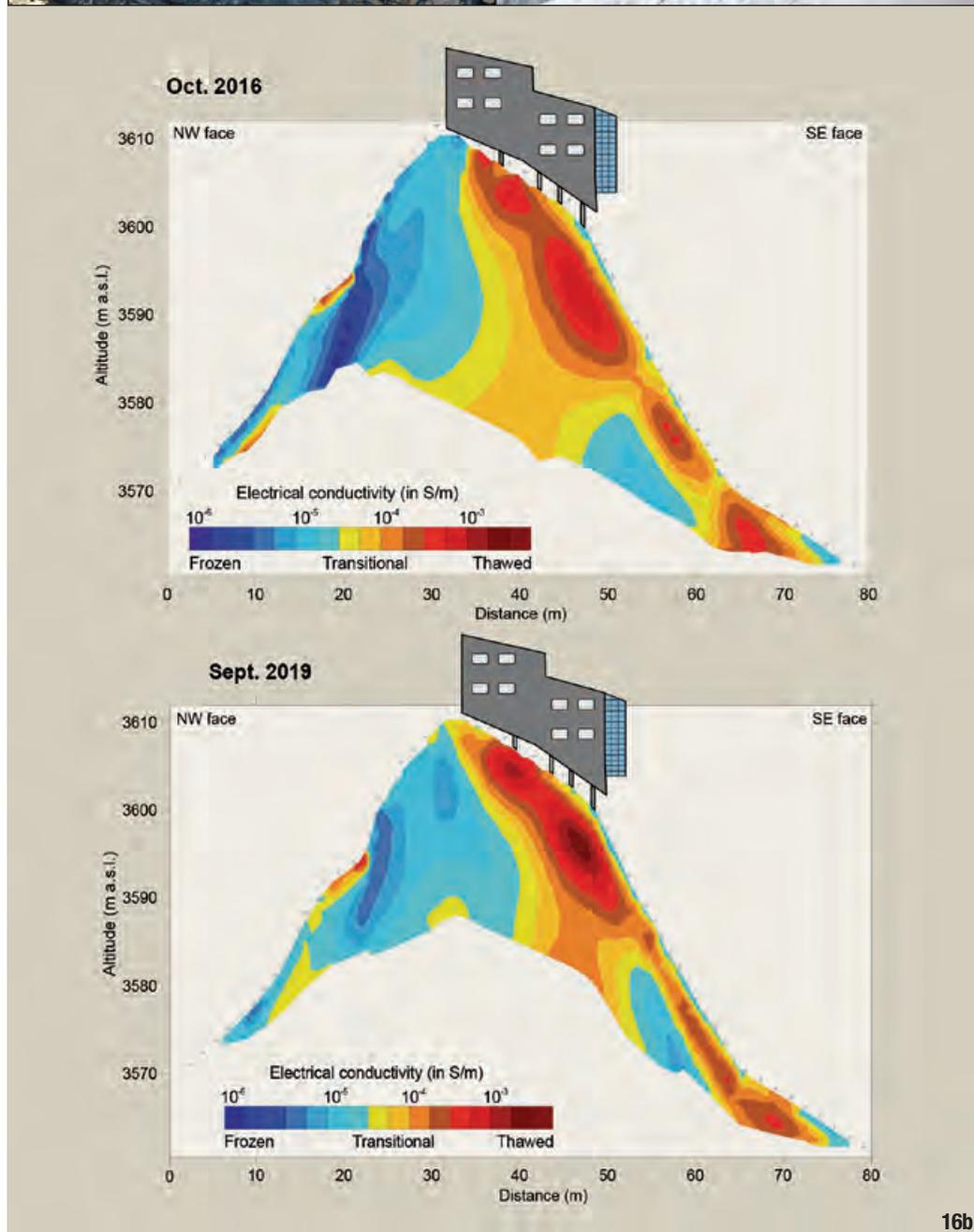
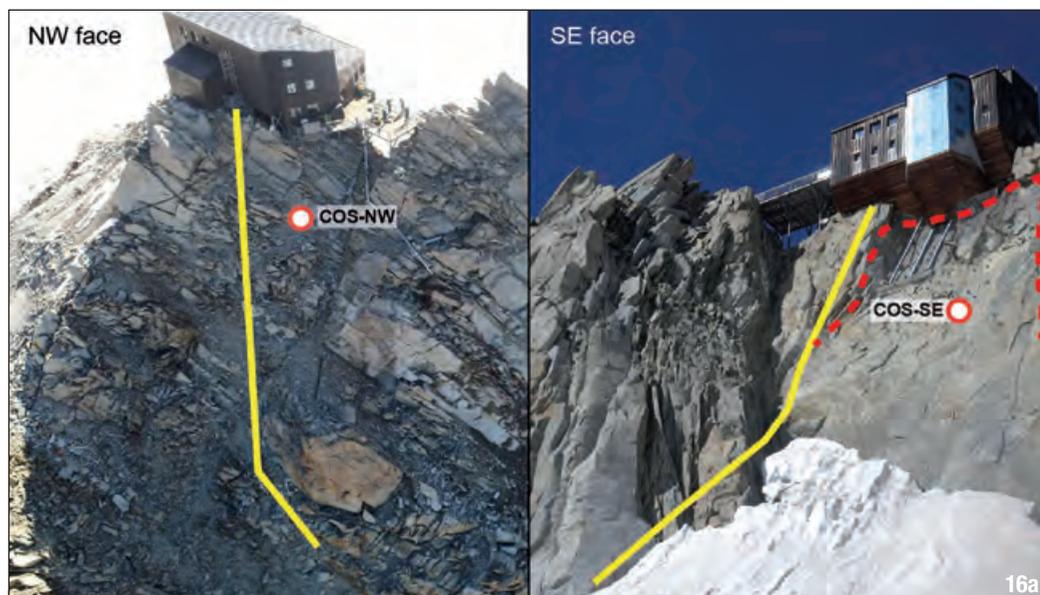
16a- Localisation des capteurs de température et du profil ERT sous le refuge des Cosmiques. Les étiquettes COS-NW et COS-SE indiquent la position du capteur de température. La ligne jaune montre la position du profil géophysique tandis que la ligne pointillée rouge souligne la position de la cicatrice de l'éboulement de 1998 (STAAF).

16b- Tomographie de conductivité électrique (en S m⁻¹) de l'arête rocheuse sous le refuge des Cosmiques en 2016 et 2019. Les couleurs froides sont utilisées pour le bas des valeurs de conductivité présumées correspondre à la masse rocheuse subissant des conditions de gel. Les couleurs chaudes correspondent à la masse rocheuse au-dessus du point de congélation.

un rôle plus indirect de la recherche qui, selon les disciplines, va interroger et ainsi informer les usagers mais diffusera dans un cercle réduit. »

**RESALLIENCE (RERSILIGIS) :
Approche inclusive de dialogue
et d'aide à la conception,
la construction et l'exploitation
des infrastructures de mobilité
face au changement climatique**

Ce projet porté par Karim Selouane et Michaël Gonzva (Resallience) ainsi que Maxime Velay (ingénieur d'étude résilience), a porté sur le développement d'une démarche collaborative à destination des citoyens et des entreprises. Il s'agit d'émettre des recommandations et prescriptions d'adaptation aux nouveaux usages liés au changement climatique. Un éco-pont au niveau d'une infrastructure autoroutière a été étudié comme terrain d'expérimentation. La démarche développée a permis d'analyser l'intégration des enjeux de rési-



16a

16b

lience et d'adaptation au changement climatique au projet via la concertation entre parties prenantes spécifiquement sur ces deux thèmes. Un ensemble de bonnes pratiques a été défini.

DVDC :

Durée de Vie Des Chaussées

Dans le cadre du projet national "durée de vie de chaussée", la Ferec apporte son soutien aux actions de communication et de diffusion des résultats obtenus dans le projet national de recherche collaboratif DVDN qui vise à optimiser la planification et le dimensionnement des chaussées ainsi qu'à développer des méthodes de qualification de leur état et de leur durée de vie.

APPEL À PROJETS 2020

La Ferec a lancé son troisième appel à projets en 2020 sur le thème : "Intelligence artificielle (IA) appliquée aux infrastructures en service".

28 dossiers ont été déposés. 10 lauréats ont été récompensés pour favo-

FEREC : CONSEIL D'ADMINISTRATION

COLLÈGE DES FONDATEURS

- **Président : Philippe Raffin (Colas).**
- **Vice-président : Laurent Boutillon (Vinci Construction).**
- **Trésorier : Gilles Saussine (SNCF Réseau).**
- **Administrateurs : Sophie Biré (TotalEnergies), Christian Clergue (Eiffage), Ivan Drouadaine (Eurovia Vinci).**

COLLÈGE DES PERSONNALITÉS QUALIFIÉES

- **Jacques Roudier (Président de l'Irex, Institut pour la Recherche et l'Expérimentation en Génie Civil).**
- **Lionel Moulin (Adjoint au chef de service CGDD/DRI/SR, Ministère de la Transition Écologique et Solidaire).**
- **Dominique Jaumard, (Directeur général adjoint en charge de l'aménagement du territoire au Département de l'Hérault).**

stratégies d'exploitation et de maintenance des infrastructures de mobilité prennent de plus en plus d'importance dans des pays comme le nôtre qui disposent d'infrastructures développées mais anciennes dont l'entretien, voire l'allongement de la durée de vie, sont essentiels. Ces stratégies peuvent être améliorées par la mise en œuvre de nouvelles méthodes de recueil d'informations, de traitement des données d'exploitation, d'instrumentation et d'auscultation ; elles permettent en effet de disposer d'un grand nombre de données sur les infrastructures dont il importe de tirer au maximum parti. »

L'objet de l'appel à projets est donc de soutenir le développement de concepts, de solutions et d'outils innovants mobilisant les apports des sciences des données et de l'apprentissage automatique (machine learning) mis au service des infrastructures de mobilité et de leur empreinte environnementale.

Les projets lauréats :

ADOUCIR :

Aide au Diagnostic d'Ouvrages par Couplage d'Images et Radar

Le projet porté par Philippe Foucher (Cerema) vise à explorer l'utilisation de l'intelligence artificielle pour détecter la présence de fissures sur les ouvrages en béton tout en analysant la structure interne afin d'identifier et classifier les causes de ces désordres. La faisabilité d'une telle approche sera étudiée à la fois en termes d'acquisition avec l'utilisation conjointe d'images visibles et radar à partir de capteurs montés sur drone et en termes de traitement avec l'emploi de techniques d'apprentissage automatique.

CORRELTEMP :

Modèle de réaction à la température pour les infrastructures

Le monitoring de l'état de santé des infrastructures est utilisé pour en assurer la sécurité, en prolonger la durée de vie et en maîtriser les coûts d'exploitation en les anticipant.

On recherche dans les mesures d'éventuelles anomalies de comportement ou signes de vieillissement, qu'il convient de dissocier des variations réversibles et souvent non significatives liées à la température. Le réchauffement climatique renforce ce besoin.

L'objet de CORRELTEMP, porté par Martin Beth (Sixense Monitoring) est de tester les fonctionnalités modernes d'intelligence artificielle pour isoler de manière quantifiée et systématique l'effet de la température dans les mesures. ▷

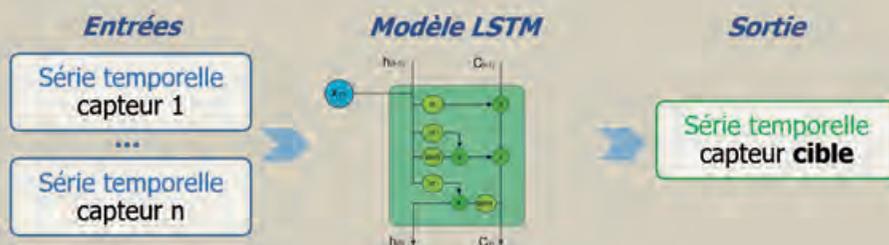
17- Démarche d'utilisation des modèles LSTM (MAADISON).

18- Exemple de mise en évidence d'une anomalie à l'aide d'un modèle prédictif par modèle LSTM (MAADISON).

riser l'innovation dans le domaine des infrastructures de mobilité et des réseaux.

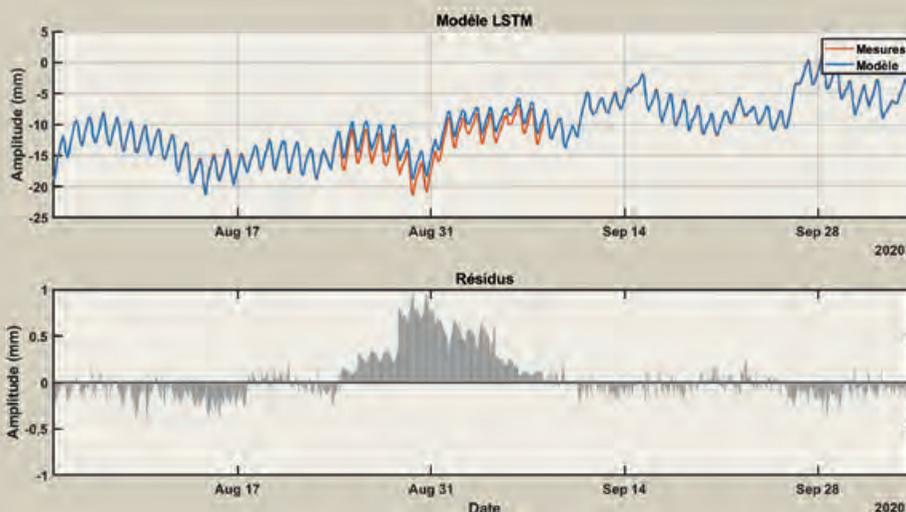
Le développement de "l'intelligence artificielle" (IA) fournit des possibilités technologiques nouvelles pour récupérer, collecter, traiter et exploiter des grandes masses de données, y compris avec l'apprentissage automatique. Philippe Raffin de préciser : « Les

DÉMARCHE D'UTILISATION DES MODÈLES LSTM (MAADISON)



© SITES
17

EXEMPLE DE MISE EN ÉVIDENCE D'UNE ANOMALIE À L'AIDE D'UN MODÈLE PRÉDICTIF PAR MODÈLE LSTM (MAADISON)



© SITES
18

**DEGRE :
Détection Et Géoréférencement
Réseaux Enterrés**

Le géoradar est l'une des techniques les plus utilisées pour la détection des réseaux enterrés.

Lors de l'appel à projet FEREC 2018, une chaîne d'instrumentation innovante basée sur une technique radar à saut de fréquence multi-antennes a été développée permettant d'obtenir une information 3D. Cette chaîne d'acquisition permet d'acquérir rapidement des volumes de données importants. Il devient difficile de traiter d'aussi grand jeux de données manuellement. Le but de ce projet, porté par David Guilbert (Cerema) consiste donc à développer des outils automatiques de détection et de géoréférencement pour mieux cartographier les réseaux enterrés.

**EASY-DD (AI) :
Economical and Automated
Survey for Distresses Detection
on Airfield pavement with
Artificial Intelligence (figure 15)**

Les gestionnaires aéroportuaires s'orientent de plus en plus vers des solutions automatisées pour le relevé des dégradations sur les chaussées aéronautiques.

L'automatisation des relevés présente en effet plusieurs avantages tant par rapport aux contraintes d'exploitation que par rapport à la qualité des données collectées.

Plusieurs méthodes issues de l'IA sont susceptibles de renforcer cette automatisation.

Le projet EASY-DD (AI), porté par Michael Broutin (Service Technique de l'Aviation Civile) vise à coupler ces méthodes avec des moyens de relevé peu onéreux, pouvant en conséquence être réalisés plus fréquemment, et à évaluer expérimentalement leur apport pour la détection et la classification des dégradations sur des chaussées aéronautiques.

**MAADISON :
Modèles par Apprentissage
Automatisés pour la Détection
des Irrégularités lors de la Sur-
veillance des Ouvrages Névrals-
giques (figures 17 et 18)**

Porté par Nicolas Manzini, MAADISON est un projet de recherche collaboratif regroupant l'entreprise Sites, l'Université Gustave Eiffel, l'IGN et le Cerema. Il porte sur l'utilisation de modèles prédictifs réalisés par apprentissage entre les différents capteurs d'une instru-

mentation pour la détection de comportements inconnus et potentiellement anormaux, et propose une approche basée sur le croisement de différents modèles générés automatiquement pour la localisation des anomalies parmi les capteurs en place.

À ce stade, les travaux conduits jusqu'à présent ont permis d'identifier les réseaux de neurones type LSTM comme un outil efficace pour la modélisation des données sur ouvrage entre capteurs. Ces modèles ont été générés sur différents types d'ouvrages et d'instrumentations.

Les travaux ont également permis de proposer une démarche d'analyse, reposant sur la détection de "change points" couplée à une batterie de tests statistiques, pour identifier de potentielles anomalies.

**MorphoIA :
IA et Digital Twin au service
de la maintenance prédictive**

Afin de réduire les coûts de maintenance et de maintenir l'accès aux structures qui voient leur durée de vie prolongée, le projet MorphoIA porté par Anaïs Milhiet (Morphosense) est de combiner l'IA et le Digital Twin pour détecter de manière automatique toute anomalie et prédire le comportement de la structure face à un changement

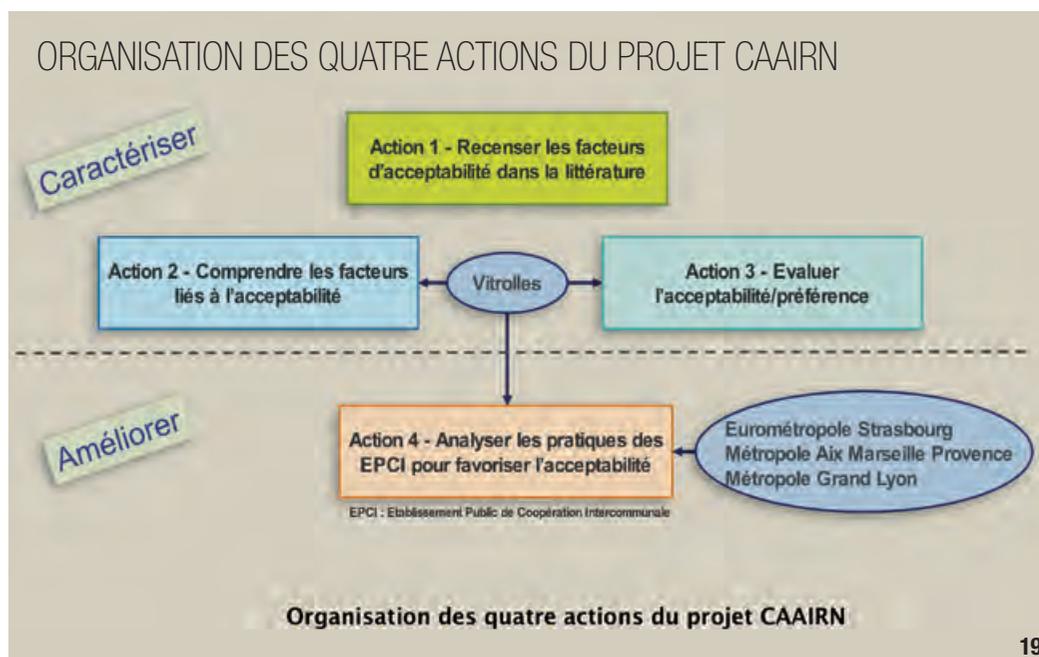
structurel ou contextuel. L'approche est de fusionner des données hétérogènes via le système Neuron de Morphosense mesurant la réponse mécanique de la structure inter-opéré avec une station météo, une caméra et un drone. L'objectif est de cataloguer toutes les sources de sollicitation puis de les classer et de détecter de façon automatique les anomalies et de prédire leurs effets sur la structure.

**OCAPI :
Observations de la biodiversité
par des CAMéras Plus
Intelligentes**

À l'heure du développement des infrastructures connectées, le projet OCAPi porté par Sylvain Moulherat (Terroiko) ambitionne d'étendre les usages des caméras déployées sur les infrastruc-

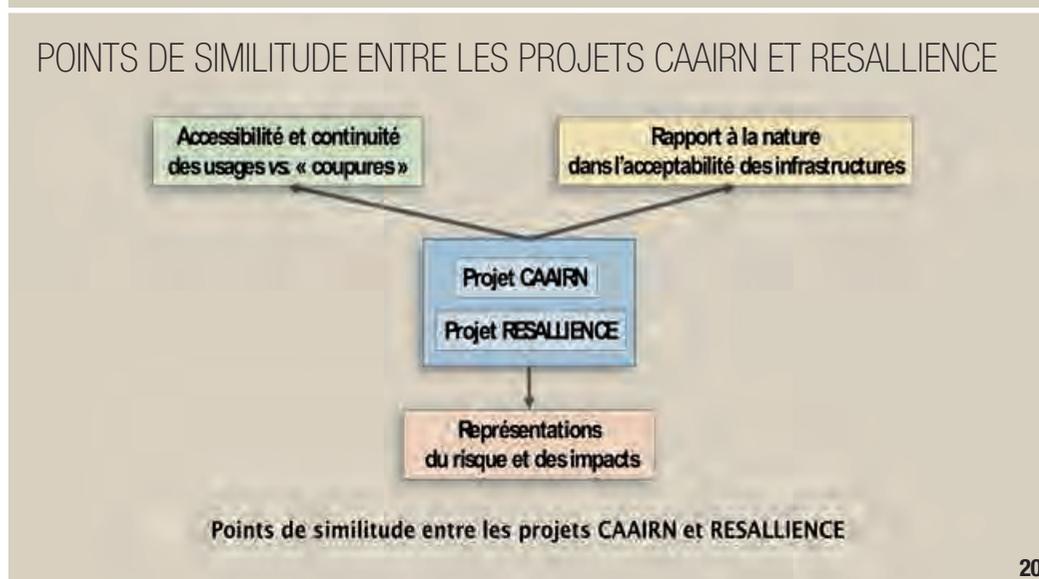
**19- Organisa-
tion des quatre
actions du projet
CAAIRN.**

**20- Points de
similitude entre
les projets CAAIRN
et Resallience.**



19

© CAAIRN



20

© LIANIE-CR

tures existantes à la gestion de la biodiversité aux abords des infrastructures dans le cadre de la gestion des risques associés aux collisions et au suivi d'efficacité des mesures environnementales.

RINA : Démonstrateur de l'utilisation de l'Intelligence Artificielle pour une gestion opérationnelle des Risques Naturels d'origine géologique

Le projet RINA porté par Marie-Aurélié Chanut (Cerema) propose d'étudier la faisabilité de l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) dans le contexte des risques géologiques. Sur des sites tests instables, des données de natures différentes (données ponctuelles de déplacements, mesures de bruit sismique, nuages de point de surface, données de température et de précipitation) seront analysées à l'aide des outils mis à disposition par l'intelligence artificielle. L'objectif est de proposer une puissante aide à la décision aux exploitants des réseaux routiers et ferroviaires.

Smart TCscan : Évaluation intelligente, à grand rendement et non destructive des caractéristiques de collage dans les chaussées

Le projet porté par Amine Ihamouten (Université Gustave Eiffel) concerne l'évaluation in situ et la classification des couches d'accrochage dans les chaussées par imagerie électromagnétique (EM), basées sur un traitement hybride par intelligence artificielle/inversion de formes d'ondes.

Les résultats de détection et de classification des algorithmes seront traduits en termes de probabilité d'existence



© SGP / GÉRARD ROLLANDO

21- En matière de béton, il y aura un avant et un après Grand Paris Express. Jusqu'à présent, pour construire les voussoirs, on utilisait le béton armé. Depuis 2020, sur la ligne 16, 4 km de tunnel ont été conçus en béton fibré et c'est un déploiement bien plus important qui est prévu compte tenu des derniers marchés attribués.

22- Après une participation au PN de Multi Recyclage des enrobés, ATMB (Autoroutes et Tunnel du Mont-Blanc) réalise un retraitement en place des chaussées avec Colas en utilisant Novacol, un procédé à l'émulsion de bitume, technique permettant de réduire l'empreinte environnementale du chantier.

et de localisation d'anomalie à partir d'une gamme très étendue de données contrôlées en laboratoire et sur sites tests.

LIANE-CR : analyse croisée des méthodes mises en œuvre et des résultats obtenus au cours des projets CAAIRN et Resalliance

En complément des productions propres à chaque projet, et suite à des discussions avec le parrain respectif des projets, la fondation Ferec a accepté de financer une analyse croisée des méthodes mises en œuvre et des résultats obtenus au cours des projets CAAIRN et Resalliance ; cette analyse a pour acronyme LIANE-CR. Elle vise à mettre en perspective les apports et ajoute ainsi une valeur supplémentaire aux apports réalisés individuellement dans le cadre des deux projets.

Du point de vue méthodologique, les deux projets mettent en œuvre des techniques d'enquête et d'analyses variées auprès des habitants et des services gestionnaires qui pourront venir enrichir les futurs travaux de chaque équipe : d'une part, par la réalisation d'interviews et la mise en œuvre de la

méthode argumentative pour l'équipe Resalliance et d'autre part, par la prise en compte de l'évolution des paramètres climatiques pour l'équipe CAAIRN.

APPEL À PROJETS 2021

L'appel à projets 2021 lancé par la Ferec porte sur le thème : "des méthodes et des indicateurs pour guider les acteurs de la construction".

La décarbonation du secteur des infrastructures (transport, génie civil, réseaux, ...) est une priorité pour les acteurs publics de l'ingénierie et de la construction. Le secteur représentant 54% des émissions de GES en incluant l'ensemble du cycle de vie, matériaux, construction, maintenance, y compris l'usage qui représente à lui seul près de la moitié des émissions de la France (étude FNTP 2021).

L'économie circulaire, qui qualifie le progrès environnemental en soulignant les aspects géographiques et la valeur des ouvrages et objets, est d'introduction plus récente : elle doit aussi devenir opérationnelle et permettre de définir des critères quantitatifs pour les choix d'investissements.

Pour apprécier la performance des projets et des techniques par rapport aux deux objectifs mentionnés ci-dessus, l'analyse du cycle de vie (ACV), avec son approche multicritère, est utilisée, à travers les déclarations environnementales des produits, les éco-comparateurs et les travaux académiques du secteur. Cependant, cet outil, reconnu sur le plan scientifique, ne répond pas très complètement aux étendues de la filière sur l'économie circulaire ; il est aussi insuffisamment investi par les acteurs opérationnels de la filière, et doit progresser pour son application contractuelle.

« L'appel à projets de la Ferec pour l'année 2021, précise Dominique Chevillard, porte donc sur des projets visant à développer des études, des méthodes et des indicateurs permettant aux acteurs d'y analyser divers aspects de l'empreinte environnementale des solutions techniques, et en priorité les émissions de GES et la circularité, et permettant d'identifier les leviers principaux de la filière dans un objectif de décarbonation et de transformation vers une économie circulaire. »

Avec l'ensemble de ses actions, la Ferec peut s'affirmer comme l'une des pièces maîtresses du "puzzle" de l'innovation dans les Travaux Publics. □



© OXYGÈNE DRONE

1 - <https://fondation-ferec.fr/fondation/>



1- Déblais de l'ouvrage OAB.

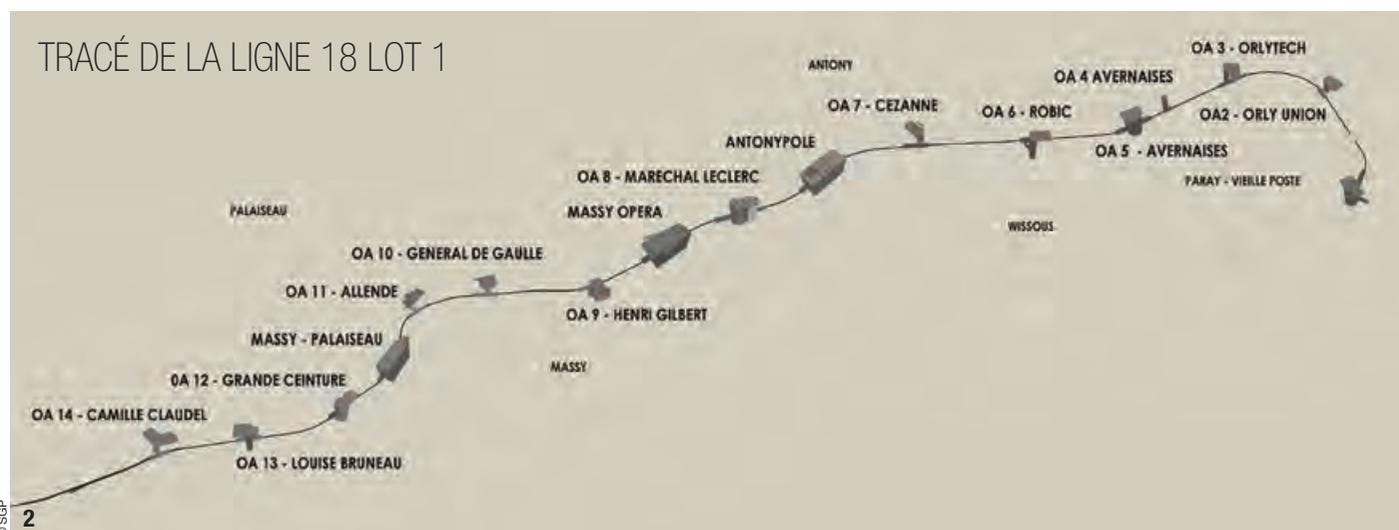
1- Excavated material from structure OAB.

© SGP

MARCHÉ DE GÉNIE CIVIL DE LA LIGNE 18 DU GRAND PARIS EXPRESS - GESTION INNOVANTE DES DÉBLAIS PAR QUICK SOIL ANALYSIS

AUTEURS : HERVÉ NABONNAND, DIRECTEUR DE PROJET, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - JÉRÉMY SUCRET, CHEF DE SERVICE TRAVAUX, NAVARRA TS

LES TRAVAUX DU GRAND PARIS EXPRESS REPRÉSENTENT, SUR UNE DURÉE D'ENVIRON 15 ANS, LA CRÉATION DE 200 km DE NOUVELLES LIGNES DE MÉTRO DONT 85 % EN SOUTERRAIN QUI VONT GÉNÉRER ENVIRON 45 MILLIONS DE MÈTRES CUBES DE DÉBLAIS. LA LIGNE 18, ENTRE ORLY ET PALAISEAU EST À L'ORIGINE DE L'EXTRACTION DE 1,2 MILLIONS DE m³ DONT 770 000 m³ ISSUS DES TUNNELIERS SUR UNE PÉRIODE DE 24 MOIS DE TRAVAUX. CES FLUX IMPORTANTS DE DÉBLAIS ET LES CAPACITÉS RESTREINTES DE STOCKAGE ONT CONDUIT L'ENTREPRISE DE TRAVAUX À METTRE EN PLACE DE NOUVEAUX OUTILS ANALYTIQUES PERMETTANT UNE GESTION OPTIMALE DES ÉVACUATIONS.



INTRODUCTION

Le premier tronçon de la Ligne 18 s'étend du puits situé au niveau de l'aéroport d'Orly, jusqu'aux tranchées de Palaiseau incluses (figure 2). Il comprend :

- Un tunnel foré de 11 400 m ;
 - Une tranchée de 800 m ;
 - Le gros œuvre de 3 gares souterraines (Antony, Massy Opéra, Massy Palaiseau), la gare d'Orly faisant partie d'un autre marché ;
 - 13 ouvrages annexes y compris leur aménagement intérieur et les rameaux de connexion au tunnel.
- Le tracé traverse la zone aéroportuaire

2- Tracé de la Ligne 18 Lot 1.

2- Alignment of Line 18 Lot 1.

d'Orly et des secteurs densément urbanisés. Il passe également sous plusieurs autoroutes (A6, A10, A126) et sous des voies ferrées SNCF. Ce tronçon de la Ligne 18 comprend deux tirs de tunneliers qui creusent, sur un diamètre de 9,15 m, environ 12 km

de galeries réparties de la façon décrite ci-après (figure 3).

Le TBM1, entre l'ouvrage annexe OA8 (puits central en bi-lobes) et l'OA1 (Orly), creuse en mode pression de terre (EPB) sur environ 6 km à une vitesse moyenne de 14 m/j. Ce tunnelier sera amené à traverser principalement les 3 formations géologiques suivantes : Marnes de Pantin et d'Argenteuil, Masses et Marnes du Gypse et Argiles Vertes (figure 1).

Le TBM2 adapte son mode de creusement en fonction des formations géologiques rencontrées. Entre la tranchée couverte et l'ouvrage annexe OA12,

situé à Massy, il sera configuré en mode densité variable afin de traverser une formation géologique d'Argiles à Meulière et de Sables de Fontainebleau (figure 4).

Ensuite, le tunnelier TBM2 est reconfiguré en pression de terre à partir de l'ouvrage annexe OA12 jusqu'à l'OA8, et traversera des formations géologiques de type Argiles Vertes et Marnes d'Argenteuil (figure 5).

CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Les matériaux excavés sortant d'un site sont soumis à la réglementation sur les déchets.

Par conséquent, ils doivent être caractérisés, c'est-à-dire analysés selon une liste d'une cinquantaine de paramètres chimiques. Les résultats de ces analyses sont comparés à des seuils définis a minima par un arrêté sur les Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI- arrêté ministériel du 12/12/2014) et le cas échéant aux seuils d'acceptation dans les installations de stockage définis par des arrêtés préfectoraux spécifiques selon la typologie de pollution acceptée.

Le réemploi sur site, et de surcroît la réutilisation hors site, nécessitent également la vérification de la compatibilité des terrains avec l'usage futur et/ou le fond géochimique des terrains, c'est-à-dire les teneurs en différents composés - métaux et sels - naturellement rencontrés dans les terrains.

Dans le cas des déblais de tunneliers (dits marins), le réemploi et la réutilisation de ces matériaux n'est pas possible pour plusieurs raisons : flux important, teneur en eau, caractéristiques géotechniques faibles...

Les marins sont donc le plus souvent directement évacués vers des installations de stockage.

CARACTÉRISATION DES DÉBLAIS

Les déblais sont caractérisés préférentiellement avant l'excavation pour minimiser le stockage et ainsi évacuer les déblais sans stockage temporaire sur chantier (figure 6). Les capacités de stockage sont limitées par les emprises de chantier, peu étendues, et une coactivité forte entre les différents corps de métier.

Les ingénieurs chargés des déblais préparent les méthodes de caractérisation. Les sondages sont calibrés sur des échantillons caractéristiques d'un volume de 200 m³ de déblais (exigence du marché de représentativité des analyses).



3 © SGP

Les plans de caractérisation prennent en compte le passif environnemental éventuel du site afin, le cas échéant, de compléter le programme analytique et ajouter des sondages. Ces suppléments permettent de délimiter les zones de pollution anthropiques (activité humaine historique).

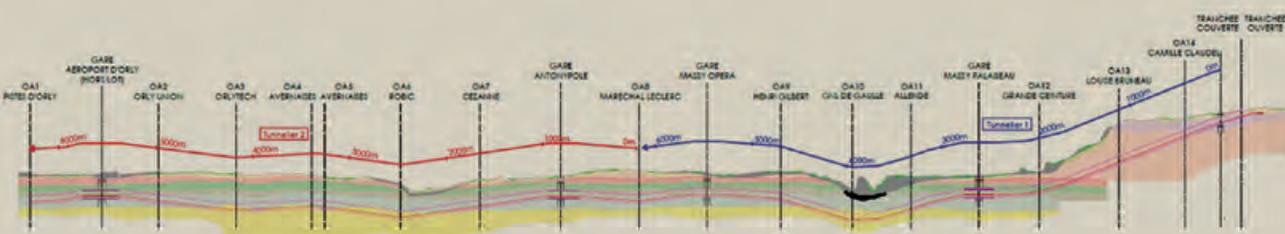
- 3- Le tunnelier TBM1.
- 4- Déblais de la zone de Transition OA14.
- 5- Profil géologique des tunneliers.

- 3- TBM 1.
- 4- Excavated material from transition area OA14.
- 5- Geological profile of TBMs.



4 © SGP

PROFIL GÉOLOGIQUE DES TUNNELIERS



5 © SGP



6

À l'issue du plan de caractérisation, les procédures de gestion et tri des déblais sont préparées en collaboration entre les ingénieurs déblais et les projeteurs. Les paramètres chimiques analysés pour l'évacuation des déblais sont au nombre d'environ 50, répartis en 2 catégories : ceux testés sur la fraction brute et ceux sur la partie lixiviable. Les composés analysés sur la fraction brute sont des hydrocarbures devant mettre en évidence l'existence d'une

6- Implantation des sondages de caractérisation.

7- Plan de gestion des déblais.

6- Layout of characterisation boreholes.

7- Excavated material management plan.

pollution d'origine humaine, liée, par exemple, à une ancienne installation industrielle.

Les paramètres analysés sur la fraction lixiviable caractérisent le niveau de pollution que les sols sont susceptibles de relarguer sous l'effet de précipitations simulées par une mise en solution dans l'eau pendant 24h.

L'éluât obtenu à l'issue de la lixiviation est analysé pour la recherche de 12 métaux lourds (arsenic, chrome,

plomb, zinc...) et de sels (sulfates, chlorures...).

Pour autant, dans de nombreux cas, il est impossible de caractériser des déblais avant leur extraction ni de s'assurer de la représentativité du ou des prélèvements. De plus, de nombreuses méthodes de travaux de terrassements, de fondations ou de tunnelier engendrent des mélanges de plusieurs strates géologiques et permettent difficilement le tri de sols avec des caractéristiques chimiques distinctes (figure 7).

Ainsi, dans le cas des marins de tunnelier, la méthode de prélèvement diffère pour plusieurs raisons. Le bâti et les contraintes foncières (parcelles privées, voiries) en surface sur la course des tunneliers de la Ligne 18 ne permettent pas la réalisation de sondages de reconnaissance afin de définir en amont la qualité prévisionnelle des lots de déblais. Par ailleurs, le brassage des sols provoqué par le procédé d'extraction ainsi que les ajouts d'eau, de mousses et de polymères ne rendent pas possible une pré-caractérisation des lots, les échantillons prélevés par sondage n'étant pas représentatifs de la qualité du matériau obtenue après excavation.

QUICK SOIL ANALYSIS (QSA)

Une des principales problématiques des travaux d'infrastructures souterraines réside dans la capacité de stockage nécessaire au traitement des déblais et au délai de caractérisation chimique des déblais.

PLAN DE GESTION DES DÉBLAIS



7

Les marins de tunnelier, de même que les déblais de forage des fondations spéciales, ont besoin d'un traitement pour réduire leur teneur en eau.

Après extraction, ces matériaux ne sont ni transportables en l'état, ni acceptables en ISDI ou comme remblais de carrières car ils présentent une siccité trop faible.

Par ailleurs, les délais de caractérisation du pack ISDI en laboratoire extérieur selon la norme du Cofrac sont de l'ordre de 4 à 5 jours.

C'est pourquoi Vinci Construction Terrassement et Navarra TS ont développé la solution d'analyse rapide des déblais Quick Soil Analysis (QSA). Ce laboratoire de chantier a été mis en place sur la Ligne 18 (figure 8).

SOLUTION TECHNIQUE

Le laboratoire a pour but de déterminer, pour un échantillon de sol, sa composition en matière lixiviable selon l'arrêté du 12/12/2014 qui fixe les critères à respecter pour l'acceptation de déchets en Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI).

Le retour d'expérience des chantiers du Grand Paris Express met en évidence que les paramètres déclassants pour les déblais sont quasi exclusivement détectés sur la fraction lixiviable, en particulier pour les plus récurrents : les sulfates, la fraction soluble, le molybdène, le sélénium.

Les paramètres retenus spécifiquement pour l'analyse QSA sont spécifiques à la classification des déblais pour le projet du Grand Paris Express (GPE).

L'objectif du laboratoire est de réaliser la caractérisation des paramètres sur éluât du pack ISDI (Installation de Stockage de Déchets Inertes) dans un délai de :



8 © VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

- 5 h à l'arrivée au laboratoire pour 1 échantillon (soit avancement d'un tunnelier de 16 m par jour de 1 000 m³) ;
- 7 h pour 2 échantillons (soit avancement de 2 tunneliers à 16 m par jour de 1 000 m³).

CALIBRATION DU LABORATOIRE

Le laboratoire QSA a mis en place un protocole rapide de réalisation d'un test ISDI dans le cadre de la gestion des déblais du projet de la Ligne 18. L'accélération du protocole analytique réside en partie dans la réalisation d'une lixiviation rapide sur des échantillons tests permettant d'établir des droites de corrélation obtenues par un doublon des analyses entre les 2 protocoles.

8- Installation du laboratoire QSA.

9a- Photographie du chromatographe à échange d'ions.

9b- Photographie du spectromètre à couplage inductif.

8- Installation of the QSA laboratory.

9a- Photo of the ion exchange chromatograph.

9b- Photo of the inductively coupled spectrometer.

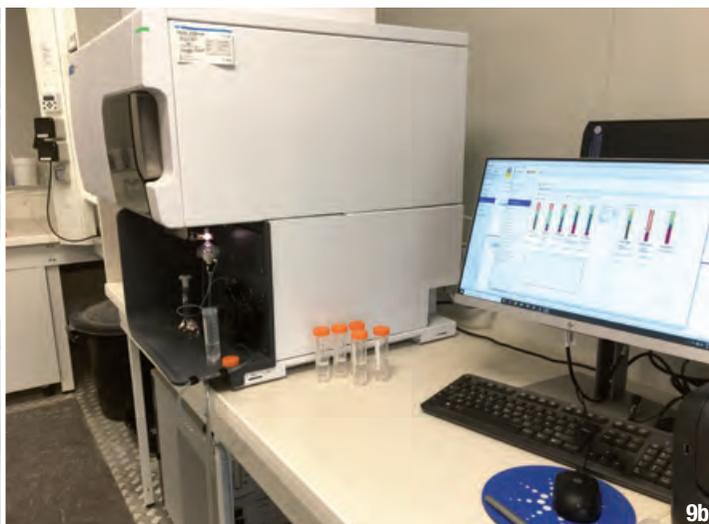
La calibration a été axée sur les paramètres sensibles pour la Ligne 18 et plus généralement pour les déblais du Grand Paris Express : la fraction soluble, les ions sulfates et fluorures et les métaux (sélénium et molybdène). Elle s'appuie sur l'analyse comparative de 150 échantillons de sols par le laboratoire QSA en parallèle d'un laboratoire Cofrac.

Cette phase de calibration a mis en évidence une forte corrélation entre les résultats obtenus par le laboratoire Cofrac et ceux du QSA. Cela se traduit par un coefficient de détermination R² en moyenne à plus de 90%. Ces valeurs indiquent une représentativité très bonne de l'analyse rapide QSA par rapport au laboratoire Cofrac.



9a

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT



9b

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT



© ALTAROAD
10

La calibration du laboratoire a permis de mettre au point des équations de corrélation qui précisent les résultats d'analyse rapide pour les approcher du Cofrac.

PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON

Dans un protocole normalisé, 3 étapes nécessitent un temps d'analyse incompatible avec les délais fixés par les cadences de creusement au tunnelier :

1- L'analyse du pourcentage de matière sèche d'un échantillon de sol.

La méthode normalisée en étuve à 105°C nécessite un temps de séchage pouvant atteindre 10 à 14 heures en laboratoire extérieur. Le laboratoire QSA a remplacé cette

10- Photographie de la bande de pesée dynamique.

11- Création d'un bon de transport numérique.

10- Photo of the dynamic weighing belt.

11- Creation of a digital transport bill.

étape par l'utilisation d'une balance dessiccatrice avec chauffage halogène. Le taux de matière sèche d'un échantillon est déterminé après

un temps de séchage de quelques dizaines de minutes.

2- La lixiviation de l'échantillon de sol.

La méthode normalisée utilise un temps de lixiviation de 24 h. Le laboratoire QSA utilise un temps de lixiviation réduit, de quelques heures en comparaison avec la méthode Cofrac à 24 h.

3- L'analyse de la teneur en fraction soluble de l'éluat.

La méthode normalisée en étuve à 105°C nécessite un temps de séchage pouvant atteindre 14 h en laboratoire extérieur. La balance dessiccatrice utilisée au laboratoire QSA permet d'obtenir les résultats dans un temps variant de quelques dizaines de minutes à une heure suivant les conditions expérimentales utilisées.

PROCESSUS ANALYTIQUE

La détermination de la concentration en ions (sulfates, chlorures, fluorures) est effectuée par chromatographie ionique (figures 9a et 9b).

Les teneurs en métaux sont mesurées à l'aide d'un spectromètre à plasma à couplage inductif (ICP OES).

Une fois les résultats analytiques obtenus, les équations des courbes de régression sont appliquées à la valeur afin d'estimer la valeur supposée à 24 h de lixiviation et ainsi définir l'exutoire du déblai.

Pour chaque échantillon, un duplicat est conservé pour être analysé en cas

de résultat proche d'un seuil de détermination de l'exutoire. Le cas échéant, il est analysé et le résultat final est issu de la moyenne des 2 valeurs mesurées pour le paramètre.

Pendant toute la durée de caractérisation des déblais, l'équipe du laboratoire est composée de :

- Un technicien laboratoire dédié à cette tâche ;
- Un aide laboratoire lorsque cela sera nécessaire ;
- Un ingénieur déblai qui valide l'orientation finale de l'exutoire des déblais.

ÉVACUATION DES DÉBLAIS

Les marins stockés dans les fosses sont chargés en camions semi-remorques, bennes étanches et bâchés. Le niveau de chargement est surveillé à l'aide d'un dispositif de pesée dynamique développé par Altaroad. En sortie du site, le camion circule à faible vitesse sur un tapis dont les capteurs permettent une estimation précise du tonnage du véhicule. Le chauffeur de la pelle mécanique, réalisant le chargement de la semi-remorque, dispose d'une tablette numérique sur laquelle apparaît en temps réel le tonnage estimé par la bande pesante installée sur la voie de circulation du chantier (figure 10).

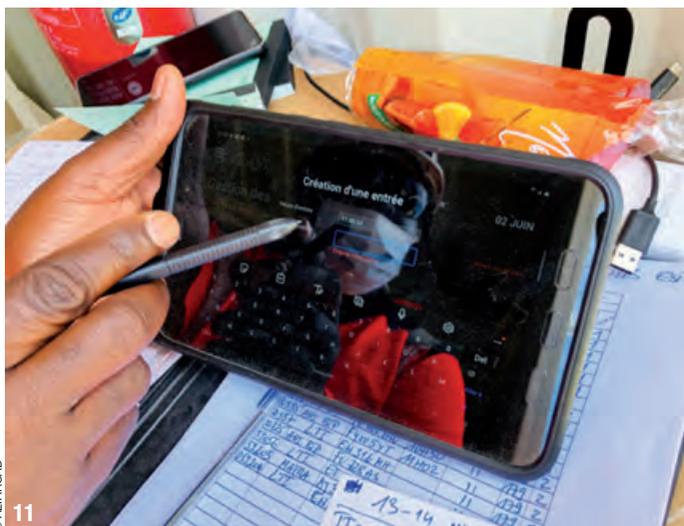
La traçabilité des déblais est assurée par le système TREX développé par la SGP qui permet de générer des bordereaux de suivi pour chaque chargement de déblais entre le chantier et l'exutoire (figure 11).

Le système TREX est renseigné par l'équipe de gestion des déblais à l'aide d'une plateforme numérique développée par la société Altaroad qui permet de générer des bons de transport numériques. Via des tablettes digitales, les opérateurs déblais renseignent sur chantier chaque chargement en lui attribuant une maille spécifique à un exutoire défini par sa caractérisation (figure 12).

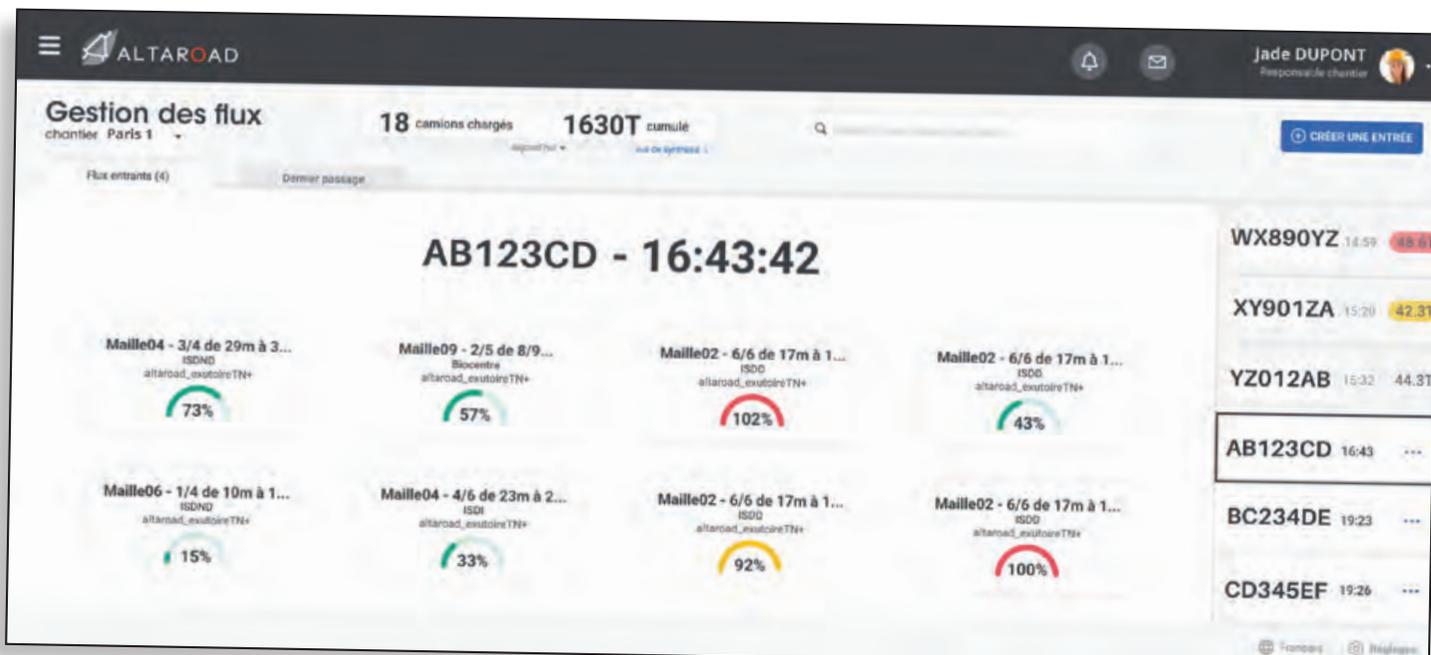
À son arrivée à l'exutoire, le bordereau est complété par l'exutoire avec notamment le tonnage précis à l'entrée.

CONCLUSIONS

La caractérisation des déblais est devenue un enjeu majeur des chantiers de travaux publics, notamment dans la gestion des déblais du Grand Paris Express. Dans le cadre de la Ligne 18, Vinci Construction Terrassement a ainsi déployé une solution de caractérisation sur un laboratoire de chantier, baptisée "Quick Soil Analysis" (QSA).



© ALTAROAD
11



© ALTAROAD 12

Celle-ci permet de caractériser précisément la qualité des déblais et de définir l'exutoire adapté, directement sur l'emprise du chantier en minimisant les problématiques et les coûts inhérents à la logistique des échantillons de sol.

Le système QSA permet de ramener la durée de caractérisation des déblais à 5h, quand la réalisation d'un pack ISDI complet par un laboratoire extérieur, selon la norme Cofrac, s'étend couramment de 4 à 5 jours en incluant la logistique des échantillons.

Cet outil a pour principal atout de minimiser le risque de ralentissement, voire d'arrêt d'exploitation des chantiers de terrassement, en particulier ceux à fort flux d'extraction de matériaux (ici les tunneliers), sans compromettre la traçabilité des déblais.

PRINCIPALES QUANTITÉS

COÛT TOTAL DU MARCHÉ : 799 millions d'euros
DURÉE TOTALE DU CHANTIER : 83 mois
EMPRISE DE CHANTIER : 11,8 km de tunnel, 3 gares, 13 ouvrages annexes, 1 tranchée couverte/ouverte
DURÉE DES CREUSEMENTS DES TUNNELIERS : 24 mois (novembre / décembre 2021 - novembre / décembre 2023)
QUANTITÉ DE DÉBLAIS : 1 200 000 m³ dont 770 000 m³ de marins de tunneliers

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris
ENTREPRISE GÉNÉRALE : Vinci Construction Grands Projets, Dodin Campenon Bernard, Vinci Construction France, Spie Batignolles Génie civil, Spie Batignolles Fondations, Botte Fondations, Vinci Construction Terrassement, Spie Batignolles / Valérian
ENTREPRISE DE GESTION DES DÉBLAIS : Navarra TS

12- Exemple graphique de synthèse des évacuations.

12- Graphic example of the overview of discharges.

La digitalisation de la gestion des déblais sécurise les risques d'erreur dans la traçabilité et permettra, à maturité, d'optimiser les moyens via une organisation de type "industrielle", rendue indispensable sur les chantiers évacuant d'importants volumes de déblais. □

ABSTRACT

CIVIL WORKS CONTRACT FOR LINE 18 OF THE 'GRAND PARIS EXPRESS' PROJECT - INNOVATIVE MANAGEMENT OF EXCAVATED MATERIAL BY QUICK SOIL ANALYSIS

HERVÉ NABONNAND, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - JÉRÉMY SUCRET, NAVARRA TS

Excavated material on Line 18 of the 'Grand Paris Express' project is managed by an innovative approach to rapid characterisation of the materials, especially those coming from the tunnel boring machines, by the Quick Soil Analysis (QSA) laboratory developed by Vinci Construction. It can reduce to a few hours the time to define the outlet for excavated material, whereas several days are needed in an outside laboratory. This analytic decision support system was coupled with the Altaroad logistics monitoring system (weighing and digital transport bills). Management of excavated material by QSA, by facilitating the implementation of traceability without slowing operation of the worksite, ensures virtuous management of the materials extracted in a major infrastructure project. □

CONTRATO DE INGENIERÍA CIVIL DE LA LÍNEA 18 DEL GRAND PARIS EXPRESS - GESTIÓN INNOVADORA DE LOS ESCOMBROS POR QUICK SOIL ANALYSIS

HERVÉ NABONNAND, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - JÉRÉMY SUCRET, NAVARRA TS

La gestión de los escombros del proyecto de la Línea 18 del Grand Paris Express ha utilizado un procedimiento innovador para la caracterización rápida de los escombros, en particular los procedentes de las tuneladoras, por el laboratorio Quick Soil Analysis (QSA). Desarrollado por Vinci Construction, permite reducir a unas pocas horas el plazo de definición del canal de evacuación de los escombros, mientras que se precisaban varios días con el laboratorio anterior. Esta herramienta decisiva analítica se ha combinado con el sistema de seguimiento de la logística de Altaroad (pesaje y albaranes de transporte digitales). Al facilitar la trazabilidad sin ralentizar la operativa de la obra, la gestión de los escombros mediante el QSA garantiza una gestión óptima de los materiales extraídos en grandes proyectos de infraestructuras. □



1
© EDF-C.HURET.JPG

AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE DE ROMANCHE-GAVET - ENCORE PLUS RESPECTUEUX POUR L'ENVIRONNEMENT

AUTEURS : PEDRO FONSECA, DIRECTEUR OPÉRATIONNEL, SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL - FLORIAN PICCHIONI, DIRECTEUR DE PRODUCTION, DODIN CAMPENON BERNARD

L'AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE DE ROMANCHE-GAVET, LE PLUS IMPORTANT CHANTIER HYDROÉLECTRIQUE EN FRANCE DES 25 DERNIÈRES ANNÉES, A NÉCESSITÉ LE RECOURS À TROIS TECHNIQUES D'EXCAVATION, TROIS SITES DE CHANTIER SUR 10 km DE LONG ET 10 ANS DE TRAVAUX. INAUGURÉ EN 2020, CE PROJET REMPLACE 5 ANCIENS BARRAGES POUR UNE PRODUCTION D'ÉNERGIE À LA HAUSSE DE 40 %.

INTRODUCTION

Entre la sortie de la plaine de Bourg-d'Oisans et la commune de Vizille, à quelques kilomètres de Grenoble, la rivière de la Romanche emprunte un défilé de 13 km constituant une chute naturelle de près de 300 m. Ce tronçon de rivière présentant un fort potentiel énergétique a été équipé par six centrales hydroélectriques entre la fin du 19^e et le début du 20^e siècle, pour une puissance totale de 82 MW et une pro-

duction annuelle moyenne de l'ordre de 405 GWh.

EDF a décidé de les remplacer par le nouvel aménagement de Romanche-Gavet plus sûr, plus performant et

1- Barrage de Livet.

1- Livet Dam.

plus respectueux de l'environnement (figure 2). Le choix d'une implantation en souterrain s'explique par l'exiguïté de la vallée et la volonté de réduire l'impact des ouvrages sur le paysage. Le nouveau barrage - prise d'eau de Livet (figure 1) capte l'eau de la Romanche pour l'orienter, via une conduite enterrée, vers une galerie d'amenée située dans le massif de Belledonne. L'eau y pénètre à un débit de 41 m³/s et elle est guidée vers la

centrale de Gavet. À hauteur de la commune de Gavet, l'eau chute de 170 m dans un puits blindé tandis qu'une cheminée d'équilibre débouche en falaise (figure 3).

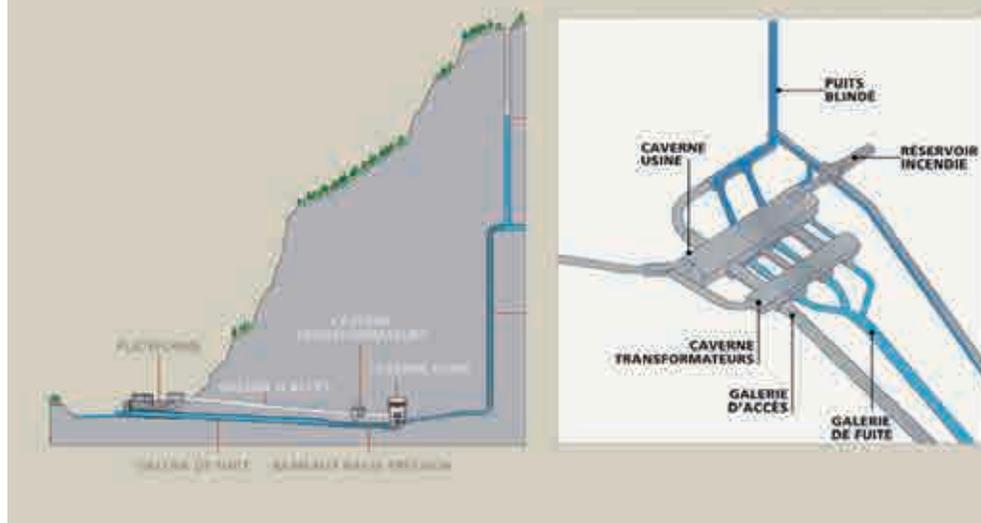
La centrale hydroélectrique souterraine abrite deux turbines pour une puissance installée de 94 MW, et comporte deux cavernes principales. La production annuelle sera d'environ 560 GWh, soit la consommation d'une ville de 230 000 habitants. ▷

DESCRIPTION DU PROJET LES 3 SITES DU CHANTIER RÉPARTIS SUR 10 km DE VALLÉE

Le **barrage-prise d'eau** à Livet est constitué de trois passes de 10 m de large, chacune équipée d'une vanne de 5 m de haut. Un bâtiment abrite les exploitants et les équipements de commande, de manœuvre et de dégrillage ainsi qu'une passe à poissons à bacs. Les **ouvrages d'aménée** (OS1) sont construits depuis la fenêtre des Ponants, point bas de la galerie d'aménée de 4,7 m de diamètre et 10 km de longueur. Constituant une chute de 110 m de dénivelé, elle conduit l'eau du barrage de Livet à la centrale située à Gavet pour qu'elle y soit turbinée. À l'extrémité aval de la galerie, l'eau chute dans un puits blindé de 160 m qui la conduit sur les deux groupes turbines en caverne usine. Au même endroit, une cheminée d'équilibre souterraine, destinée à neutraliser les variations de débit et de pression dans la galerie d'aménée et à supprimer les effets du phénomène de coup de bélier, s'élève jusqu'à une plateforme en falaise située 180 m plus haut.

La **centrale souterraine et sa plateforme** à Gavet (OS2), comporte deux cavernes principales situées au bout d'une galerie d'accès : celle de l'usine (figure 4) abritant deux groupes turbines et celle des transformateurs contenant

SCHÉMA DE LA CENTRALE SOUTERRAINE



2

© SPIE BATIGNOLLES

trois cellules pour les transformateurs ainsi que des vannes aval situées sous la caverne et installées sur chacun des trois rameaux basse-pression. L'eau turbinée est restituée à la Romanche par la galerie de fuite débouchant en plateforme dans le bassin de restitution.

LA GALERIE D'AMENÉE

Au lieu-dit les Ponants, une fenêtre d'accès a été creusée à l'explosif afin

2- Schéma de la centrale souterraine.

3- Ouvrage aval - dissipateurs.

2- Diagram of the underground power station.

3- Downstream structure - energy dissipators.

que les deux tunneliers puissent amorcer leur attaque. Le premier est parti vers l'aval, en direction de l'usine souterraine de Gavet (3848 m), le second vers l'amont, en direction du barrage-prise d'eau (5940 m).

Les tunneliers

Deux tunneliers de type roche dure à bouclier ouvert de 4,74 m de diamètre, conçus et fabriqués par Herrenknecht, ont creusé les galeries (figure 5).



3

© EDF-CHURET JRG



© EDF-C.HURET.JPG
4

Voici leurs principales caractéristiques :

- Type : grippeur roche dure ;
- Longueur totale : 210 m ;
- Masse : 634 t ;
- Diamètre de perforation : 4700 mm ;
- Poussée sur la tête : 1 425 t ;
- Puissance à la tête : 6 moteurs électriques x 350 kW = 2100 kW ;
- Puissance totale de la machine : environ 3000 kW ;
- Vitesse de rotation : 0-12 t/mn ;

4- Vue d'ensemble de la caverne usine en 2017.

4- General view of the plant cavern in 2017.

- Course de forage : 1800 mm ;
- Rayon de courbure minimum : 250 m ;
- Couple moteur : 2100 kNm ;
- Molettes : 19" ;
- Nombre : 18 simples, 4 doubles ;
- 21 remorques de back-up en plus du corps avant.

L'avancement des tunneliers

La livraison du premier tunnelier a eu lieu fin 2012 et l'excavation a débuté en avril 2013.

Le second a démarré en juillet 2013 (figure 6).

Fin juillet 2013, des orages et des pluies exceptionnelles ont frappé le secteur de Livet et Gavet provoquant des phénomènes de laves torrentielles (coulées de boue chargées de branchages, de troncs et de pierres) impactant les zones des installations de chantier. Les travaux de creusement ont donc été interrompus et les tunneliers immobilisés.

Les travaux ont repris à l'été 2015 après la construction d'importants merlons de protection des installations de chantier (en complément des filets de protection existants) et après mise au point des procédures de gestion du risque lié à l'amiante naturelle.

Les performances suivantes ont été observées :

- Vitesse d'avancement maximale : 7,5 cm/min ;
- Moyenne cumulée de creusement par journée de travail : 12,95 m/jour à l'aval et 10,32 m/jour à l'amont
- Record d'avancement en 24 h de creusement : 35,73 m ;
- Record d'avancement hebdomadaire (7 jours de travail) : 147,42 m ;

Revêtement de la galerie

L'optimisation économique de ce projet hydroélectrique comportant de grands linéaires d'adduction en charge, imposait de limiter au strict nécessaire l'extension des tronçons revêtus. Les galeries et puits en charge sont implantés suffisamment en profondeur dans les massifs pour respecter les critères géométriques usuels de couverture (critère de Talobre, critère norvégien) visant à garantir la stabilité mécanique des versants.

En tracé courant de la galerie d'adduction principale, la décision de revêtir a été principalement dictée par des critères de stabilité des parements en lien avec la densité de fracturation des terrains traversés. Seulement 10% environ du linéaire de la galerie d'amenée d'eau a fait l'objet d'un revêtement de 25 cm de béton armé (figure 7).

LE Puits DE CHUTE ET LA CHEMINÉE D'ÉQUILIBRE

Pour faciliter la mise en place d'une pièce particulière du blindage, dont la forme était coudée, les dix premiers mètres à la base du puits de chute ont été excavés en diamètre 5,5 m tandis que les 147 m supérieurs étaient en diamètre réduit à 4,5 m.

La cheminée d'équilibre de 180 m de hauteur a été excavée en 5,5 m de diamètre.

Un revêtement définitif de 25 cm d'épaisseur a été effectué à l'aide d'un coffrage auto-grimpant. Les difficultés d'accès au haut de la cheminée d'équilibre ont imposé le recours à l'hélicoptage pour l'acheminement du matériel et du personnel.

Pour sa réalisation, il a fallu surmonter des difficultés telles que l'apport de l'eau nécessaire au creusement du trou pilote et le raccordement électrique des équipements. Afin de fournir en permanence un débit d'environ 80 m³/h, une réserve de 70 m³ a été créée sur la plateforme. Cette dernière était continuellement remplie grâce à un système de pompage trouvant sa source au départ du sentier. Pour ce faire, des conduites d'eau ont été tirées le long du chemin parcourant la montagne. Pour l'alimentation électrique, des câbles 20 kV disposés tout au long du sentier étaient raccordés à un transformateur situé sur la plateforme, d'une part, et au réseau EDF, d'autre part.

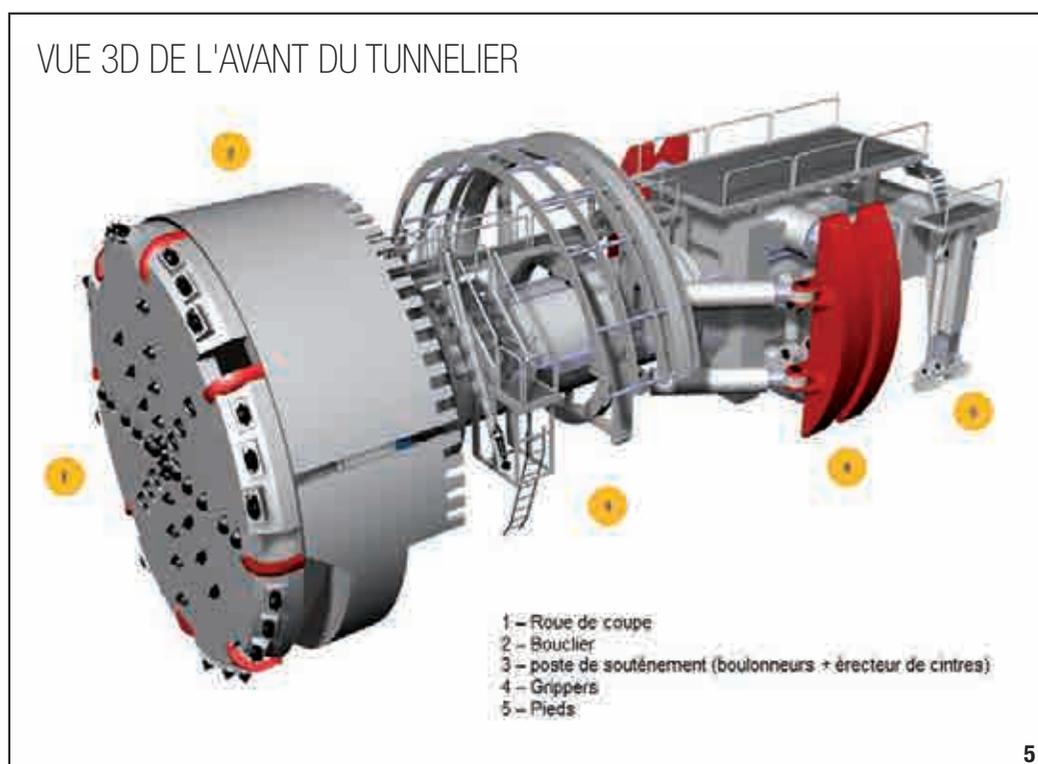
Focus sur la raise-boring

Initialement utilisée dans l'industrie minière, la méthode dite du *raise-boring* (alésage) consiste à forer un trou pilote du haut vers le bas, puis à l'aléser du bas vers le haut, à condition d'avoir accès aux deux extrémités de l'ouvrage (figure 8).

Le *raise-borer* a été positionné à l'aplomb des futurs puits, sur des poutres métalliques reposant de part et d'autre de son diamètre final. Un trou pilote de 40 cm de diamètre a été foré à l'eau à l'aide d'un tricône. La verticalité du forage était garantie grâce à un outil technologique unique, le RVDS (Rotary Vertical Drilling System) qui permet l'ajustement régulier de la position du tricône grâce à des patins s'appuyant sur les parois. Ce système utilise l'eau sous pression injectée par le train de tige (pour refroidir l'outil et évacuer les cuttings vers le haut du forage) afin de créer sa propre alimentation électrique.

La tête d'alésage Atlas équipée de 32 molettes Sandvik conçues pour gratter la roche a été ensuite fixée au train de tiges depuis le bas. Les tiges de foration (1,5 m de longueur et 740 kg chacune) ont été retirées par le haut au fur et à mesure de la remontée de l'aléreur, dont la cadence a été d'environ 40 cm/h dans les roches du projet (gneiss).

Cette technique a permis d'excaver les puits de chute et la cheminée d'équilibre de manière plus sécurisée que les méthodes à l'explosif. En effet, le pilote se positionne dans une cabine déportée



de plusieurs mètres du haut du forage. De plus, la méthode simplifie la logistique associée à sa mise en œuvre et garantit une meilleure maîtrise des travaux en termes de coûts et de délais.

LA CONDUITE FORCÉE

La conduite forcée de la chute est constituée du puits vertical équipé d'un blindage métallique intérieur et de 2 rameaux à haute pression affectés à

5- Vue 3D de l'avant du tunnelier.

6- Montage d'un des deux tunneliers.

5- 3D view of the front of the TBM.

6- Assembly of one of the two TBMs.

l'acheminement de l'eau aux turbines. De l'amont vers l'aval, elle est constituée des ouvrages suivants :

- Un convergent d'axe horizontal, blindé, de 4,20 m à 3,30 m de diamètre ;
- Un coude dans le plan vertical à 90° ;
- Un puits blindé vertical de diamètre intérieur 3,30 m et de hauteur 163 m, excavé en diamètre 4,50 m ;





7

© EDF-C.HURET.JPG

- Un collecteur horizontal blindé se raccordant sur le puits par un coude dans le plan vertical à 90° ;
- Une culotte blindée assurant la séparation du circuit d'amenée en 2 rameaux haute pression de 2,10 m de diamètre. Ces rameaux inclinés à 14,4%, sont excavés en Ø 2,70 m (section fer à cheval) sur une longueur unitaire d'environ 35 m.

7- Galerie d'amenée.
8- Tête d'alésage du raise-borer.

7- Headrace tunnel.

8- Boring head of the raise borer.

En partie inférieure, le puits de chute comporte un piquage à 90° vers une conduite forcée de 2,05 m de diamètre intérieur, reliée aux dissipateurs d'énergie placés à l'extérieur. La totalité des blindages du projet est bloquée au rocher. Malgré un massif rocheux possédant de bonnes caractéristiques de déformabilité, les blindages sont dimensionnés vis-à-vis de la pression interne sans transfert

d'efforts vers le milieu encaissant. Le dimensionnement à la pression externe, généralement le plus critique, a conduit localement à la mise en place de cerces extérieures. Les blindages sont en acier à haute limite élastique de nuance S460 ou S500 pour des épaisseurs allant jusqu'à 50 mm.

LES CAVERNES ET GALERIES SOUTERRAINES

La centrale souterraine est constituée de deux cavernes abritant les groupes de production et les équipements associés. La caverne principale (74 m de long, 16 m de large et entre 25 et 35 m de haut), dite caverne usine, accueille les équipements hydrauliques (turbines, arbres-turbines et alternateurs). Dans la caverne secondaire (65 m de long, 11 m de large et 15 m de haut), se trouvent les transformateurs, le poste 63000 V et les vannes aval des groupes.

La caverne principale abrite :

- Deux vannes sphériques de Ø 1,35 m ;
- Deux turbines Francis à axe vertical de 47 MW de puissance nominale ;
- Deux alternateurs de puissance nominale 54 MVA ;
- Un pont roulant de service courant de capacité 150 kN ;
- Un pont roulant pour la maintenance des pièces lourdes de capacité 950 kN ;



8

© EDF-C.HURET.JPG

→ Les auxiliaires mécaniques et électriques associés (exhaure, refroidissement, ventilation/désenfumage). Deux galeries techniques servent au cheminement des réseaux entre la caverne principale et celle des transformateurs.

Une troisième galerie, à l'extrémité rive gauche de la caverne des transformateurs, rejoint la caverne principale, procurant ainsi un accès de circulation et de secours.

L'ensemble des ouvrages aval souterrains a été excavé en méthode traditionnelle à l'explosif.

Une galerie de reconnaissance de petite section, réalisée en 1998, et calée en partie haute de la caverne principale, a fourni le premier accès à la zone de la caverne principale. Celle-ci a servi pour l'évacuation, à partir de juin 2012, des matériaux extraits lors de la première phase d'excavation. En parallèle, la galerie d'accès à la centrale, d'une longueur de 200 m environ était réalisée.

Un puits de jet de matériaux a été foré dès son achèvement pour l'évacuation des matériaux par la galerie principale d'accès.

Galerie de fuite

À l'aval du blindage des vannes aval, les rameaux basse pression ont une section fer à cheval de diamètre 3,0 m (déroctage 3,50 m) ; chaque rameau, avant son raccordement à la galerie de fuite, a une longueur de 27,50 m. La galerie de fuite commune, longue de 147 m environ, est de type fer à cheval avec une section de déroctage de 25,3 m².

Les radiers des rameaux basse pression et de la galerie de fuite sont bétonnés ; les piédroits et voûtes sont bétonnés sur les premiers 39 m des rameaux G1 et G2 et restent bruts au-delà, tout en étant recouverts, si nécessaire, de béton projeté.

LES OUVRAGES EXTÉRIEURS

À l'extérieur, une plateforme intègre le bâtiment d'exploitation, les ouvrages de restitution de l'eau à la rivière (vanne aval, fosse de tranquillisation et mur déversoir) et les ouvrages de dissipation d'énergie.

Une paroi de 190 m de long sur 13 à 23 m de profondeur a été construite dès 2012 au pied de la falaise, nécessitant de couler 343 pieux en béton. Elle a permis de réaliser les ouvrages et les galeries de restitution (canal de fuite et galerie des dissipateurs) au sec, à l'abri des crues et des remontées de nappe phréatique.

COUPE GÉOLOGIQUE



9

© SPIE BATIGNOLLES

LA GÉOLOGIE

Le projet Romanche-Gavet se situe au cœur du massif cristallin de Belle-donne (figure 9). Le rocher est, dans son ensemble, très compact et peu tectonisé. La vallée de la Romanche est toutefois affectée par des mouvements de versant, localement de grande ampleur, du fait de reliefs accusés.

Les différents ouvrages de l'aménagement impliquent essentiellement quatre formations lithologiques similaires (pluto-volcanisme métamorphisé) : les formations d'Allemond, de Livet, de Rioupéroux et de Séchillienne.

Du point de vue géotechnique, les roches impliquées dans les travaux sont raides, compactes, très abrasives, avec de fortes résistances matricielles. Elles composent un massif aux caractéris-

9- Coupe géologique.

10- Gestion du risque amiante.

9- Geological cross section.

10- Asbestos risk management.

lement et présentent des fluctuations saisonnières importantes.

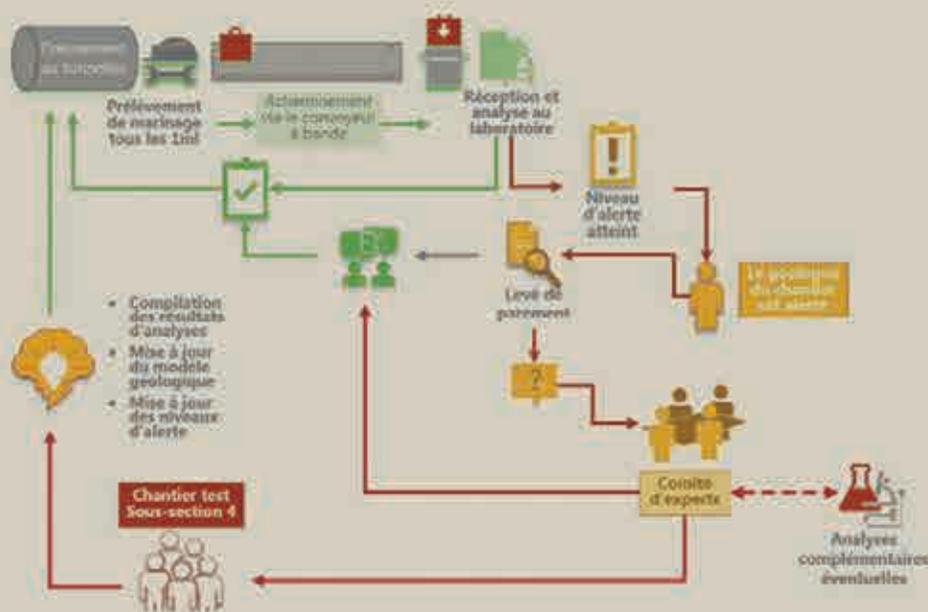
LA GESTION DU RISQUE AMIANTE NATURELLE

Lors de la formation des Alpes, la présence d'amphiboles dans les roches de ces formations et leur possible interaction avec des fluides hydrothermaux a permis la genèse de roches amiantifères en remplissage de discontinuités d'origine tectonique. L'application de contraintes mécaniques à ces roches peut libérer des fibres inhalables associées à des risques sanitaires.

Le contexte particulier de ce chantier, tant géologique que réglementaire, a conduit les acteurs du projet à mener la gestion du risque d'amiante naturelle le plus souvent de manière expérimentale.

tiques mécaniques très élevées, homogène d'un bout à l'autre de l'aménagement avec des contrastes sensibles au passage des zones les plus fracturées. Le massif rocheux constitue un aquifère de versant, fracturé, avec des niveaux de nappes et une hydraulique gouvernés par des discontinuités structurales. Les niveaux d'eau sont variables loca-

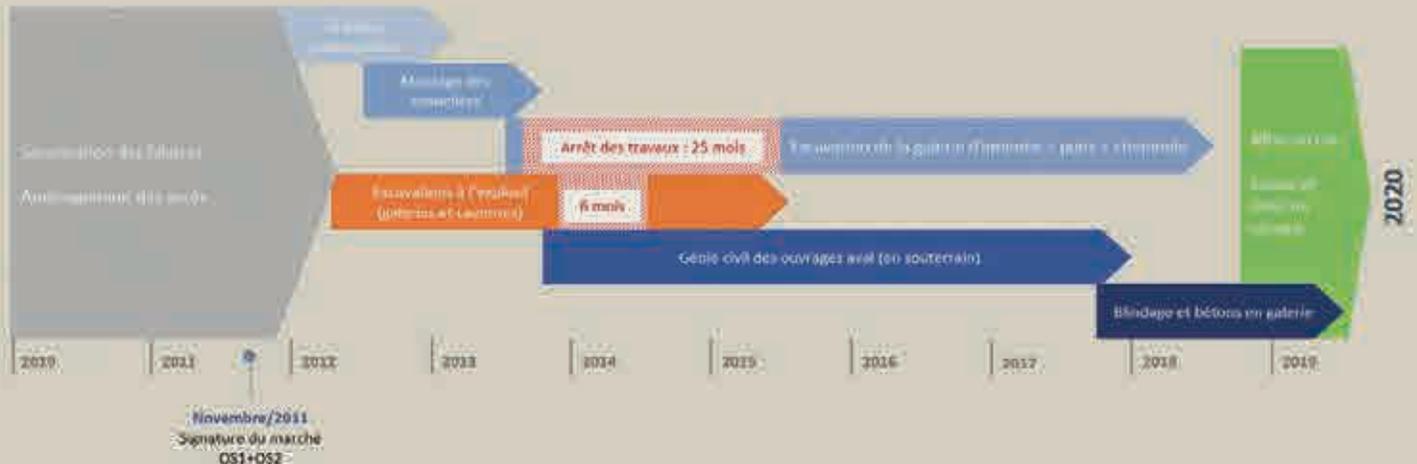
GESTION DU RISQUE AMIANTE



10

© SPIE BATIGNOLLES

LES DIFFÉRENTES PHASES DU CHANTIER



11

© SPIE BATIGNOLLES

tale, en collaboration étroite avec les organismes institutionnels (Inspection du Travail, Carsat, Médecine du Travail). Celle-ci englobait les mesures suivantes (figure 10) :

→ Un risque amiante intégré dès la conception des tunneliers ;

11- Les différentes phases du chantier.

11- The various project phases.

→ Un comité d'experts amiante chargés d'un état des lieux, d'une méthode de suivi géologique et d'un appui technique au cours des travaux ;

→ Un Modèle Géologique de Référence défini pour l'analyse des risques liée à chaque ouvrage et

chaque procédé d'excavation et actualisé au fil du suivi géologique ;

→ Suspension du creusement en cas de zone détectée comme étant à risque ;

→ Réalisation de chantiers tests.

Les différentes phases du chantier
Elles sont indiquées sur la figure 11. □

LES PRINCIPAUX ACTEURS DU PROJET

MAÎTRE D'OUVRAGE : EDF - Unité Production Alpes

MAÎTRE D'ŒUVRE : EDF - Centre d'Ingénierie Hydraulique

APPUI GÉOLOGIE : EDF - Centre d'Expertise et d'Inspection dans les Domaines de la Réalisation et de l'Exploitation - Département Technique d'Essais en Géologie, Géotechnique et de Génie Civil

COORDINATION SPS : Apave

TITULAIRE DU MARCHÉ OS1 ET OS2 : groupement (GMES)

Spie batignolles génie civil (Mandataire) - Dodin Campenon Bernard - Vinci Construction France TP Lyon

SOUS-TRAITANTS PRINCIPAUX : Bergteamet (Raise-Boring), Bilfinger VAM (Blindage)

PRINCIPALES QUANTITÉS

LES OUVRAGES D'AMENÉE : volume total d'excavation : 250 000 m³

LES OUVRAGES AVAL (en souterrain) :

- 61 000 m³ excavés à l'explosif (102 t d'explosifs utilisées)

- 23,5 km de boulons

- 15 000 m³ de béton

LES OUVRAGES AVAL (à l'extérieur) :

- Batardeau en rideau de 339 pieux sécants Ø 760 mm

- 22 300 m³ de terrassement

- 10 000 m³ de béton

ABSTRACT

ROMANCHE-GAVET HYDROELECTRIC POWER SCHEME - EVEN MORE ENVIRONMENTALLY FRIENDLY

PEDRO FONSECA, SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL -
FLORIAN PICCHIONI, DODIN CAMPENON BERNARD

In 2010, EDF started work on the largest hydropower development project of the last 25 years in France. Its goal was to develop a safer, more efficient and environmentally friendly underground power station and to increase electric power production by 40%. On a project which has lasted ten years, the teams performed work simultaneously on 10 km of valley. They built a water intake dam, intake structures, an underground power station and its platform, using three excavation techniques: explosives, hard rock TBM and raise boring. They coped with climatic contingencies and asbestos risk which was ultimately overcome. □

APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO EN ROMANCHE-GAVET - TODAVÍA MÁS RESPECTUOSO CON EL MEDIO AMBIENTE

PEDRO FONSECA, SPIE BATIGNOLLES GÉNIE CIVIL -
FLORIAN PICCHIONI, DODIN CAMPENON BERNARD

In 2010, EDF lanzaba el proyecto más importante de aprovechamiento hidroeléctrico de los últimos 25 años en Francia. Su objetivo se basaba en la realización de una central subterránea más segura, eficiente y respetuosa con el medio ambiente, y en un aumento de la producción de electricidad del 40%. Durante la obra, que ha durado 10 años, los equipos han trabajado simultáneamente a lo largo de 10 km de valle. Han construido una presa-toma de agua, construcciones de acometida, una central subterránea y su plataforma, utilizando tres técnicas de excavación: explosivos, tuneladora de roca dura y raise-boring. Han tenido que hacer frente a inclemencias climáticas y a un riesgo de amianto, que finalmente ha podido controlarse. □



1
© MACCAFERRI

LE MATELAS RENO, 60 ANS D'INNOVATION

AUTEUR : ALEXANDRE PLASTRE, DIRECTEUR TECHNIQUE, FRANCE MACCAFERRI

LE MATELAS RENO PLUS (MRP), DERNIÈRE INNOVATION TECHNOLOGIQUE DE MACCAFERRI DANS LE DOMAINE DES APPLICATIONS HYDRAULIQUES, EST LE FRUIT DE L'ÉVOLUTION AU COURS DES ANNÉES DU MATELAS RENO DÉVELOPPÉ AU DÉBUT DES ANNÉES 60. IL EST DOTÉ DE TOUTES LES ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES LUI PERMETTANT D'ÊTRE PLUS ROBUSTE, PLUS DURABLE ET PLUS ÉCONOMIQUE QUE N'IMPORTE QUELLE AUTRE SOLUTION À PERFORMANCE HYDRAULIQUE COMPARABLE. UNE CAMPAGNE RÉCENTE D'ESSAI DE PERFORMANCES HYDRAULIQUES (2019-2020), COUPLÉE À DES ESSAIS PLUS ANCIENS (1984) A PERMIS DE CARACTÉRISER AVEC PRÉCISION LES PERFORMANCES HYDRAULIQUES DES STRUCTURES.

HISTORIQUE

L'histoire de Maccaferri a débuté en 1879 à Lavino (région de Bologne en Italie) où la "ditta Maccaferri", spécialisée dans la production d'objets en fer forgé est fondée. Ce n'est qu'en 1893 que l'entreprise artisanale s'industrialise et invente le gabion, cette structure en grillage double torsion remplie de pierre. D'abord utilisés de façon sporadique dans le domaine des travaux publics, les gabions sont plus largement utilisés après les 2 guerres mondiales pour réaliser des ouvrages de soutène-

ment dans les infrastructures routières principalement.

Ce n'est qu'en 1960 qu'un gabion de faible épaisseur et de grande surface est fabriqué pour une application en milieu hydraulique afin de protéger les berges du fleuve Reno contre l'érosion. Le Matelas Reno est né : il est composé d'une base en grillage double torsion, de cloisons en grillage appelées diaphragmes et d'un couvercle en grillage permettant de fermer la structure. À la suite de terribles inondations à Florence en 1966 (figure 2),

1 - Vue générale - Protection de berges à Roquebilière.

1 - General view - Protection of the banks at Roquebilière.

il est très largement utilisé pour protéger les nouvelles digues du fleuve Arno, ce qui marque le début de leur utilisation massive dans les applications

contre l'érosion hydraulique, en protection de berges, de déversoirs, de flancs de canaux. Ils sont d'abord utilisés de façon empirique, puis Maccaferri investit en 1984 dans une campagne d'essai de caractérisation des performances hydrauliques des structures en gabions et matelas Reno. L'objectif de cette campagne est de définir la rugosité des structures, de définir les vitesses et contraintes tangentielles admissibles et *in fine* de déterminer le coefficient de Shields équivalent des structures gabions afin de comparer les perfor-

2- Protection des berges du fleuve Arno à Florence en Matelas Reno.

3- Schéma d'un Matelas Reno double diaphragme.

4- Photo de l'essai d'abrasion sur le fil revêtu d'une gaine polymère.

2- Protection of the banks of the Arno River at Florence with Reno mattress.

3- Diagram of a double-diaphragm Reno mattress.

4- Photo of the abrasion test on the thread covered with a polymer sheath.



© MACCAFERRI

2

mances de ces structures par rapport à des enrochements libres. À l'issue de cette première campagne d'essai, il a pu être mis en évidence que l'utilisation de gabions permettait de réduire par un facteur de 2,5 l'épaisseur de protection nécessaire pour une performance hydraulique équivalente.

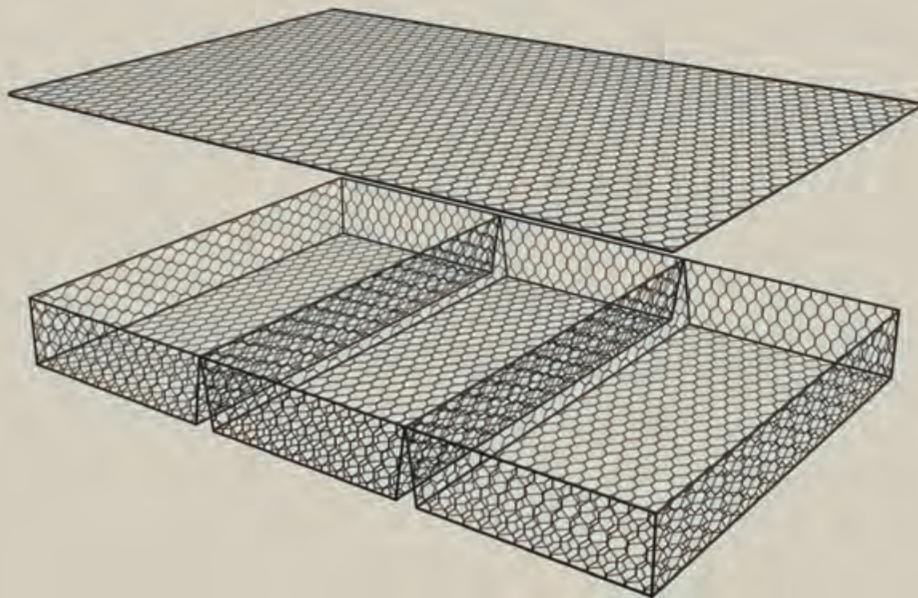
Poursuivant le développement des structures à la recherche de performances encore améliorées, Maccaferri développe en 1990 le Matelas Reno à "double" diaphragme, où les diaphragmes sont obtenus par pliage de la nappe de fond tous les 1 m, proposant des cloisons doubles dans les cellules (figure 3). Il en résulte un meilleur confinement des pierres dans les structures qui ont donc moins la possibilité de bouger dans la cage et des performances hydraulique accrues.

LA DURABILITÉ DU FIL

En parallèle au développement de la technologie des cages, de gros progrès sont réalisés en matière de protection du fil contre la corrosion. Si, lors de l'apparition des premiers gabions, le fil d'acier est brut, la galvanisation à chaud (Zinc) apparaît dans les années 50. C'est un premier début, qui augmente sensiblement la durée de service des structures en milieu non aquatique, mais insuffisant pour protéger le fil en milieu hydraulique sur des durées de service supérieure à 10 ans. Le revêtement organique sur fil d'acier, le PVC, fait son apparition quelques temps après. Il est extrudé autour du fil d'acier pour isoler ce dernier contre les effets de la corrosion. Dans les années 90, la galvanisation évolue et le zinc est enrichi avec de l'aluminium pour accroître la performance contre l'effet de la corrosion. Enrichie de 5% d'aluminium, la galvanisation riche (Zn 95% / Al 5%) multiplie par 3 les performances de durabilité du fil. Dans les années 2000, une galvanisation encore plus riche en aluminium (Zn 90% - 10%) améliore une nouvelle fois les performances de durabilité. Toutefois, en milieu hydraulique, la durée de service d'un ouvrage en gabion avec ce revêtement mais sans gaine organique est estimée à "seulement" 25 ans. La présence d'une gaine organique (PVC, PA6) permet d'augmenter cette durée de vie à 120 ans.

D'un point de vue normatif, les performances des revêtements métalliques sont évaluées sur la base d'essais de vieillissement accéléré en atmosphères corrosives de dioxyde de soufre et de brouillard salin en laboratoire.

SCHÉMA D'UN MATELAS RENO DOUBLE DIAPHRAGME



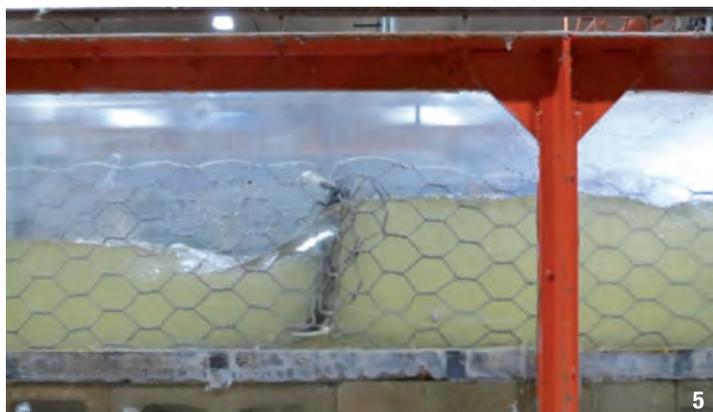
© MACCAFERRI

3



© MACCAFERRI

4



5



6



7

© MACCAFERRI

Pour les revêtements organiques, il est vérifié que les propriétés mécaniques (résistance à la traction mais également allongement à la rupture) des polymères ne varient pas de façon trop importante sous l'effet des rayons UV. Au-delà de la norme, d'autres essais performanciels sont contrôlés pour s'assurer que le revêtement est adapté à l'application proposée. Ainsi des essais de dureté, de résistance aux températures extrêmes (basses et hautes) et de compatibilité aux solutions chimiques acides et basiques sont également menés. En milieu hydraulique,

notamment lorsque l'écoulement est à fort charriage solide, un paramètre important est la résistance à l'abrasion du revêtement polymère. En 2019, à l'issue d'une campagne d'essai d'un an au Brésil, Maccaferri conçoit son nouveau revêtement PoliMac®, répondant aux exigences normatives, mais avec des performances mécaniques accrues, particulièrement pour la résistance à l'abrasion. Ainsi, ce revêtement de dernière génération a une résistance 10 fois plus élevée à l'abrasion que le PVC et apporte une réponse au phénomène de charriage solide. L'essai

index réalisé consiste à faire passer un poinçon de poids et dimension normalisé sur le fil et de mesurer le nombre de cycles nécessaires pour rompre la protection polymère (figure 4). À titre de comparaison, lorsque l'on applique sur un fil d'acier brut le nombre de cycles nécessaires à la rupture du revêtement PoliMac®, la section d'acier du fil est réduite de 30%.

CAMPAGNE D'ESSAI HYDRAULIQUE (2019-2020)

Afin d'avoir une meilleure compréhension des propriétés hydrauliques

5- Phase 1 - Photo de l'essai en canal à débit constant avec la structure sans pierres.

6- Phase 2 - Photo de l'essai en canal à hauteur d'eau constante.

7- Phase 3 - Photo de l'essai à débit maximal.

8- Schéma d'un Matelas Reno Plus.

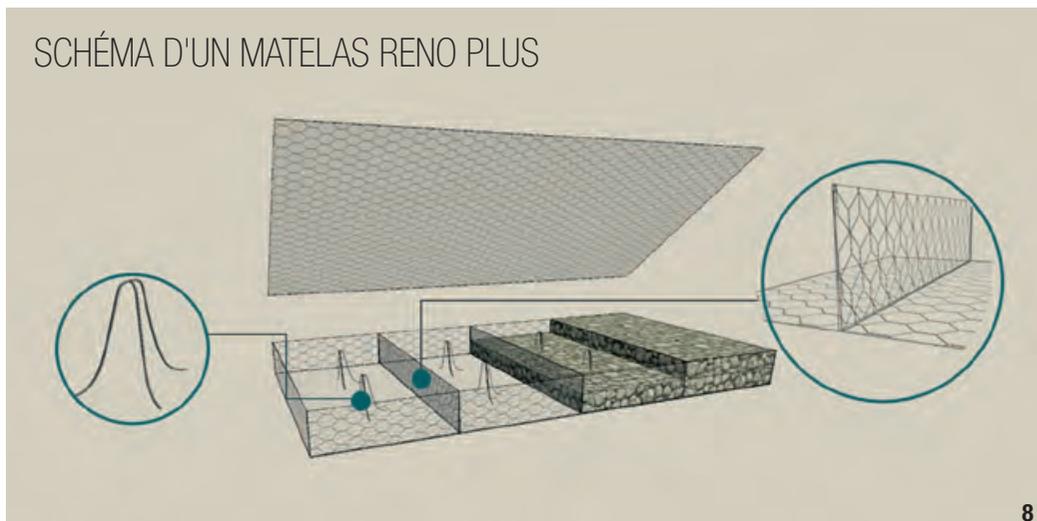
5- Phase 1 - Photo of the test in channel at constant flow with the structure without stones.

6- Phase 2 - Photo of the test in channel at a constant water height.

7- Phase 3 - Photo of the test at maximum flow.

8- Diagram of a Reno Plus mattress.

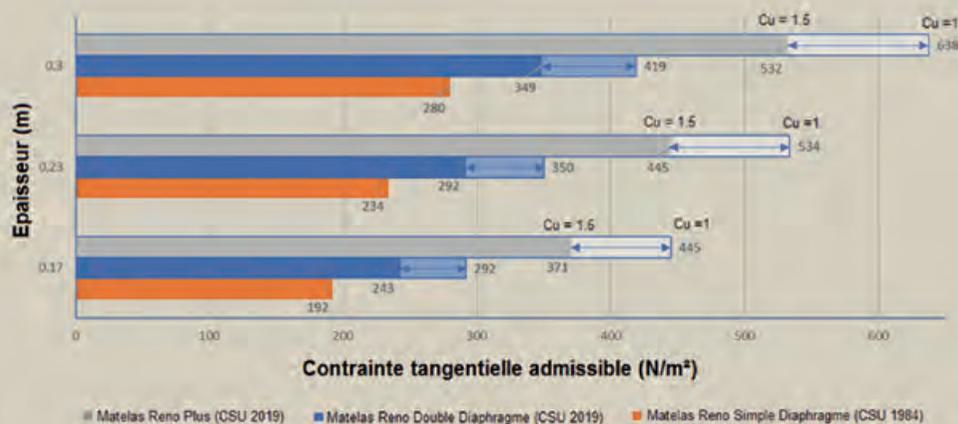
SCHÉMA D'UN MATELAS RENO PLUS



8

© MACCAFERRI

LES CONTRAINTES TANGENTIELLES ADMISSIBLES DES MATELAS RENO



© MACCAFERRI 9

9- Graphique montrant les contraintes tangentielles admissibles des Matelas Reno.

10- Matelas Reno Plus à débord avant remplissage pour le pont Simone Veil à Bordeaux.

11- Matelas Reno Plus à débord après remplissage pour le pont Simone Veil à Bordeaux.

9- Graph showing the acceptable tangential stresses for Reno mattresses.

10- Reno Plus mattress with overhang before filling for Simone Veil Bridge in Bordeaux.

11- Reno Plus mattress with overhang after filling for Simone Veil Bridge in Bordeaux.



© MACCAFERRI 10



© MACCAFERRI 11

des Matelas Reno, une nouvelle campagne d'essai physique sur des matelas à échelle réelle a été lancée en 2019-2020 à l'Université de l'État du Colorado (CSU) à Fort Collins (États Unis).

Le laboratoire d'essais hydrauliques dispose d'un canal de 60 cm de largeur et de 20 m de longueur ayant une inclinaison maximale de 8 % (utilisé lors des phase 1 & 2) et un autre de 90 cm de largeur et de 10 m de longueur pouvant être incliné à une pente allant jusqu'à 50 % (utilisé lors de la phase 3). L'objectif de ces essais était d'évaluer l'influence de différents paramètres entrant dans la confection d'un Matelas Reno pour rendre ce dernier le plus performant possible. Le déroulement des essais s'est produit en 3 phases distinctes :

→ **Phase 1** : une série d'essais sur les structures en Matelas Reno seule, sans remplissage de pierre, afin de voir l'influence de l'espacement des diaphragmes et du type de couvercle sur la distribution des vitesses dans les matelas et donner une indication sur le potentiel de dissipation d'énergie apportée par la structure métallique (figure 5).



12

© MACCAFERRI

→ **Phase 2** : une série d'essais sur les structures en Matelas Reno, remplies de pierres ayant un diamètre moyen différent (75 mm et 100 mm) et ayant un coefficient d'uniformité (C_u) de 1 (matériau mono-granulaire) et de 1,5 (granulométrie étalée). Lors de ces essais, à débit constant, la hauteur d'eau était mesurée. Plus cette dernière était élevée et plus la disposition des pierres était performante pour dissiper l'eau dans la structure et réduire l'érosion sous la cage (figure 6).

→ **Phase 3** : une série d'essais sur les structures en Matelas Reno soumises aux écoulements maximums pour déterminer les contraintes tangentielles maximales admissibles (figure 7).

Les phases 1 et 2 ont mis en évidence les observations principales suivantes :

- La réduction de l'espacement des diaphragmes dans la cage (passage de 1 m à 50 cm) n'a pas d'impact significatif sur la distribution de l'écoulement dans les cellules ;
- La mise en œuvre de pierres de petites dimensions et de granulométrie resserrée ($C_u = 1$) permet d'avoir un écoulement plus réduit à travers le matelas.

La phase 3 a été paramétrée en se basant sur les configurations les plus performantes obtenues lors des phases 1 et 2. Par ailleurs, il a été décidé de tester l'influence d'un tirant préfabriqué reliant le couvercle à la base, le X-tie®, l'objectif étant d'encre mieux confiner les pierres dans les cellules. Disposé à raison d'une unité par m² de Matelas Reno à double diaphragme, ce tirant va améliorer considérablement les performances des structures et donner naissance au Matelas Reno Plus (figure 8).

Les essais ont été réalisés selon la norme ASTM D6460, qui encadre la méthodologie d'essai pour tester les performances de structures de protection contre l'érosion du sol sous-jacent. Pour que l'essai soit concluant, il faut que, pendant une durée de 30 minutes, l'écoulement de débit constant n'entraîne pas le sol présent sous la protection mais également que la protection ne subisse pas de rupture/dégradation de nature à ne plus remplir sa fonction dans le temps.

12- Protection de berges à Roquebilière.

13- Protection de berges à Saint-Martin-de-Vésubie.

12- Protection of the banks at Roquebilière.

13- Protection of the banks at Saint-Martin-de-Vésubie.



© MACCAFERRI

13

HISTORIQUE DU MATELAS RENO

- 1960 - Invention du Matelas Reno.**
- 1966 - Protection des berges du fleuve Arno à Florence.**
- 1984 - 1^{ère} Campagne d'essai au laboratoire de l'université du Colorado à Fort Collins (USA).**
- 1990 - Invention du Matelas Reno à double diaphragme.**
- 2018 - Invention du revêtement organique PoliMac®, ultra résistant à l'abrasion.**
- 2019 - 2020 - 2^e Campagne d'essai au laboratoire de l'université du Colorado à Fort Collins (USA).**
- 2020 - Invention du Matelas Reno Plus.**

À l'issue des 30 minutes, le débit peut être incrémenté pour obtenir une contrainte tangentielle plus élevée. L'opération est répétée jusqu'à ce que l'un des deux critères seuils soit atteint. La contrainte tangentielle admissible est alors déterminée sur la base du débit maximal supporté pendant 30 minutes par la protection.

Afin de simuler au mieux la réalité, un géotextile de filtration non tissé de 200 g/m² a été installé entre le sol et les Matelas Reno. Pour éviter des effets de bords parasites, un joint en mousse polyuréthane a été mis en place à l'interface entre le bâti du canal et le Matelas Reno.

Les essais réalisés ont mis en évidence que plusieurs facteurs entraînent en considération dans la contrainte tangentielle admissible des structures en matelas gabions. Au-delà des paramètres semblables aux protections en enrochement que sont le poids volumique des pierres et leur diamètre moyen, les facteurs suivants ont également une influence remarquable (figure 9) :

- L'épaisseur du matelas, qui définit le nombre de couches de pierres disposées dans les structures. En effet plus le nombre de couches de pierres est élevé et plus la résistance de la structure est importante ;
- L'uniformité des pierres de remplissage : plus le fuseau granulaire est resserré et plus la dissipation d'énergie est importante. Le passage d'un $C_u = 1,5$ à un $C_u = 1$ augmente la résistance des structures de 20 % ;
- La présence d'un double diaphragme augmente de 25 % la résistance par rapport à un matelas à simple diaphragme ;

→ La présence de tirants verticaux préfabriqués X-ties® dans les cages (Matelas Reno Plus) augmente le confinement des pierres dans les cages et améliore les performances des structures de 50 %.

La campagne d'essai de 2019-2020 a ainsi permis d'enrichir la base de données établie à la suite d'essais réalisés en 1984 et conforter les observations de terrain sur l'efficacité du double diaphragme. À même épaisseur, le Matelas Reno Plus est 90 % plus résistant que le matelas Reno à simple diaphragme.

Ces avancées techniques rendent la solution encore plus pertinente, car elles réduisent les épaisseurs des protections, ce qui diminue les quantités de matériaux à produire, à transporter et à mettre en œuvre. Il en résulte des économies substantielles et une réduction importante de l'empreinte carbone sur chantier.

APPLICATIONS

Les premières applications ont eu lieu dès le début de l'année 2021, dans des contextes où la résistance et la durabilité des structures étaient un enjeu majeur. Parmi les chantiers, la construction du pont Simone Veil à Bordeaux, dont les 8 piles de pont fondées dans le lit de la Garonne ont été protégées de l'affouillement par des Matelas Reno Plus à débords de 30 cm d'épaisseur. La surface de pose étant en milieu aquatique, les matelas ont été pré-remplis sur la berge avec



14
© MACCAFERRI

14- Protection de berges à La Bollène en Vésubie.

14- Protection of the banks at La-Bollène en Vésubie.

l'insertion d'un géotextile placé sous la cage mais également en débord sur un ou plusieurs côtés pour assurer la continuité de la protection lors de la pose du matelas adjacent. Les cages sont alors manutentionnées à l'aide d'un palonnier soulevant la cage au moyen de suspentes de levage intégrées dans la structure lors du remplissage (figures 10 et 11). Les matelas ont ici un rôle de protection contre

l'affouillement autour des piles qui est généré par la turbulence de l'écoulement en raison de la contraction de la section hydraulique. Habituellement réalisé avec des gabions de 50 cm d'épaisseur, le recours à des matelas Reno Plus de 30 cm a pu être justifié sur la base de ces derniers essais et a permis de réduire de 40 % le volume de pierres utilisé.

Dans la vallée de la Vésubie, sévèrement touchée par la tempête Alex, de nombreuses infrastructures routières ont été affectées par la crue torrentielle. La route principale d'accès à la vallée a été emportée en plusieurs endroits et la route menant au site du Boréon en amont de Saint-Martin-de-Vésubie a été presque intégralement détruite. Pour rétablir ces axes straté-

giques, la Métropole de Nice a mobilisé les entreprises de la vallée pour entreprendre tous ces chantiers en un temps réduit. De nombreux ouvrages de soutènement ont été réalisés avec des techniques différentes suivant les sites et les matériaux disponibles. Les blocs d'enrochements déplacés par le torrent ont été utilisés principalement pour réaliser des sabots en pied de talus dans les zones fortement sollicitées. Les matériaux charriés par la rivière ont pu être réutilisés. Ils ont été criblés et concassés pour être mis en œuvre en couche de forme, en remblai structurel ou en pierre à gabions. Parmi les solutions retenues, des murs de soutènement en remblai renforcés dont les parements ont été confortés par des gabions placés en façade et une protection du pied des ouvrages contre l'affouillement par le recours à des Matelas Reno Plus de 30 cm d'épaisseur. Cette technique a été retenue pour plusieurs raisons, la résistance hydraulique aux écoulements, la durabilité du fil PoliMac® face à l'abrasion dans un contexte torrentiel (pentes longitudinales entre 2,5 et 5%), la compatibilité avec les matériaux disponibles sur site en raison du transport solide ainsi que la rapidité d'exécution. Utilisés sur 4 chantiers dans la vallée, ils permettent en outre de maintenir le monolithisme des ouvrages, les cages pouvant être liées par agrafage aux techniques en sol renforcées à parement gabions mises en place (figures 12, 13 et 14). □

PONT SIMONE VEIL À BORDEAUX

ANNÉE DE RÉALISATION : 2021

MAÎTRE D'OUVRAGE : Bordeaux Métropole

MAÎTRE D'ŒUVRE : Egis

ENTREPRISE MANDATAIRE : Bouygues Travaux Publics France

SURFACE DE MATELAS RENO PLUS À DÉBORDS : 5 000 m²

CHANTIERS EN VÉSUBIE

ANNÉE DE RÉALISATION : 2021

MAÎTRE D'OUVRAGE : Métropole Nice Côte d'Azur

MAÎTRE D'ŒUVRE : Métropole Nice Côte d'Azur

ENTREPRISE MANDATAIRE : Sibtp

SURFACE DE MATELAS RENO PLUS : 6 000 m²

ABSTRACT

THE RENO MATTRESS, 60 YEARS OF INNOVATION

ALEXANDRE PLASTRE, FRANCE MACCAFERRI

The article describes the technological changes in Reno mattresses over the last 60 years, focusing in particular on the recent test campaign to characterise the tangential stresses acceptable by the structures and define the configurations providing the best performances. Examples are presented of projects where technological changes in the structures can reduce the volumes of materials to be employed. □

EL COLCHÓN RENO, 60 AÑOS DE INNOVACIÓN

ALEXANDRE PLASTRE, FRANCE MACCAFERRI

El artículo presenta las evoluciones tecnológicas del colchón Reno a lo largo de los últimos 60 años, centrándose en particular en la reciente campaña de ensayos para caracterizar las tensiones tangenciales admisibles por las estructuras y definir las configuraciones que aportan las mejores prestaciones. Se presentan ejemplos de obras donde los avances tecnológicos en las estructuras permiten reducir los volúmenes de materiales utilizados. □



1
© G. PERGENT

SÉQUESTRATION DU CARBONE BLEU : UNE SOLUTION POUR RÉDUIRE LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

AUTEURS : GÉRARD PERGENT, PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, ÉQUIPE ÉCOSYSTÈMES LITTORAUX & GIS POSIDONIE, UNIVERSITÉ DE CORSE PASCAL PAOLI - BRIAC MONNIER, DOCTEUR, ÉQUIPE ÉCOSYSTÈMES LITTORAUX & GIS POSIDONIE, UNIVERSITÉ DE CORSE PASCAL PAOLI - CHRISTINE PERGENT-MARTINI, MAÎTRE DE CONFÉRENCE, ÉQUIPE ÉCOSYSTÈMES LITTORAUX & GIS POSIDONIE, UNIVERSITÉ DE CORSE PASCAL PAOLI

LA COMPENSATION CARBONE, QU'ELLE SOIT OBLIGATOIRE OU VOLONTAIRE, EST APPELÉE À SE DÉVELOPPER DANS LES PROCHAINES ANNÉES AU SEIN DE L'ENTREPRISE. L'ÉMERGENCE DE PROJETS À L'ÉCHELLE LOCALE OU RÉGIONALE, BÉNÉFICIAINT D'UNE MEILLEURE TRAÇABILITÉ, EST AUJOURD'HUI RECHERCHÉE. LA COMPENSATION BASÉE SUR LE CARBONE BLEU APPARAÎT COMME UNE STRATÉGIE PERTINENTE EN COMPLÉMENT DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS. LES RÉSULTATS DU PROGRAMME RenforC PERMETTRONT DE DISPOSER D'UNE OU DE PLUSIEURS TECHNIQUES FIABLES ET SCIENTIFIQUEMENT VALIDÉES POUR PROPOSER DES ACTIONS DE COMPENSATION PERTINENTES.

CONTEXTE

L'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, depuis le début de l'ère industrielle et principalement depuis quelques décennies, se traduit par toute une série de dérèglements climatiques avec des conséquences majeures au niveau écologique, économique mais également humain (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021). La principale stratégie, mise en place pour limiter ces impacts, consiste en une politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), initiée par le Protocole de Kyoto de 1997, et formalisée par l'Accord de Paris, en 2015. Une approche complémentaire permet de développer des actions pour renforcer la capture du carbone, et notamment celle du dioxyde de carbone (CO₂). En parallèle à la réduction des émissions, elle se propose, en effet,

de piéger ces GES au moyen de procédés techno-industriels mais également biologiques ("solutions basées sur la nature"). Ces approches ciblent principalement le milieu terrestre à travers la capture de CO₂ à la source et son stockage géologique (injection dans des aquifères profonds et des gisements pétroliers), sa valorisation (carbonatation du béton recyclé) ou plus traditionnellement des actions de reforestation (capture du carbone par la photosynthèse des végétaux).

La compensation carbone est un mécanisme financier qui consiste à contrebalancer ses propres émissions de CO₂ par le financement de projets de réduction et/ou de séquestration de carbone. À l'échelon national, cette approche s'inscrit dans la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), qui vise à réduire l'empreinte carbone de la consommation française et atteindre

1- Herbière de Posidonie (à gauche) et herbière dégradée par l'ancrage des bateaux de plaisance (à droite).

1- Posidonia oceanica (on the left) and seagrass harmed by anchoring of pleasure boats (on the right).

la neutralité carbone d'ici 2050, neutralité définie comme étant l'équilibre entre les émissions et séquestrations par les puits (bilan carbone = émission - séquestration). Cette démarche, qui peut être volontaire, est également utilisée dans des cadres institutionnels comme dans le protocole de Kyoto ou

le nouveau dispositif CORSIA, entré en application en janvier 2021⁽¹⁾.

Toutefois plus de la moitié de la fixation du carbone a lieu dans les océans (carbone bleu), à travers la photosynthèse du phytoplancton et de la végétation côtière. Cette végétation côtière (mangroves, prés salés et herbiers marins), qui n'occupent qu'une très faible surface (moins de 1 % de la surface des océans), fixe près de 18 % du carbone bleu mais surtout stocke plus de la moitié de ce carbone (accumulation du carbone sous forme de matière organique dans le sol marin). Parmi ces écosystèmes, les herbiers de Posidonie, une plante marine de Méditerranée, jouent un rôle particulier. En effet, cette plante, qui couvre plus de 2 millions d'hectares, stocke 8 fois plus de carbone que les sols forestiers au sein d'une structure bio-construite unique appelée "la matre" qui peut atteindre plusieurs

mètres d'épaisseur (jusqu'à 8 m). Les conditions anoxiques et la composition de cette structure rendent la matre très peu putrescible contribuant ainsi à la séquestration d'importantes quantités de carbone (2500 à 3000 t équivalent CO₂ par hectare) sur plusieurs milliers d'années (voir encadré "Posidonie"). Ces herbiers jouent donc un rôle majeur dans la fixation et la séquestration du carbone et contribuent à la réduction des impacts du changement climatique. Malheureusement, du fait des activités humaines, ces herbiers sont soumis à de forts impacts et régressent dans plusieurs secteurs de Méditerranée (environ 10 à 20 % au cours du XX^e siècle). Même si ces herbiers sont aujourd'hui protégés (conventions internationales, Directives Européennes, législations nationales), les surfaces perdues sont importantes, de même que les services écosystémiques qui en découlent. Par rapport aux années 60, on enregistre depuis le milieu des années 80, une forte augmentation des dommages mécaniques engendrés par certaines activités comme l'ancrage des grandes unités de plaisance qui provoque des destructions significatives de ces herbiers (figure 1).

Ainsi, dans plusieurs secteurs particulièrement attractifs, comme la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio (RNBB) en Corse qui reçoit plus des deux tiers des unités de plaisance de l'île, plusieurs dizaines d'hectares d'herbiers de Posidonie ont été détruits au cours de ces dernières décennies, principalement dans la baie de Sant'Amanza où une perte de 8 ha a été mesurée entre 2019 et 2020 (-16 % des surfaces présentes). Face à cette situation, de nouvelles mesures réglementaires ont été mises en place par les services de l'État (voir encadré "Mouillages"). Ainsi le mouillage des grandes unités de plaisance (supérieures à 24 m) est aujourd'hui interdit sur les herbiers dans toute la RNBB, 14 mouillages organisés ont été installés dans la baie de Sant'Amanza, associés à une zone d'interdiction de mouillage de 60 ha pour tous les bateaux, quelle que soit leur taille.

PROJET RenforC

Du fait des anciennes dégradations subies par l'herbier de Posidonie et des nouvelles mesures de protection mises en place, la baie de Sant'Amanza constitue aujourd'hui un site atelier unique pour tester de nouvelles méthodes de restauration de ces herbiers. La restauration de

POSIDONIE

La Posidonie (*Posidonia oceanica*) n'est pas une algue mais une plante à fleurs endémique de Méditerranée. Elle constitue de vastes herbiers entre la surface et 40 m de profondeur qui assurent de nombreux services écosystémiques (source de nourriture, pôle de biodiversité, oxygénation des eaux, protection du littoral contre l'érosion, frayère et nurserie et atténuation des impacts du changement climatique). Elle édifie une structure sous-marine bio-construite "la matre" (rhizomes, racines et sédiment qui colmate les interstices), qui constitue un puits de carbone majeur.

MOUILLAGES

Le développement de la grande plaisance et de ses impacts sur les herbiers de Posidonie a conduit les autorités maritimes à interdire l'ancrage des bateaux de plus de 24 m sur cet habitat (Arrêté Préfectoral N°123/2019). La délimitation précise de ces zones d'interdiction fait l'objet d'arrêtés spécifiques depuis 2020 en se basant sur les cartographies réalisées par les différentes équipes scientifiques. À l'intérieur de ces zones, des dispositifs de mouillage sur corps morts ou vis à sable peuvent être installés pour permettre l'accueil de ces bateaux sans que cela n'impacte significativement les herbiers (zone de mouillage et d'équipements légers - ZMEL).

la végétation côtière, qui vise à augmenter les surfaces occupées par ces habitats considérés comme de véritables puits de carbone naturels, constitue un objectif prioritaire dans un contexte de lutte contre le changement climatique. Si de nombreux programmes permettent d'ores et déjà de restaurer les mangroves avec des résultats intéressants (techniques fiables, coûts réduits, rapidité), les expérimentations sur les herbiers marins restent encore confidentielles du fait des limites inhérentes aux protocoles de transplantation utilisés, aux espèces ciblées (taux de survie et de croissance), des coûts engendrés (intervention en milieu marin) et des restrictions réglementaires (espèce protégée nécessitant des dérogations). D'autre part, les gestionnaires du milieu marin sont très vigilants vis-à-vis de "restaurations alibis" qui ne viseraient qu'à "compenser" de futures destruc-

tions dans le cadre d'aménagements littoraux.

Dans le cadre de l'appel à projets 2020 de la Fondation Setec sur la lutte contre le dérèglement climatique, le projet "RenforC - Renforcement des puits de carbone en milieu marin" du GIS Posidonie a été retenu afin d'initier un projet pilote de restauration écologique de ces herbiers. Suite à cette distinction, la RNBB (Office de l'Environnement de la Corse) et l'Office Français de la Biodiversité se sont associés à cette initiative (voir encadré "GIS Posidonie"). Plusieurs équipes scientifiques ont également été identifiées, au regard de leurs compétences dans le domaine de la restauration des herbiers, pour participer au projet : THALASSA Marine Research & Environmental Awareness (France) ; Université de Palerme-Biosurvey (Italie) ; Université des îles Baléares-IMEDEA (Espagne) ; Interna-

GROUPEMENT D'INTÉRÊT SCIENTIFIQUE GIS POSIDONIE

Le Groupement d'Intérêt Scientifique pour l'Environnement marin, en particulier des Posidonies (GIS Posidonie) est une association loi 1901, créée en mars 1982, qui regroupe des chercheurs issus de quatre universités (Marseille, Corse, Nice et Perpignan). Il intervient dans l'acquisition de connaissances sur le milieu marin, la valorisation scientifique de ces connaissances, l'aide à la conservation, à la restauration et à la gestion de l'environnement marin (<https://gisposidonie.osupytheas.fr>).

tional School for Scientific Diving (ISSD) "Anna Proietti Zolla" (Italie).

Le programme RenforC consiste à élaborer et valider une stratégie pour le renforcement des puits de carbone en milieu marin à travers la mise en place d'un pilote expérimental pour l'herbier de Posidonie de la baie de Sant'Amanza. L'objectif de ce programme est de tester, sur un "site atelier" unique, différentes stratégies (conservation, recolonisation naturelle) et méthodes de restauration (techniques de fixation, bouturages) des herbiers de Posidonie dégradés, et d'évaluer leur coût au niveau écologique et financier, pour tenter de reconstituer le plus rapidement possible les services écosystémiques apportés par ces derniers. Les résultats obtenus pourront être extrapolés à l'ensemble du littoral méditerranéen national.

Le projet RenforC se déroule, dans un premier temps, sur une période de trois années (2021-2023) et s'articulera autour de plusieurs actions/phases successives :

Phase 1 - Printemps 2021 : réalisation d'un séminaire sur les stratégies de renforcement des puits de carbone en milieu marin et plus particulièrement sur la restauration des herbiers de Posidonie. Au cours de ce séminaire sont abordés, (i) les stratégies et les approches éthiques de restauration (code de bonne conduite, contraintes réglementaires), (ii) les techniques disponibles et leur efficacité, (iii) les techniques innovantes, (iv) la présentation du site pilote de la baie de Sant'Amanza et (v) la mise en place d'un calendrier pour la réalisation du pilote.

Phase 2a - Printemps/Été 2021 : réalisation des transplantations en collaboration avec les différentes équipes sélectionnées et mise en place d'un état de référence des sites récepteurs (photogrammétrie, dénombrement de Posidonies présentes). Cet état de référence aura un intérêt particulier dans le suivi de la recolonisation naturelle de l'herbier, et ce afin de préciser l'apport réel des transplantations.

Phase 2b - Printemps/Été 2022 et 2023 : retours sur site pour suivre l'évolution des transplants et de l'herbier adjacent (recolonisation naturelle) en collaboration avec les équipes impliquées.

Phase 2c - Automne 2023 : séminaire de restitution pour dresser un bilan des actions engagées (sélection des protocoles les plus performants, évaluation coûts/bénéfices) et définir une stratégie à long terme (réplication à de nouveaux sites-atelier). ▷

2- Représentations schématiques et photographies des zones de transplantations mises en œuvre dans la baie de Sant'Amanza (Bonifacio, Corse).

2- Schematic and photographic representations of the transplantation areas established in Sant'Amanza Bay (Bonifacio, Corsica).

TECHNIQUES DE TRANSPLANTATION MISES EN ŒUVRE

Quatre techniques de transplantations de Posidonies sont testées dans un site unique, constitué de mattes mortes suite à la dégradation de l'herbier par l'ancrage de grandes unités de plaisance, à proximité d'un herbier naturel. Au total, près de 12000 Posidonies sont prélevées, en plongée sous-marine, dans un site proche, à une profondeur équivalente, en respectant un espacement minimum de 2 m entre les plantes pour ne pas endommager l'herbier en place. Ces boutures sont conservées dans de l'eau de mer et fixées sur différents supports avant d'être plantées dans le site expérimental entre 13 et 15 m de profondeur (figure 2).

1- Protocole de transplantation THALASSA Marine Research & Environment Awareness

Les boutures sont fixées sur des tuteurs en acier galvanisé puis fixées au substrat en plongée, sur une zone d'environ 225 m², en 7 îlots de 3 m² avec une densité élevée équivalente à l'herbier adjacent non impacté (200 plantes par m²), soit plus de 4400 plantes (figure 2).

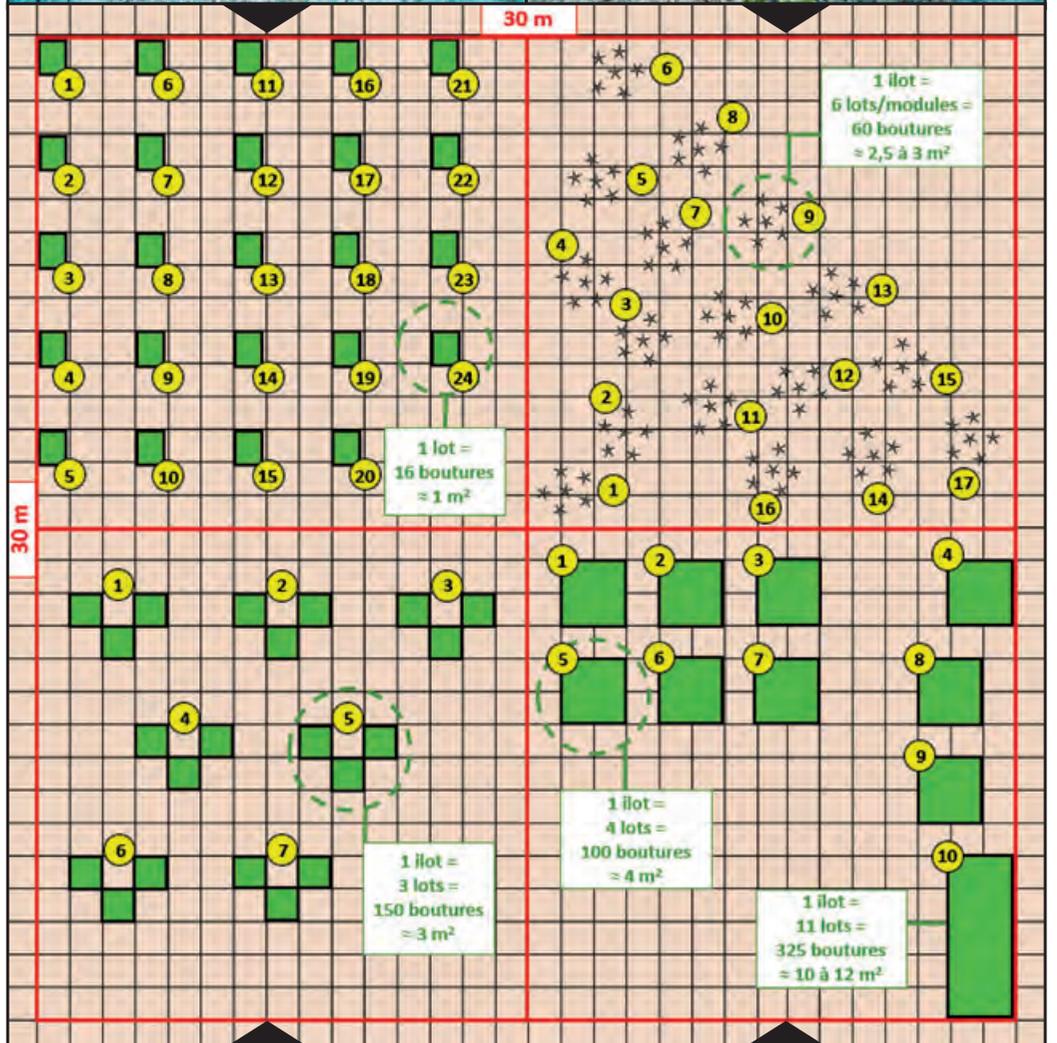
2- Protocole de transplantation de l'Université des îles Baléares-IMEDEA

Les boutures sont fixées sur des tuteurs en fer en forme de "U" puis fixées au substrat en plongée, sur une zone d'environ 225 m², en 24 îlots de 1 m² avec une densité plus faible que celle de l'herbier adjacent non impacté (70 plantes par m²), soit près de 1700 plantes (figure 2).

Protocole 2 : IMEDEA CSIC-UIB



Protocole 3 : UNIPA-Biosurvey



Protocole 1 : THALASSA MR & EA



Protocole 4 : ISSD

3- Protocole de transplantation de l'Université de Palerme-Biosurvey

Les boutures sont fixées à des modules en forme d'étoile à 5 branches de 75 cm de diamètre, sur une zone d'environ 225 m². Ces modules sont ancrés au substrat grâce à un système de piquet ou vis à sable. Ces systèmes innovants et brevetés sont constitués d'amidon et de polyesters biodégradables dérivés d'huiles végétales, avec une biodégradabilité sans effet toxique. Au total, 17 îlots constitués de 6 étoiles chacun sont positionnés, correspondant ainsi à plus de 3000 plantes avec une densité moyenne de 23 plantes par m² (figure 2).

4- Protocole de transplantation de l'International School for Scientific Diving (ISSD)

Les boutures sont positionnées et maintenues en réalisant des perforations dans un tapis en fibres de coco préalablement fixé sur le substrat, comparable à ceux utilisés pour stabiliser le substrat et faciliter la re-végétalisation des pentes en milieu terrestre. Au total, 10 tapis de 4 à 12 m² sont positionnés sur une zone d'environ 225 m². Au sein de chaque tapis, les boutures sont regroupées en îlots de 50 plantes par m², soit près de 2500 plantes (figure 2).

Un état de référence basé sur plusieurs descripteurs de l'herbier (recouvrement, densité, pourcentage de rhizomes "plagiotropes" - qui colonisent le substrat adjacent, ...) est réalisé tant pour les

4 expérimentations que pour l'herbier naturel adjacent. D'autres mesures prenant en compte notamment la biodiversité seront réalisées de façon à mettre en place un suivi le plus précis possible de la réinstallation de l'herbier suite à l'arrêt des pressions (ancrage). Ceci devrait permettre d'établir un bilan coût/bénéfice des transplantations par rapport à la recolonisation naturelle, d'évaluer si cela est pertinent et de sélectionner la méthode de transplantation la plus adaptée.

COMPENSATION BASÉE SUR LE CARBONE BLEU

Le marché de la compensation carbone est caractérisé par deux types de fonctionnement. D'une part, le marché de conformité (ou obligatoire) fait référence aux mécanismes de compensation carbone mis en place dans le cadre du protocole de Kyoto (MDP/MOC). Ce marché a pour objectif de permettre aux États de compenser une partie de leurs émissions via l'investissement dans des projets de réduction de GES hors de leur territoire (principalement vers les pays en voie de développement) au travers d'échanges de crédits carbonés certifiés par les Nations Unies. D'autre part, le marché volontaire, qui s'est développé parallèlement au précédent, dispose d'une plus grande flexibilité en ce qui concerne les conditions de mise en œuvre, le type de projets développés et la localisation. D'après l'ADEME, les principales catégories de projets mis en œuvre au titre de la compensation volontaire, sont axées

sur des offres associées aux énergies renouvelables, à l'utilisation rationnelle de l'énergie ou à la conservation ou la restauration d'écosystèmes terrestres (essentiellement forestiers), avec le plus souvent une dimension humanitaire. Bien que la localisation des réalisations soit très diversifiée, les projets de séquestration carbone sont le plus souvent menés hors d'Europe et concernent majoritairement des pays tropicaux d'Asie, d'Afrique et d'Amérique du Sud. Au cours des dernières années, le marché de la compensation volontaire s'est tourné vers une renationalisation des actions visant à favoriser le financement de projets pour la séquestration du carbone à l'échelle locale ou régionale. Cependant, à l'échelon du territoire national, les propositions de projets hors milieux forestiers sont très réduites voire inexistantes. Aussi, l'émergence de nouvelles approches pour diversifier les solutions et offres de séquestration naturelle du carbone s'avère nécessaire. Parmi les solutions fondées sur la nature, la conservation et la restauration des puits de carbone, associées aux écosystèmes à carbone bleu, permettraient de contribuer à lutter efficacement contre les effets du changement climatique. Ces écosystèmes représentent des candidats idéaux pour le développement de projets de compensation. En effet, au travers de l'achat de "crédits carbone bleu" visant à financer de la conservation et/ou du renforcement, de la séquestration et du stockage, c'est l'ensemble des services écosystémiques participant à atténuer

le changement climatique (protection contre les tempêtes, prévention de l'érosion du littoral, habitats pour de nombreuses espèces, sécurité alimentaire pour les communautés locales) qui bénéficiera de cette démarche. Du fait des vastes surfaces occupées par les herbiers de Posidonie et de leur grande capacité de stockage, notamment par rapport aux écosystèmes forestiers, cette stratégie semble tout particulièrement bien adaptée à l'ensemble du littoral méditerranéen.

Aujourd'hui, une multitude d'acteurs aux statuts juridiques variés (entreprises, associations, collectivités, ONG) ont d'ores et déjà pris part au marché de la compensation volontaire et le nombre de structures parties prenantes devrait augmenter dans les prochaines années. En effet, même si la SNBC arbore un caractère non-contraignant, les dernières évolutions législatives (Loi Climat et Résilience, août 2021) laissent à penser qu'une réglementation étendue et plus stricte verra le jour très prochainement.

Dans un contexte d'urgence climatique, l'intégration des écosystèmes à carbone bleu dans des démarches de compensation volontaire offrirait l'opportunité aux acteurs de réduire leur empreinte écologique et de s'engager en faveur de l'environnement marin et d'une société plus durable. □

1- Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale destiné à compenser la fraction des émissions de CO₂ des vols internationaux excédant leur niveau de 2020.

ABSTRACT

BLUE CARBON SEQUESTRATION: A SOLUTION TO MITIGATE THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE?

GÉRARD PERGENT - BRIAC MONNIER - CHRISTINE PERGENT-MARTINI

Carbon offsetting is a financial mechanism which consists in offsetting one's CO₂ emissions by funding projects for the reduction and/or sequestration of carbon. Over half of carbon fixation takes place in the oceans (blue carbon), especially through phytoplankton and coastal vegetation. *Posidonia oceanica*, a Mediterranean marine plant, plays a major role in carbon fixation and sequestration, because it stores 8 times more carbon than forest soils. The objective of the RenforC programme ("Reinforcement of carbon sinks in the marine environment"), supported by the Setec Foundation, the Corsican Office for the Environment and the French Office for Biodiversity, is to develop a strategy for reinforcing carbon sinks in the marine environment by establishing an experimental demonstration project in southern Corsica. The aim of this programme is to test, on a single "workshop" site, various strategies and methods for restoring *Posidonia oceanica* harmed by the anchoring of large pleasure boats (now prohibited), and evaluating their cost in ecological and financial terms. □

CAPTURA DEL CARBONO AZUL: ¿UNA SOLUCIÓN PARA REDUCIR LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO?

GÉRARD PERGENT - BRIAC MONNIER - CHRISTINE PERGENT-MARTINI

La compensación de carbono es un mecanismo financiero que consiste en contrarrestar las emisiones de CO₂ mediante la financiación de proyectos de reducción y/o captura del carbono. Más de la mitad de la fijación del carbono tiene lugar en los océanos (carbono azul), en especial a través del fitoplancton y la vegetación costera. Las praderas de *Posidonia*, una planta marina del Mediterráneo, desempeñan un papel clave en la fijación y la captura del carbono, ya que almacena ocho veces más carbono que los suelos forestales. El objetivo del programa RenforC "Refuerzo de los pozos de carbono en medio marino", apoyado por la Fundación Setec, la Oficina para el Medio Ambiente de Córcega y la Oficina Francesa de la Biodiversidad, consiste en elaborar una estrategia para reforzar sumideros de carbono en medio marino mediante la realización de una prueba piloto experimental en el sur de Córcega. La finalidad de este programa es probar, en una ubicación "taller" única, distintas estrategias y métodos de restauración de las praderas de *Posidonia* deterioradas por el anclaje de grandes yates (ahora prohibido) y evaluar su coste ecológico y financiero. □



© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

LINASTER, UN OUTIL DE GESTION DE FLOTTE ET DE SUIVI DE PRODUCTIVITÉ AU SERVICE DES CHANTIERS

AUTEURS : YOHANN RABOT, DIRECTEUR DU SERVICE TOPOGRAPHIE ET DATA MANAGEMENT, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - VINCENT MORISSEAU, RESPONSABLE DATA MANGEMENT, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - THOMAS BORY, TELEMATIC CONTROL ROOM MANAGER, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - AURÉLIEN FABRE, TECHNICAL OFFICE MANAGER, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

EN 2018, SOUS L'IMPULSION DE VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT, PLUSIEURS ENTITÉS DE VINCI CONSTRUCTION (SOGEA-SATOM, SPIECAPAG PUIS VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS ET VINCI CONSTRUCTION FRANCE) SE RÉUNISSENT AUTOUR D'UNE AMBITION COMMUNE : CAPTER, TRAITER ET EXPLOITER LES DONNÉES ISSUES DES ENGINES EN ACTION SUR LES PROJETS AFIN D'AMÉLIORER LA GESTION DU PARC MATÉRIEL ET OPTIMISER LA PRODUCTIVITÉ SUR SITE. CES DEUX AXES DE PROGRESSION AGISSENT DIRECTEMENT SUR DEUX LEVIERS ESSENTIELS QUE SONT LA PERFORMANCE ÉCONOMIQUE ET LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE DANS LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION ET NOTAMMENT DANS CELUI DES PROJETS LINÉAIRES OÙ LA COMPOSANTE DU TERRASSEMENT EST MAJEURE.

GENÈSE DU PROJET

Pour réaliser ses chantiers, Vinci Construction Terrassement met en œuvre des moyens matériels importants. Ainsi les engins de chantier constituent la composante essentielle de la production sur un projet. Il est donc primordial que la gestion de ce parc matériel évolue afin de permettre à l'entreprise d'atteindre ses objectifs globaux. LINASTER s'inscrit parfaitement dans cette volonté d'innovation et constitue l'aboutissement d'une démarche débutée il y a de nombreuses années (figure 2). Tout a débuté par le fait que les différents fabricants, en équipant les engins de chantier de modules élec-

troniques, ont permis la récupération de données sur leur utilisation, les rendant de fait de plus en plus intelligents. Il y a une dizaine d'années ces données étaient récupérées uniquement par les mécaniciens dans un objectif de gestion de flotte, mais il y avait déjà une volonté d'aller plus loin (figure 3).

Cette ambition a pris forme en 2018 lorsque Vinci Construction Terrassement a décidé d'investir sur le sujet de l'analyse de ces données. Plusieurs entités du pôle Construction de Vinci (Sogea-Satom, Spiecapag) se retrouvant autour de cette même ambition, le projet LINASTER a vu le jour. Les développements ont donc commencé en 2019 avec plusieurs expé-

1- Engins connectés en action.

1- Connected machines in action.

rimentations dont une en grande nature sur le projet du Contournement Ouest de Strasbourg. Ces études n'ont fait que confirmer l'intérêt pressenti initialement. Ceci a permis de structurer les moyens autour de ce développement pour qu'aujourd'hui, en 2021, LINASTER soit une solution opérationnelle. À travers cette solution on adresse deux volets de la produc-

tion : le suivi des engins et le suivi de la productivité.

Mais d'où vient le nom LINASTER et en quoi cela consiste-t-il ?

L'objectif de ce développement est d'apporter une solution innovante aux projets d'infrastructures LINéaires pour les travaux d'ASsainissement et de TERrassement. LINASTER capte, stocke, analyse et restitue les données produites par les engins sur ces projets (figure 4).

CAPTATION DE DONNÉES

Dans le cadre de ce projet deux types de données sont collectés. Il y a d'une part les données que l'on appelle "constructeur". Ces données existent

HISTORIQUE DU PROJET



2
© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

depuis longtemps et étaient jusqu'alors remontées sur des serveurs propres au constructeur pour n'être utilisées qu'à des fins de maintenance du matériel. On y retrouve des informations d'utilisation journalière du matériel comme les heures de fonctionnement, la consommation ou encore les heures de ralenti. LINASTER permet ainsi sous une même interface de récupérer et d'agréger l'ensemble de ces données quelle que soit la marque de l'engin. D'autre part, des données sont générées par des boîtiers externes que l'on vient rajouter sur les engins. Ces boîtiers, équipés d'un récepteur GNSS, permettent de connaître la position de l'engin à haute fréquence et donc quasiment en temps réel. La télématique, qu'elle soit embarquée ou externe, permet de récupérer les informations de matériel par

- 2- Historique du projet.
- 3- Extrait journal des terrassiers juillet 2013.
- 2- History of the project.
- 3- Excerpt from the earthworks contractor magazine, July 2013.

des réseaux GPS (Inmarsat, Iridium...) ou GSM (2G, 3G...). Que ce soient les constructeurs ou les fournisseurs de boîtiers externes, un serveur collecte les informations et les rend disponibles sur un portail internet ou via des web services. C'est par ce biais que LINASTER collecte l'ensemble des informations pour les stocker (figure 5).

- ### STOCKAGE ET ANALYSE
- Les choix technologiques ont été guidés par 3 considérations principales :
- Utilisation de technologies actuelles et performantes ayant un historique reconnu ;
 - Technologies maîtrisées par l'équipe en interne pour pouvoir assurer la maintenance de la solution ;
 - Développer une solution métier au sein de l'entreprise afin qu'elle réponde à ses besoins spécifiques (figure 6).
- Ainsi les principales caractéristiques de l'architecture sont :
- Une base de données relationnelle PostgreSQL avec l'extension postgis afin de pouvoir effectuer des requêtes spatiales ;
 - Une architecture client - serveur :

- Coté serveur, une web api de type REST. L'api est basée sur les technologies .NET 5 et Entity Framework et est développée en C#;
 - Coté client, une single-page application (SPA) en HTML5 : L'application est développée avec le Framework Angular. Les modules de cartographie 2D et 3D sont basés sur LeafletJS et CesiumJS ;
 - Les applicatifs métier (module d'intelligence artificielle pour le calcul des cycles, ...) sont développés en python.
- ### CONTENEURISATION
- L'ensemble des applicatifs est conteneurisé (Docker) afin de faciliter le déploiement, la gestion et la maintenance.

3
© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

INTERFACE UTILISATEUR

LINASTER étant une solution web, l'utilisateur y accède depuis son ordinateur, tablette ou smartphone à partir d'un simple navigateur web. La solution s'organise sous forme de différents modules qui répondent à une catégorie de besoins opérationnels.

MODULE "ACTUALITÉS"

Pour les différents responsables présents sur un projet, le premier besoin est d'avoir un aperçu global de la situation opérationnelle sur le terrain.

Ainsi un responsable matériel va vouloir savoir où sont les engins afin qu'en cas de panne le mécanicien puisse intervenir rapidement. Une cartographie permet la localisation des engins en temps réel grâce aux données GPS récupérées par les boîtiers comme expliqué ci-dessus.

Un conducteur de travaux va vouloir identifier les engins qui présentent une anomalie apparente comme ceux qui ne sont pas connectés, ceux qui ont une consommation excessive ou un taux de ralenti important ou des anomalies mécaniques importantes. En parallèle de la cartographie on va retrouver un tableau synthétique des engins concernés à partir duquel il est possible d'accéder au détail des informations afin de comprendre les causes et de mettre en place les actions correctives rapidement. Une direction de chantier va vouloir contrôler que la production est conforme au planning prévisionnel afin de prévenir toutes dérives éventuelles. La solution intègre un module d'intelligence artificielle, décrit ci-après, capable de suivre avec précision les cycles de production des différents échelons connectés. Les valeurs cumulées sont rappelées dans cette interface pour un aperçu rapide.

Un chef de chantier va vouloir connaître les prévisions météo. Les prévisions détaillées de la journée sont présentées sous forme synthétique avec un détail toutes les 3 heures et une vision à 3 jours. Ceci lui permet d'adapter son programme si nécessaire.

MODULE "INDICATEURS"

La bonne santé d'un chantier dépend de nombreux facteurs qui doivent être corrélés entre eux. Par exemple, une consommation, qui peut sembler excessive pour un engin, doit être reliée à la production avant de pouvoir confirmer si la consommation est effectivement excessive.

Directement via cette interface, l'utilisateur a la possibilité de combiner ces

différents indicateurs, d'analyser l'évolution de ces indicateurs dans le temps et de comparer ces indicateurs avec des moyennes calculées sur l'historique des données.

MODULE "CARTOGRAPHIE"

La construction d'une infrastructure quelle qu'elle soit se base sur un ensemble d'éléments cartographiques et géométriques. On y retrouve notamment des relevés topographiques initiaux, des plans d'exécution, des ouvrages élémentaires. Toute cette géométrie est garantie par un suivi topographique régulier tout au long du chantier. La manipulation de ces données requiert l'utilisation de logiciels professionnels experts peu accessibles pour des raisons de formation et de coût au niveau du chantier (licences et stations de travail nécessaires).

Le module cartographie 2D/3D (figure 7) intégré permet de visualiser et d'analyser différents types de données que ce soient des nuages de points, des ortho-images, des plans ou autres modèles 3D.

L'utilisation est facilitée en limitant les actions au strict nécessaire à partir d'un simple navigateur web et dispense l'utilisateur de formation spécifique :

4- Architecture générale du projet.
5- Captation des données.

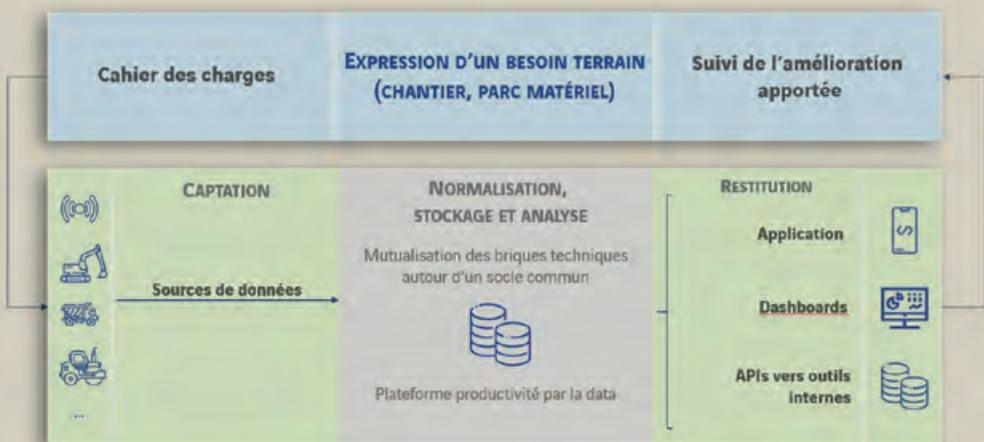
4- General architecture of the project.
5- Data capture.

- Accéder aux différentes informations sous forme de calques permettant leur historisation ;
- Comparer la morphologie du terrain à différentes dates afin d'analyser l'avancement des travaux ;
- Prendre des mesures simples (distance, surface, volume) ;
- Géolocaliser un point précis dans le système de coordonnées du chantier ;
- Annoter spatialement les données ;
- Mettre en relation la position des engins dans le contexte du chantier donc en superposition du relevé topographique, des ortho images et des zones de déblai/remblai.

MODULE "ENGINS"

La problématique du service matériel est d'accéder simplement à l'ensemble des informations disponibles

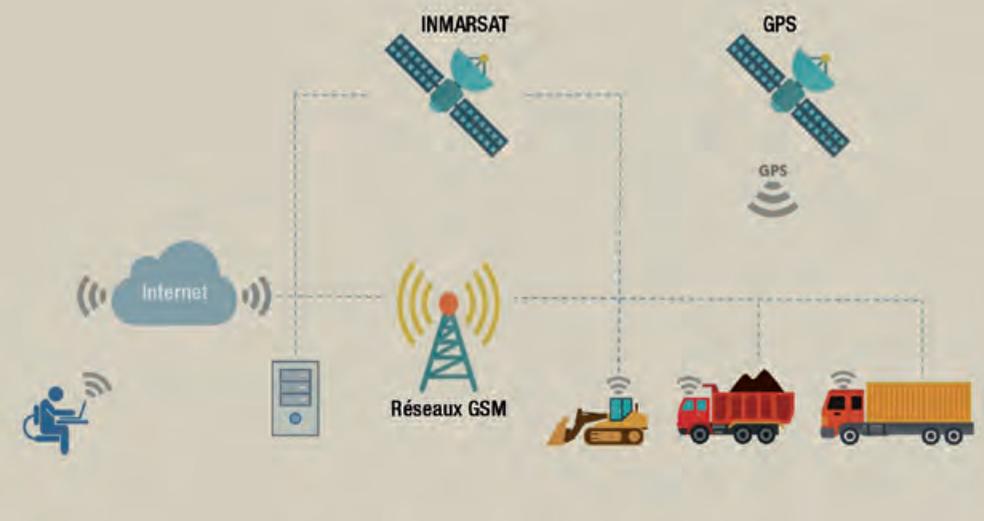
ARCHITECTURE GÉNÉRALE DU PROJET



4

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

CAPTATION DES DONNÉES



5

© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

d'un engin. Ainsi, par le biais de la liste d'engins enrichie avec les principaux indicateurs calculés sur une période choisie (taux de ralenti moyen, consommation moyenne, nombre d'anomalies ou autre), l'utilisateur accède par un simple clic à l'ensemble des informations de l'engin sous forme de graphique ou de liste.

Ainsi pour l'ensemble des engins, l'utilisateur accède :

- À l'historique des données de télématique et de production sous forme graphique afin de mettre les deux en relation ;
- À l'historique des données sous forme de liste téléchargeable facilement exploitable par un système tiers ;
- À l'historique de la position de l'engin dans une cartographie pour suivre ses différentes affectations.

MODULE "PRODUCTION"

Le suivi de la production pour un chantier de terrassement consiste principalement à suivre le "mouvement des terres". On cherche donc à suivre les quantités de matériaux déplacés depuis une zone de déblai vers une zone de remblai.

L'utilisateur va pouvoir, à partir de l'interface, accéder à différents niveaux de zoom de la production sur le projet :

- Au niveau global du projet, il est possible de visualiser les mouve-



6 © VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

6- Boîtier GNSS externe sur engin.

7- Architecture informatique.

6- External GNSS unit on machine.

7- IT architecture.

ments de terre cumulés sur une période donnée, via un diagramme de flux ou diagramme de Sankey (figure 8). Ce diagramme permet de visualiser d'une part, les liens entre les différentes zones de déblai et remblai ou dépôt, et d'autre part de quantifier les volumes de matériaux correspondants grâce à la largeur des flèches. Le détail de ces informations est également accessible sous forme de liste téléchargeable.

→ Au niveau d'un échelon, le suivi de la production est réalisé en comptant le nombre de cycles effectué par chacun des engins de transport composant l'échelon. L'échelon, composé d'une pelleuse et de plusieurs engins de transport ou d'un bouteur et de plusieurs décapeuses (scrapers), est l'unité de travail d'un terrassier. Le module d'intelligence artificielle développé permet de calculer le temps de chargement, le temps de transport, le temps de déchargement, le temps de ralenti ainsi que la distance totale pour chaque cycle de transport. Ces informations sont présentées sous forme de graphiques permettant aisément de suivre le détail de chaque échelon et donc de mettre en place les actions correctives si nécessaire (figure 9).

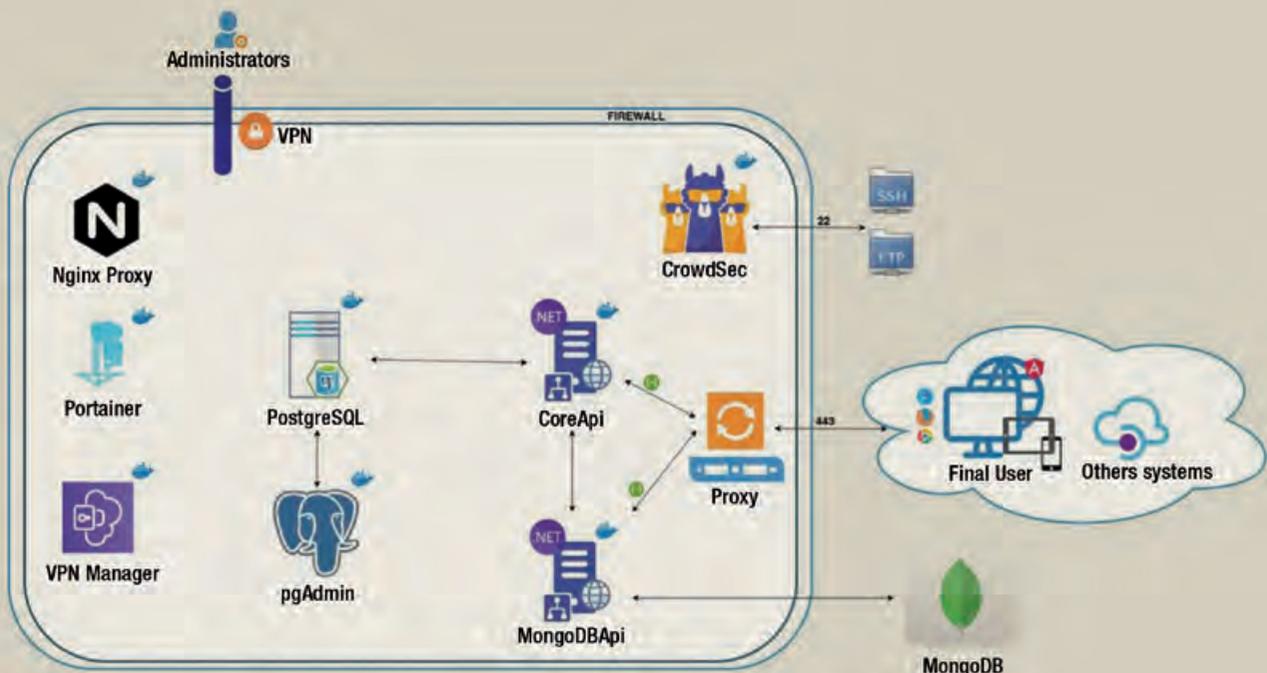
- Au niveau individuel d'un engin il est possible d'analyser et de com-

parer ses données de production avec les objectifs assignés et avec les moyennes des engins similaires sur le projet. Ainsi, pour un tombeureau ayant un nombre de cycles anormalement bas, par exemple, il est intéressant de "rejouer" la journée. La solution permet de retracer le chemin des tombereaux à une date donnée sous forme de film accéléré. Ceci permet, par exemple, d'identifier les zones de croisement ou les tombereaux peuvent perdre du temps ou des zones où l'état de la piste rend les manœuvres plus longues.

API VERS AUTRES SOLUTIONS

LINASTER consomme les données des web services des constructeurs et des fournisseurs des boîtiers externes pour les consolider et les structurer dans la base de données. LINASTER est ainsi capable de mettre à disposition ces données structurées sous forme de web services en respectant les normes de formatage de données en vigueur (AEMP, Association of Equipment Management Professionals). Un swagger détaillant l'ensemble des web services disponibles est accessible aux différents tiers applicatifs (figure 10). Ainsi l'ambition de LINASTER est de communiquer directement avec les outils de GMAO, de pointage ou de suivi de production. ▷

ARCHITECTURE INFORMATIQUE





© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT 8

POURQUOI LINASTER ?

L'objectif de LINASTER est donc de pouvoir suivre à la fois l'utilisation du matériel et la production sur un projet, mais la question du pourquoi pourrait se poser.

Tout d'abord, ceux qui pensent que cela est déjà fait ont raison et cela grâce à l'expertise des opérationnels qui, en observant le chantier, arrivent à interpréter ce qu'ils voient en information de production. LINASTER va donc venir les aider dans cette tâche de suivi, en leur permettant de quantifier ce qu'ils voient, d'accéder à plus d'informations non forcément visibles et de les

corréler, de fiabiliser ces informations, mais aussi en ayant la capacité de les observer sur la durée souhaitée sans faire d'échantillonnage.

LINASTER devient ainsi un véritable outil de monitoring des chantiers de terrassement permettant de traiter un large champ de données fiables pour un retour direct vers tous les niveaux de la production et la conduite de chantier (de l'opérateur à la direction d'un chantier). La conduite de ces grands chantiers en sera donc optimisée tant d'un point de vue production pure que d'un point de vue environnemental.

8- Module cartographie.

9- Diagramme de Sankey.

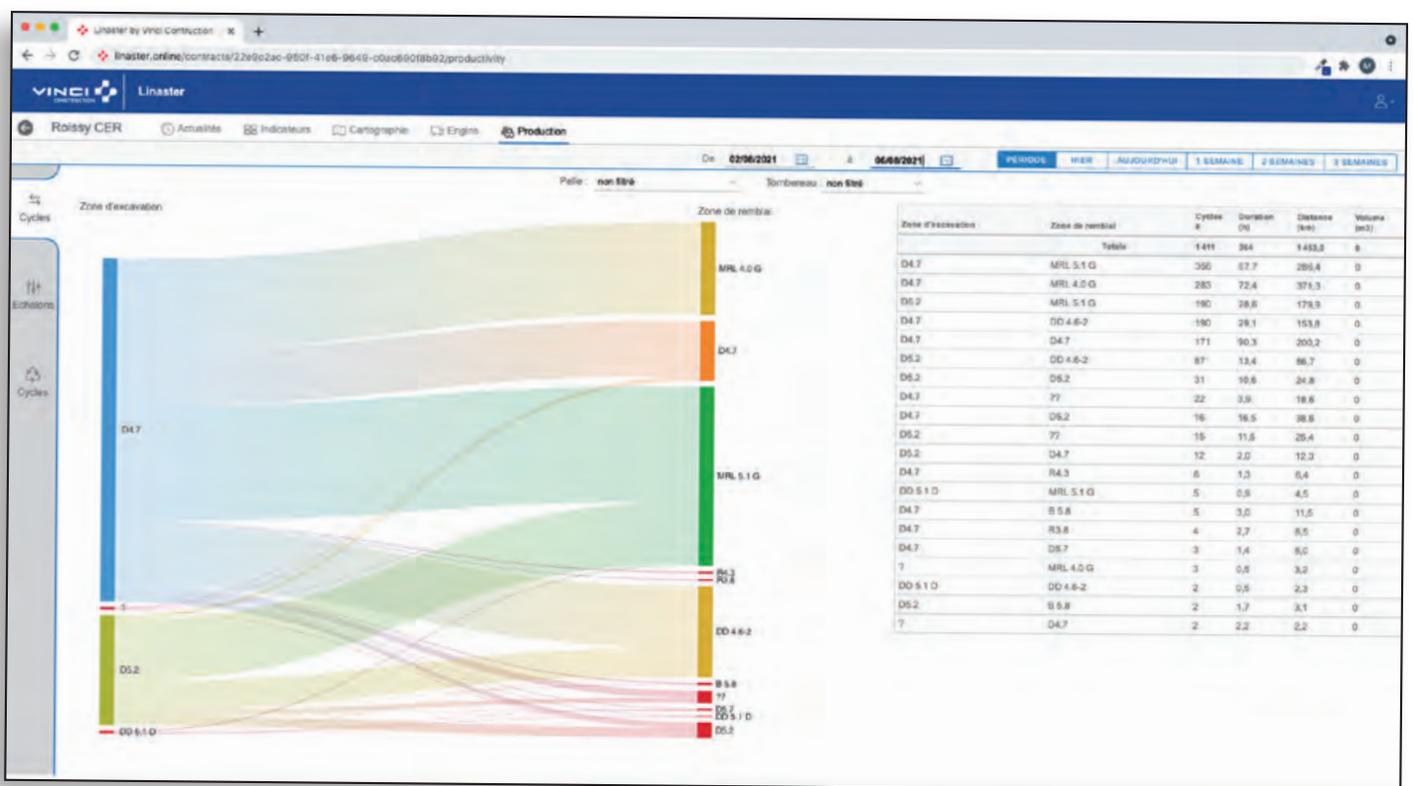
8- Mapping module.

9- Sankey diagram.

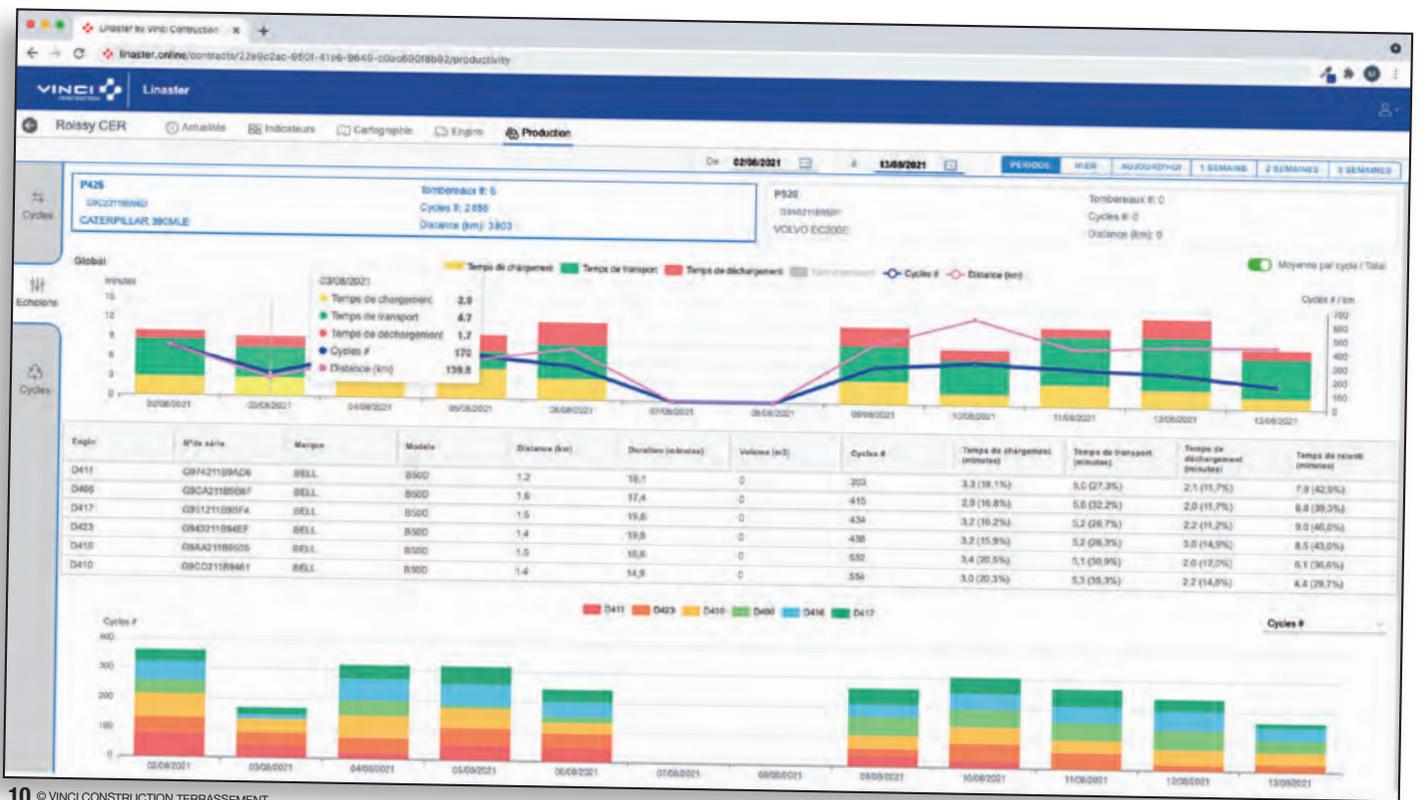
En suivant la production de manière détaillée et en pouvant corréler ces données à d'autres informations (topographiques, météo ou autre), les opérationnels agissent directement sur les

leviers de la productivité. Par exemple, au niveau d'un échelon, la production est optimale lorsque les engins ont les temps d'attente les plus faibles possible. Les facteurs pouvant diminuer la production sont multiples :

- Manque ou surplus d'engins de transport ;
- Mauvais dimensionnement des engins de transport vs l'engin de chargement ;
- État et/ou largeur des pistes ;
- Coactivité ;
- Position de la pelleteuse ;
- Météo ;
- etc.



© VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT 9



10 © VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

Tous ces facteurs ne sont pas toujours faciles à corréler avec une simple observation sur site à un instant donné. LINASTER, permettant de croiser toutes ces informations que ce soit géographiquement ou chronologiquement, facilite l'interprétation de l'opérationnel afin d'apporter les mesures correctives adéquates.

En suivant l'utilisation des engins, le service matériel va pouvoir optimiser encore davantage les plans de maintenance et agir en préventif. Grâce à ce suivi, les chefs de chantier analy-

10- Suivi de productivité.

10- Productivity tracking.

seront encore plus efficacement le comportement des chauffeurs pour les sensibiliser à l'écoconduite en valorisant les comportements adaptés et en proposant des formations lorsque cela est nécessaire. Cela a pour effet de prolonger la durée de vie du maté-

riel, d'une part, mais aussi de réduire considérablement les consommations de carburant (env 10% selon les premières estimations), d'autre part. Cette réduction de consommation engendre des économies importantes à l'échelle d'un projet mais surtout permet de réduire considérablement les émissions de CO₂, ce qui constitue aujourd'hui un axe de progrès majeur dans nos métiers.

L'ambition de LINASTER est ainsi d'agrèger l'ensemble des données issues de la production sur tous types d'engins de nos chantiers pour une vision globale de la performance. Le déploiement de la solution va s'accélérer à partir de 2022 avec notamment son utilisation à grande échelle actée pour le suivi de la production sur le projet High Speed 2 au Royaume uni. □

CHIFFRES CLEFS

- NOMBRE D'ENGINS CONNECTÉS ACTUEL : 2500**
- CONSOMMATION CARBURANT ANNUELLE POUR 500 ENGINS : 12,5 millions de litres**
- EMISSION DE CO₂ ANNUELLE POUR 500 ENGINS : 30000 t**
- ESTIMATION MINIMUM DE RÉDUCTION : 10 %**
- GAIN DE PRODUCTIVITÉ CIBLE SUR HS2 : 2% soit 6 000 000 €**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

DIVISIONS DE VINCI CONSTRUCTION :

- Vinci Construction Terrassement
- Spiecapag
- Sogea Satom

PROJETS PRODUCTIVITÉ EN COURS :

- High Speed 2
- Contournement Est de Roissy
- Contournement Ouest de Strasbourg

ABSTRACT

LINASTER, A FLEET MANAGEMENT AND PRODUCTIVITY TRACKING TOOL FOR WORKSITES

YOHANN RABOT, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - VINCENT MORISSEAU, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - THOMAS BORY, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - AURÉLIEN FABRE, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

The result of an innovation programme started a few years ago, and continued, in the past three years, by a development project, LINASTER is a solution for capture, analysis and processing of the data produced by machinery on construction sites. From a simple web interface, the user can access data concerning the production and use of machinery in real time. By combining them with other available data, the user can reliably identify levers for improving productivity while mitigating the environmental impact of the project (CO₂ emissions in particular). □

LINASTER, UNA HERRAMIENTA DE GESTIÓN DE FLOTA Y SEGUIMIENTO DE LA PRODUCTIVIDAD AL SERVICIO DE LAS OBRAS

YOHANN RABOT, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - VINCENT MORISSEAU, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - THOMAS BORY, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT - AURÉLIEN FABRE, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT

Fruto de un proceso innovador iniciado hace unos años, al que siguió un proyecto de desarrollo durante los últimos tres años, LINASTER es una solución de captación, análisis y explotación de los datos generados por las máquinas en las obras. A partir de una simple interfaz web, el usuario accede a los datos de producción y utilización de las máquinas en tiempo real. Combinándolos con otros datos disponibles, el usuario identifica de manera fiable los ejes de mejora de la productividad, reduciendo a la vez el impacto medioambiental de la obra (en especial, las emisiones de CO₂). □



1
© EIFFAGE ROUTE

CHAUSSÉES RECYCLÉES VÉGÉTALES : RECYTAL® ET BIOPHALT®

AUTEURS : FRANÇOIS OLARD, DIRECTEUR TECHNIQUE, RECHERCHE & INNOVATION, EIFFAGE ROUTE - JULIEN VAN ROMPU, CHEF DE PROJETS RECHERCHE & INNOVATION, EIFFAGE ROUTE - SIMON POUGET, DIRECTEUR RECHERCHE & INNOVATION, EIFFAGE ROUTE - FRÉDÉRIC LOUP, DIRECTEUR DU CENTRE D'ÉTUDES ET DE RECHERCHE DE CORBAS, EIFFAGE ROUTE - FLAVIEN GEISLER, CHEF DE PROJETS RECHERCHE & INNOVATION, EIFFAGE ROUTE

LES DÉFIS ENVIRONNEMENTAUX ACTUELS IMPOSENT AU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE UN DOUBLE IMPÉRATIF : CELUI DE RÉDUIRE SA CONSOMMATION DE MATIÈRES PREMIÈRES NON RENOUVELABLES ET DE LIMITER SES IMPACTS "CARBONE". C'EST DANS CE CONTEXTE QU'EIFFAGE ROUTE A DÉVELOPPÉ UNE GAMME DE LIANTS VÉGÉTAUX, COMPATIBLES AVEC LES TECHNIQUES DE RECYCLAGE À FORT TAUX DES MATÉRIAUX ISSUS D'ANCIENNES CHAUSSÉES. FORT D'UN RETOUR D'EXPÉRIENCE DÉSORMAIS CONSÉQUENT, L'ARTICLE PRÉSENTE UN TOUR D'HORIZON DES OPÉRATIONS RÉALISÉES.

DIMINUER L'EMPREINTE CARBONE

Le défi climatique modifie la lecture et le traitement des enjeux économiques et sociaux des activités humaines et demande aux entreprises de réels efforts de mutation. La crise sanitaire, qui a agi comme révélateur de notre économie "carbonnée", massivement dépendante du transport, est également un puissant accélérateur de ces mutations.

Pour ce qui concerne le secteur des travaux publics, être exemplaire en termes d'empreinte carbone sur son périmètre d'activités est certes nécessaire et constitue une première étape de cohérence dans l'action, mais cela ne suffit pas. Il convient également d'être force de proposition dans des solutions alternatives de conception, de construction ou de maintenance permettant la réduction ou l'évitement d'émissions de car-

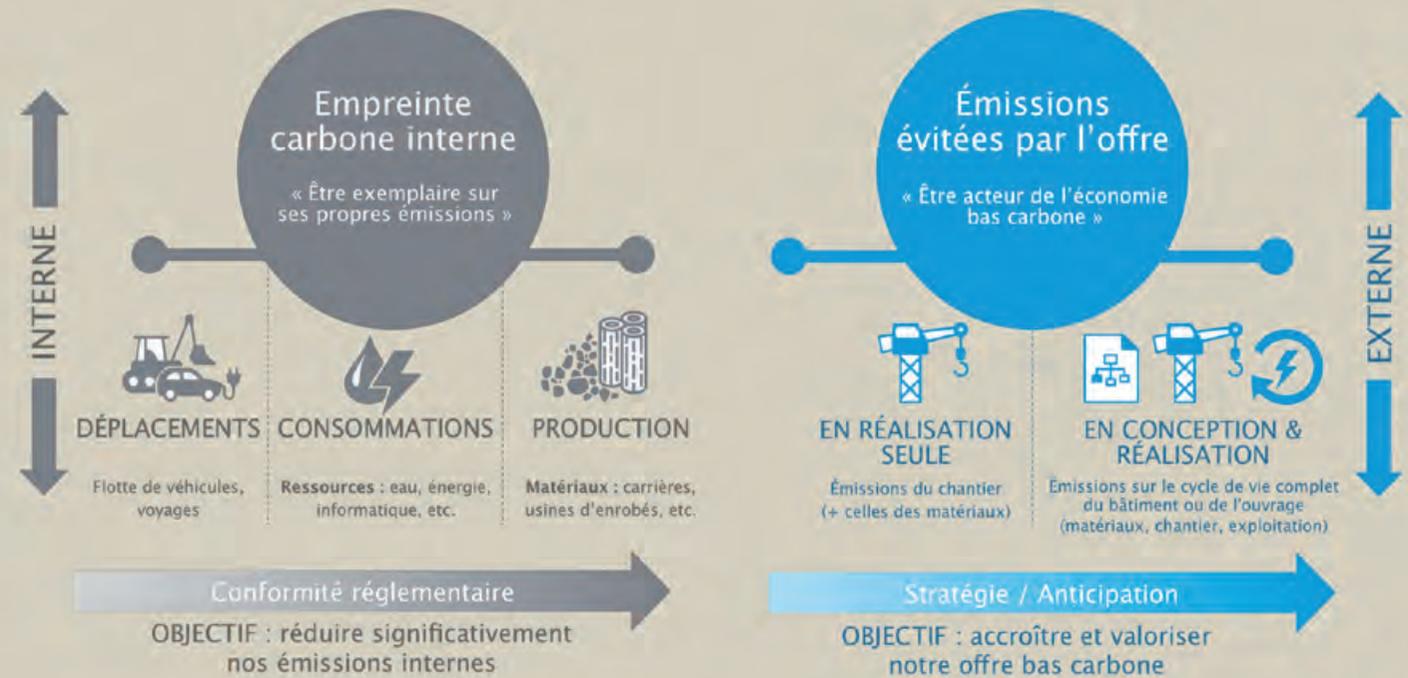
**1- Chantier
2020 de
BIOPHALT®
à Pers-Jussy
(RD102, CD74).**

**1- BIOPHALT®
2020 project
at Pers-Jussy
(RD102, CD74).**

bone par l'offre technique et commerciale faite aux maîtres d'ouvrage, qu'il s'agisse de relations de clientèle B-to-B ou B-to-C, ce dernier favorisant et accélérant la diffusion large et rapide des approches bas-carbone innovantes.

Les clients, publics ou privés, sont maîtres et libres de leurs choix ; il est néanmoins du devoir de l'entreprise de proposer des solutions alternatives conçues pour être compatibles avec

STRATÉGIE BAS-CARBONE DU GROUPE EIFFAGE (extrait du Rapport Climat 2020 Eiffage)



2
© EIFFAGE ROUTE

2- Stratégie bas-carbone du groupe Eiffage (extrait du Rapport Climat 2020 Eiffage).

3- Chantier 2017 de RECYTAL® ARM à Aumont (RD9, CD39).

4- Émulsion RECYTAL® utilisée pour le chantier RECYTAL® ARM du CD39 (Aumont, 2017).

mieux-disantes du point de vue carbone est de plus en plus stimulée par différents facteurs comme l'anticipation réglementaire, l'image de marque, la demande sociétale et citoyenne ou encore la responsabilité et la prise de conscience effective, bien comprise du décideur public ou privé.

Partager l'enjeu bas-carbone avec les maîtres d'ouvrage, en proposant des solutions alternatives ayant un moindre impact, c'est la spécificité et l'originalité de l'action bas-carbone décrite en figure 2.

STRATÉGIE BAS-CARBONE D'EIFFAGE ROUTE

Eiffage Route déploie sa stratégie pour des infrastructures bas carbone en agissant d'une part sur la consommation énergétique et, d'autre part, sur la consommation en ressources non renouvelables :

→ Agir sur la consommation énergétique, en chauffant le moins possible (production et mise en œuvre à froid ou à tiède en lieu et place des enrobés bitumineux à chaud traditionnels) et en transportant

le moins possible (retraitement des chaussées in-situ ou circuits courts).

→ Agir sur la consommation en ressources non renouvelables, en recyclant et en réutilisant (plutôt que de faire appel à des matières neuves : bitume et granulats) et en utilisant des matières renouvelables (végétales et biosourcées), i.e. non fossiles.

Eiffage Route déploie depuis de nombreuses années une politique d'innovation à la fois pionnière et continue. ▷

2- Low-carbon strategy of Eiffage group (excerpt from the Eiffage Climate Report 2020).

3- RECYTAL® ARM project 2017 at Aumont (RD9, CD39).

4- RECYTAL® emulsion used for the RECYTAL® ARM project on the CD39 (Aumont, 2017).

les défis climatiques et environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie de ses réalisations. Cette approche a d'autant plus de sens que l'appétence des donneurs d'ordre pour les offres





5a

© EIFFAGE ROUTE



5b

© EIFFAGE ROUTE

**5a & 5b-
Chantier Cirr
RECYTAL®
ARM pour
le compte
du CD33
(RD670, 2018).**

**6a & 6b-
Chantier Cirr
RECYTAL®
ARM pour
le compte
du CD34
(RD26, 2018).**

**5a & 5b- Cirr
RECYTAL®
ARM project
for CD33
(RD670, 2018).
6a & 6b- Cirr
RECYTAL®
ARM project
for CD34
(RD26, 2018).**

La très grande majorité des sujets innovants portés au cours des trente dernières années par l'entreprise est, de près ou de loin, en lien avec les thématiques mentionnées ci-dessus. Le déploiement de la stratégie bas-carbone d'Eiffage, portée au plus haut de l'entreprise par son président-directeur général, Benoît

de Ruffray, et conduite par la direction du Développement durable et de l'Innovation transverse du groupe, associée à cette capacité d'innovation environnementale - ADN d'Eiffage Route -, s'est traduite par le développement d'une gamme complète de produits routiers "bas carbone" d'origine végétale.

**LA GAMME VÉGÉTALE
D'EIFFAGE ROUTE :
UNE INNOVATION CONTINUE
DEPUIS LES ANNÉES 1990**

Dès la fin des années 1990, Appia (devenu depuis Eiffage Route) innove en remplaçant les fluxants houillers et pétroliers, par un dérivé oléagineux



6a

© EIFFAGE ROUTE



6b

© EIFFAGE ROUTE

7- Chantier RECYTAL® ARM dans le bois de Vincennes (2019).

8- Liant végétal BIOPHALT® 193.

9- Bras de chargement du Manège de fatigue accéléré de l'Université Gustave Eiffel.

7- RECYTAL® ARM project in Vincennes Wood (2019).

8- BIOPHALT® 193 plant-based binder.

9- Loading arm of the Gustave Eiffel University accelerated fatigue test facility.



© EIFFAGE ROUTE

7

du Tournesol, l'Oléoflux®. Ce développement initial, industrialisé et toujours opérationnel depuis lors, permet d'acquérir des connaissances scientifiques et de valider des compatibilités physico-chimiques entre certains dérivés végétaux et les bitumes d'origine pétrolière. Ces connaissances sont mises à profit quelques années plus tard, lors de la mise au point d'une nouvelle innovation : l'émulsion RECYTAL®. Celle-ci permet la valorisation à froid d'un co-produit issu des industries sylvicole et papetière : la poix de tall-oil, utilisée jusqu'alors majoritairement comme combustible. Obtenue par distillation du tall-oil, la poix se compose principalement d'acides résiniques,

d'acides gras et d'esters. Ses propriétés régénérantes sont exploitées pour lier un squelette granulaire composé à 100% d'agrégats d'enrobés recyclés, déconstruits, transportés sur site de valorisation, concassés, criblés et remalaxés à froid avec l'émulsion RECYTAL® pour obtenir un matériau routier végétal, type GE (grave émulsion) ou BBE (béton bitumineux à l'émulsion). L'origine végétale et renouvelable des matières premières (industries sylvicole et papetière) en font un véritable "puits de carbone". En effet, la quantité de CO₂ fixée par les végétaux pendant leur croissance, par photosynthèse, compense la quantité émise durant la fabrication et la mise en

œuvre des matériaux. En outre, lesdites matières premières sont totalement découplées du risque de concurrence avec le circuit agro-alimentaire. Eiffage Route dispose alors d'un produit "froid", 100% recyclé, régénéré par une émulsion d'origine végétale. L'analyse économique est favorable, le gain environnemental est majeur et l'industrialisation est en cours sur l'ensemble du territoire. Des gains restent néanmoins possibles sur le plan de la consommation énergétique, au niveau du transport des matériaux (évacuation et apport en matériaux nécessaires au chantier). L'étape suivante de l'innovation a donc consisté à associer notre

expertise "produits/formulation" ayant permis le développement de l'émulsion RECYTAL® à une autre expertise reconnue de longue date chez Eiffage Route : le développement d'ateliers de retraitement en place, réputés pour leur qualité d'homogénéisation optimale. Aux Ateliers de Retraitement de Chaussées ARC 700 et ARC 1000 de l'entreprise, s'ajoute l'Atelier de Retraitement Mobile ARM 2500, spécifiquement conçu pour les opérations d'entretien par retraitement en place à l'émulsion. Ainsi, l'association du végétal à un procédé de retraitement en place est une première en 2017, dans le département du Jura (figures 3 et 4). ▷



8

© EIFFAGE ROUTE



9

© UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL



10a

© EIFFAGE ROUTE



10b

© EIFFAGE ROUTE

L'analyse d'intérêt croisée indique dès lors un très fort potentiel dans tous les domaines :

- Le procédé présente un intérêt économique au regard des méthodes d'entretien de chaussées habituelles ;
- Il permet la revalorisation à 100% de la chaussée bitumineuse en place, annulant de fait tous les besoins en ressources de granulats extérieurs ;
- Il valorise un co-produit d'origine végétale, utilisé jusqu'alors en tant que combustible. Son utilisation à froid en technique routière permet de "faire coup double" en évitant, d'une part, la combustion d'un pro-

duit et, d'autre part, l'utilisation de bitume d'origine fossile ;

- De par la capacité à opérer "en place", RECYTAL®-ARM annule la totalité des transports liés aux besoins d'évacuation et d'apports de matériaux neufs (fraisats d'enrobés évacués/enrobés neufs rapportés). Ce sont donc, en moyenne, 80 semi-remorques par kilomètre réalisé qui disparaissent du bilan économique et environnemental de l'opération.

De nombreux chantiers se succèdent alors. Les figures 5 et 6 illustrent notamment les deux chantiers réalisés avec un appui et suivi technique assuré

par le Cerema, pour le compte du Cirr et de la DIT [1]. La figure 7 illustre quant à elle un chantier réalisé au Bois de Vincennes courant 2019.

**LA GAMME VÉGÉTALE
D'EIFFAGE ROUTE :
UNE ÉVOLUTION VERS
LES FORTS TRAFICS**

RECYTAL® se destine au domaine d'emploi des enrobés à froid. Au même titre que toute Grave Emulsion (GE) ou Béton Bitumineux à l'Emulsion (BBE) auquel il peut être comparé, son domaine d'emploi se limite à la classe de trafic T2 (< 300 poids lourds par sens et par jour). De façon à développer

**10a & 10b-
Planche expérimentale
BIOPHALT® sur
le Manège de
fatigue accéléré
de l'Université
Gustave Eiffel :
(10a) mise en
œuvre de l'enrobé
recyclé végétal
BIOPHALT® ;
(10b) Aucun
dommage n'a
été observé sur
la planche après
1,5 million de
chargements.
11- Chantier Cirr
BIOPHALT®
pour le compte
du CD74 à
Pers-Jussy
(RD102, 2020).**



11

© EIFFAGE ROUTE

**10a & 10b-
BIOPHALT®
experimental
test section
on the Gustave
Eiffel University
accelerated fatigue
test facility:
(10a) Laying
BIOPHALT® recycled
plant-based
asphalt mix;
(10b) No damage
was detected on
the test section
after 1.5 million
loading operations.
11- Cirr
BIOPHALT®
project for
the CD74 at
Pers-Jussy
(RD102, 2020).**



12a

© EIFFAGE ROUTE

un enrobé recyclé végétal tout trafic, y compris autoroutier, la prise en compte des propriétés rhéologiques et régénérantes de la poix de tall-oil a été transposée aux enrobés fabriqués "à tiède" (130-140°C), avec un minimum de 30 à 40 % d'agrégats d'enrobés recyclés [2-3] et un liant d'origine végétale spécifiquement conçu : le liant BIOPHALT® 193 (figure 8).

Ce liant est composé de 92 % de matières d'origine végétale, lui aussi basé sur l'emploi de coproduits de la sylviculture et de l'industrie papetière,

**12a & 12b-
Chantier CIRR
BIOPHALT®
pour le compte
du CD34
à Mourèze
(RD908, 2021).**

**12a & 12b-
CIRR BIOPHALT®
project for
the CD34
at Mourèze
(RD908, 2021).**

principalement issus de l'exploitation de la forêt des Landes. Le liant Biophalt® 193 est créditeur de carbone biogénique : une partie du CO₂ fixé pendant la période de croissance des arbres dont il est issu peut être alloué au produit. Les impacts générés par la fabrication, le transport et la mise en œuvre de l'enrobé Biophalt® sont ainsi compensés, ce qui permet de tendre vers des chantiers neutres en carbone, sans sacrifier à la durabilité. Cela a été mis en évidence par une première Analyse en Cycle de Vie (ACV) réalisée

par l'Université de Nottingham dans le cadre du projet européen BioRePavation (2015-2018). Ce résultat a été confirmé par une seconde étude pilote par le bureau d'étude indépendant VERSo dans le cadre de la Déclaration Environnementale du Produit (DEP). À l'issue de ces dernières études, le liant anhydre BIOPHALT® 193, ainsi que l'émulsion Recyral®, sont devenus les premiers liants routiers labellisés "Produit Biosourcé" par Karibati.

Les premières réalisations sont effectuées sur des sites expérimentaux qui permettent, dès la fin 2017, début 2018, de tester et valider le comportement du produit. Une expérimentation remarquable et sans conteste décisive est alors réalisée sur le manège de fatigue accélérée de l'Université Gustave Eiffel à Bouguenais [4] dans le cadre de BioRePavation [5-7]. La motorisation puissante du manège lui permet de fonctionner en régime quasi-continu, entraînant ses charges roulantes reproduisant les essieux poids lourds, à des vitesses pouvant atteindre 100 km/h (figure 9). Ainsi le manège applique aux chaussées expérimentales testées, en quelques semaines, les charges lourdes supportées par une chaussée réelle à fort trafic pendant toute sa durée de vie. C'est tout l'intérêt des essais de chaussées sous trafic accéléré : s'affranchir des longues périodes nécessaires à l'observation des mécanismes de dégradations et de ruine des chaussées en conditions réelles.



© EIFFAGE ROUTE

12b



13

© GILLES BERTRAND

Ladite expérimentation sur manège a ainsi permis de mettre en évidence l'excellent comportement in situ de l'enrobé Biophalt® vis-à-vis de l'orniérage et de la fatigue (figures 10a et 10b). La formule testée à 50 % d'agrégats d'enrobés recyclés, présente un meilleur comportement que l'enrobé bitumineux EME2 de référence. En effet, aucune dégradation n'est constatée sur l'enrobé biosourcé

après passage de 1,5 millions d'essieux équivalents ; à contrario, sur la section de référence, les premières fissures sont observées après 900 000 cycles, la fissuration augmentant progressivement pour atteindre 28 % en fin d'essai (1,5 million de cycles). BIOPHALT® se développe progressivement : les premières réalisations expérimentales sous faible trafic sont suivies d'opérations sous trafic beaucoup

plus significatif. Le comportement sur site, suivi par les équipes techniques d'Eiffage Route, traduit à date un comportement très satisfaisant. La capacité à recycler à des taux de plus en plus élevés dans les usines d'enrobés, la volonté de trouver progressivement des alternatives au bitume/pétrole et la volonté affichée de certains maîtres d'ouvrages de participer à cette mutation "bas carbone",

contribuent au développement de l'enrobé BIOPHALT®. Les deux dernières années voient se concrétiser, d'une part, deux chantiers réalisés avec un appui et suivi technique du Cerema, pour le compte du Cirr et de la Dit (figures 11, 12a et 12b) et, d'autre part, trois réalisations sur réseau national et autoroutier (figures 13, 14, 15a et 15b), respectivement sur réseaux Atmb



14

© EIFFAGE ROUTE

13- Chantier BIOPHALT® pour le compte d'Atmb au Tunnel des Chavants (RN205, 2020).

14- Chantier BIOPHALT® de l'A40 à hauteur de Vonnas dans le sens Macon/Bourg-en-Bresse (réseau Apr, 2020).

13- BIOPHALT® project for Atmb at Chavants Tunnel (RN205, 2020).

14- BIOPHALT® project on the A40 motorway at the level of Vonnas in the Macon/Bourg-en-Bresse direction (Apr network, 2020).



15a



15b

(Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc), Aprr (Autoroutes Paris-Rhin-Rhône) et Dir Nord.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

RECYTAL® et BIOPHALT® constituent des innovations de rupture majeures. Depuis les deux brevets initiaux de 2014 et 2007, le développement d'une véritable "gamme végétale" de matériaux routiers a permis, progressivement, de proposer aux maîtres d'ouvrage des alternatives "bas carbone" parfaitement en ligne avec les stratégies propres en la matière.

La gamme végétale d'Eiffage Route a été reconnue d'intérêt innovant sur le plan national par le CIRR et labellisée "produits Biosourcés" par le label Karibati. Plus de recyclage, plus de matières premières locales et renouvelables, moins d'énergie et moins de transport, c'est le challenge relevé.

Il est vrai, et c'est sans conteste aujourd'hui l'une des limites de l'exercice, que le volume industriel disponible en matières végétales et renouvelables n'est pas en mesure d'affronter demain une demande généralisée. Ces produits "pionniers" ont vocation à ouvrir une voie de raisonnement, de prise en compte réelle et tangible d'un Développement Durable, d'une Économie Circulaire et d'une Transition Écologique. Enfin, en vue de répondre demain à la demande généralisée et vertueuse d'une économie décarbonée, d'autres pistes d'innovations liées à la "chimie verte" et à la diversification des bioressources sont explorées au sein des laboratoires centraux d'Eiffage Route sur les sites de Lyon-Corbas (69) et de Ciry-Salsogne (02). □

15a & 15b- Chantier BIOPHALT® pour le compte de la Dir Nord à hauteur de Poix-Terron dans le sens Charleville / Reims (autoroute A34, 2021).

15a & 15b- BIOPHALT® project for Dir Nord at the level of Poix-Terron in the Charleville/ Reims direction (A34 motorway, 2021).

ABSTRACT

RECYCLED PLANT-BASED PAVEMENTS: RECYTAL® AND BIOPHALT®

FRANÇOIS OLARD, EIFFAGE ROUTE - JULIEN VAN ROMPU, EIFFAGE ROUTE - SIMON POUGET, EIFFAGE ROUTE - FRÉDÉRIC LOUP, EIFFAGE ROUTE - FLAVIEN GEISLER, EIFFAGE ROUTE

Road works are capable of having real environmental virtues, with low greenhouse gas emissions, by becoming a veritable carbon sink. A very high rate of recycling of pavement materials and the gradual introduction of biosourced products in their mix design constitute a real solution, now tried and tested. This article proposes initial experience feedback on the Recytal® and Biophalt® innovations, respectively winners of the 2017 and 2019 awards of the CIRR (Comité Innovation Routes et Rues) organised by the Transport Infrastructure Division (DIT) of the Ministry for Ecological Transition (MTE). This initial highlighting contributed to the development of these recycling and low-carbon road development solutions with a range of plant-based coatings adapted to the various traffics encountered throughout France. □

CALZADAS RECICLADAS VEGETALES: RECYTAL® Y BIOPHALT®

FRANÇOIS OLARD, EIFFAGE ROUTE - JULIEN VAN ROMPU, EIFFAGE ROUTE - SIMON POUGET, EIFFAGE ROUTE - FRÉDÉRIC LOUP, EIFFAGE ROUTE - FLAVIEN GEISLER, EIFFAGE ROUTE

Las obras viales son capaces de demostrar virtudes medioambientales reales, con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, convirtiéndose en auténticos sumideros de carbono. El reciclaje de muy alto nivel de los materiales de calzada y la progresiva introducción de productos de origen renovable en su composición constituyen una solución real y actualmente probada. En este artículo se presentan las primeras conclusiones sobre las innovaciones Recytal® y Biophalt®, premiadas respectivamente en las ediciones 2017 y 2019 del Comité de innovación para carreteras y calles (CIRR, o Comité Innovation Routes et Rues), creado por la Dirección de Infraestructuras de Transporte (DIT) del Ministerio francés de Transición Ecológica (MTE). Esta presentación inicial ha contribuido al desarrollo de estas soluciones de reciclaje y acondicionamiento vial bajas en carbono con una gama de revestimientos vegetales adaptados a los distintos tráfico hallados en el conjunto del territorio francés. □



1
© DRONE SUD-EST

RENFORCEMENT DE DIGUE ET RENATURATION DE LA LÔNE DU RHÔNE

AUTEURS : CLÉMENT PORCIERO, RESPONSABLE D'EXPLOITATION, SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN - THOMAS DELASSUS, INGÉNIEUR ÉTUDES/TRAVAUX, SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN - GRÉGORY LAFOIS, RESPONSABLE ENVIRONNEMENT & GÉNIE-ÉCOLOGIQUE, SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN - STANISLAS MICHALON, RESPONSABLE DÉVELOPPEMENT, LA COMPAGNIE DES FORESTIERS

EN RIVE GAUCHE DU RHÔNE, UNE DIGUE DE 10 km A ÉTÉ ÉDIFIÉE ENTRE ARLES ET TARASCON. LES TRAVAUX ONT COMPRIS LA CRÉATION D'UNE LÔNE AFIN DE RÉPONDRE AUX MESURES DE COMPENSATION HYDRAULIQUES ET ENVIRONNEMENTALES. CES TRAVAUX S'INSCRIVENT DANS LE PLAN RHÔNE ÉTABLI PAR L'ÉTAT ET LES AUTRES RÉGIONS RIVERAINES DU FLEUVE. LES TRAVAUX, ACHÉVÉS AU PRINTEMPS 2021, AURONT DURÉ PLUS DE DEUX ANS.

L'objectif de ces travaux est de prévenir le risque d'inondations tout en préservant l'environnement. L'opération des digues Tarascon/Arles a compris cinq grandes familles de travaux que sont la création d'une digue de premier rang à l'ouest du remblai ferroviaire (figure 2), les travaux de mise en transparence hydraulique et le confortement du remblai ferroviaire, les mesures d'annulation et de réduction d'impacts, les aménagements favorisant le ressuyage et les aménagements de sécurisation complémentaire. L'entreprise Spie Batignolles Valérian et

ses associés se sont vu attribuer les marchés de création de la digue de 1^{er} rang et des mesures de compensation hydraulique (figure 3).

LA PRÉPARATION ET LES PHASES PRINCIPALES DU PROJET DES DIGUES TARASCON/ARLES ET DE LEURS AMÉNAGEMENTS ASSOCIÉS

La digue est un ouvrage en remblai composé essentiellement de terre. Afin d'en garantir l'étanchéité, fonction principale d'une digue sûre et durable, les matériaux utilisés sont sélectionnés et mis en œuvre selon des règles

1- Vue aérienne de la digue.

1- Aerial view of the dyke.

strictes et sont issus de zones d'emprunt sélectionnées par la maîtrise d'œuvre lors des études de conception. Ces zones ont été investiguées dans un rayon le plus proche possible de l'ouvrage définitif afin de limiter au maximum l'impact carbone lié aux travaux. La sélection fine des matériaux est réa-

lisée avant leur mise en œuvre, et ce à partir de leurs caractéristiques. Ils sont classés par catégories selon leur granulométrie, leur teneur en eau et leur teneur en particules argileuses. La classification retenue est celle des Grands Travaux Routiers (classification GTR NFP 11 300). Elle comporte 4 classes :
→ **Classe A** : les sols fins (limons, argile, ...) ;
→ **Classe B** : les sols sableux ;
→ **Classe C** : les sols comportant de gros éléments ;
→ **Classe D** : les sols insensibles à l'eau.



© ZART FILMS PRODUCTION
2

Les matériaux retenus pour la conception de la digue sont issus des argiles de classe A1 ou A2 du guide. Ils sont fins et garantissent ainsi une étanchéité suffisante ainsi qu'une bonne résistance à l'érosion moyennant un compactage soigné.

Tous les matériaux pressentis pour la création de la digue subissent un ensemble de tests visant à les caractériser et à les sélectionner. Déjà, au cours de la phase de préparation, des investigations poussées sont menées afin de cartographier au mieux les zones de déblais propices à la bonne utilisation de ces matériaux recherchés. Il s'agit de la mission géotechnique de type G3.

Une fois les matériaux correctement sélectionnés et localisés sur les zones d'extraction, la digue peut être créée. Sur le projet Tarascon/Arles, deux tronçons bien distincts caractérisent l'ouvrage. Une digue dite résistante à la surverse est édifiée sur 5,5 km. Elle autorise en ce secteur un débordement du Rhône redirigé alors vers des zones agricoles très peu urbanisées, représentant un impact réduit en comparaison de la zone très urbanisée du nord d'Arles. Le noyau de la digue est composé de l'argile type A1/A2 compactée à très forte énergie de façon à augmenter au maximum sa compacité. Elle est confortée sur toute sa face aval et supérieure par une carapace en enrochement bétonnée lui permet-

2- Vue aérienne de la lône.

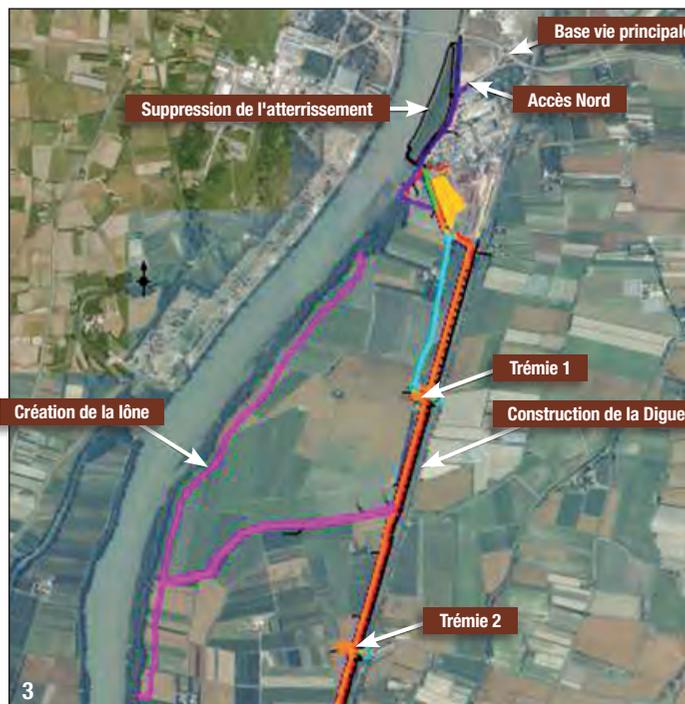
3- Plan de situation digue et lône.

2- Aerial view of the backwater.

3- Location drawing of the dyke and backwater.

tant d'éviter toute érosion de surface en cas de surverse, ce qui garantit ainsi sa pérennité.

Sur les 4,5 km restants, une digue dite millénales a été édifiée à son tour. Comme son nom l'indique, cette digue est dimensionnée pour faire front à une crue millénales. Physiquement, elle se caractérise par une hauteur d'environ 1 m supplémentaire au-dessus de la digue résistante à la surverse et par



© SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN

l'absence d'une carapace en enrochement bétonnée. Elle joue le rôle simple d'un barrage résistant à la colère d'un Rhône en crue.

Un marché public parallèle sous maîtrise d'ouvrage SNCF et Systra s'est déroulé en simultané du marché de la digue Tarascon/Arles : son objectif réside en la mise en transparence hydraulique de la voie ferrée (jouant actuellement le rôle de digue) via 10 ouvrages traversants d'une largeur de 20 m régulièrement espacés, qui assurent ainsi la dissipation dans la plaine agricole des eaux sur-versantes du Rhône attendues en cas de crue de récurrence centennale.

Des aménagements favorisant le ressuage de ces eaux font l'objet de marchés en cours de réalisation ou à venir. Sont concernées notamment : la transparence hydraulique du canal des Alpines, la création d'un fossé Ouest/Est raccordé au contre canal du Vigueirat, la création d'un siphon de transfert et la réalisation d'un canal d'aménée au canal de la vidange.

Au-delà de l'aspect technique nécessaire à l'aboutissement de ce projet d'ampleur, une réflexion d'intégration paysagère avec des mesures de compensations environnementales a été instruite minutieusement, donnant naissance au lot 4 entièrement dédié à la renaturation des zones d'emprunts et des zones de délaissés (zone sans travaux) des emprises acquises nécessaires à la réalisation du projet.

POINT DE DÉTAIL TECHNIQUE DANS LA CONCEPTION DE LA DIGUE

Une crue peut créer une ouverture brutale, soit à cause de l'érosion, soit en raison de l'infiltration.

L'eau s'engouffre, met en pression l'ouvrage directement par poussée statique ou indirectement par des passages en sous-œuvre ou à travers le matériau lui-même.

Plus l'ouvrage est mis en pression, plus le risque est grand que la digue cède. Pour pallier une éventuelle infiltration par le dessous de la digue, un complexe filtrant composé d'un géotextile enrobant une couche de ballast (matériaux très filtrant) est ajouté sur la partie aval du noyau étanche en argile. Au pied de ce drain, une fibre optique court le long de la digue, permettant le suivi d'éventuelles arrivées d'eau en période de crue, synonymes d'une potentielle anomalie hydraulique dans l'ouvrage dont une surveillance accrue est alors requise.

4- Vue en coupe du tronçon de digue résistant à la surverse.

5- Création de mares.

6- Mare écologique dans son environnement.

4- Cross-section view of the dyke section resisting overflow.

5- Creation of ponds.

6- Ecological pond in its environment.

Ceci est une précaution supplémentaire au travail quotidien des gardes digues : si la fibre mesure un changement dans la température de l'eau, cela signifie qu'il y a un apport extérieur et donc une fuite. Les ouvrages sécurisés sont capables de résister à une crue millénaire ou exceptionnelle du Rhône. La digue sera résistante à la surverse, c'est toute l'intelligence du plan Rhône (figure 4).

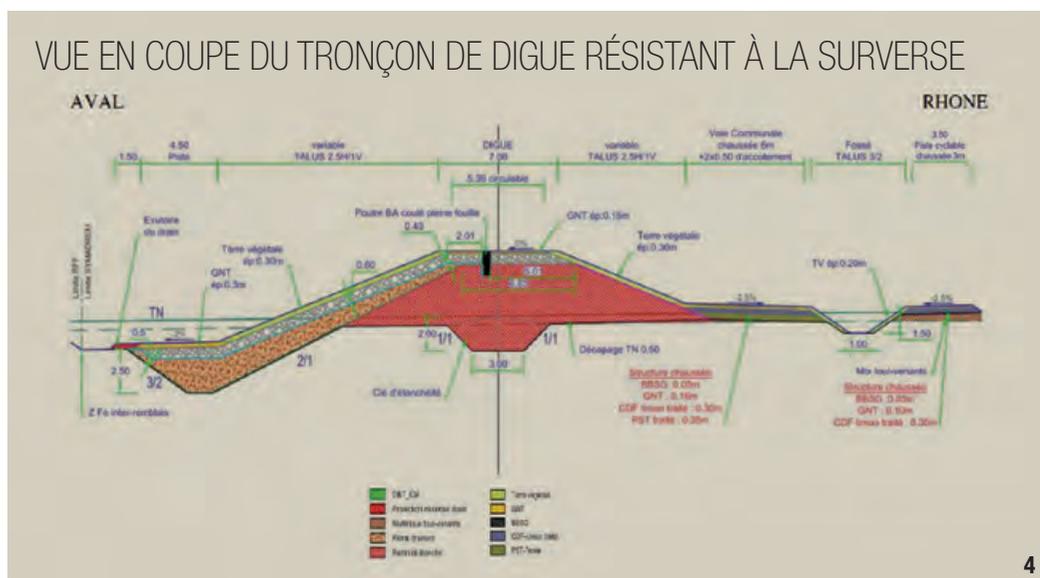
**LE COMPACTAGE :
UNE ÉTAPE ESSENTIELLE DANS
LA CONSTRUCTION DE LA DIGUE**

Pour assurer l'étanchéité de la digue, les matériaux doivent être compactés à une densité optimale. Les compacteurs à pied de mouton exercent une forte pression sur le sol pour lier les différentes couches les unes aux autres. Les matériaux retenus sont compactés jusqu'à ce qu'ils soient les plus denses possible. Outre l'utilisation d'engins de compactage appropriés, l'atteinte de ce niveau de compacité nécessite que le matériau soit mis en œuvre avec la bonne teneur en eau.

À cet effet, l'essai Proctor a été utilisé. Il consiste à diviser un échantillon de matériau en cinq lots, portés chacun à une teneur en eau spécifique. Ces essais sont réalisés en cours de chantier, environ tous les 400 m³.

Les matériaux, une fois à la bonne teneur en eau, sont mis en œuvre par couches successives d'une épaisseur maximale de 30 cm. Le dumper déverse la terre en tas qui sont ensuite répartis de façon homogène au bouteur sur chenille.

Afin d'assurer un niveau de compacité de 95 % minimum et de garantir que le matériau a été mis en œuvre correctement, 3 types de contrôles géotechniques complémentaires et contradictoires sont réalisés :



4

© SPIE BATTIGNOLLES VALÉRIAN / EGIS



5

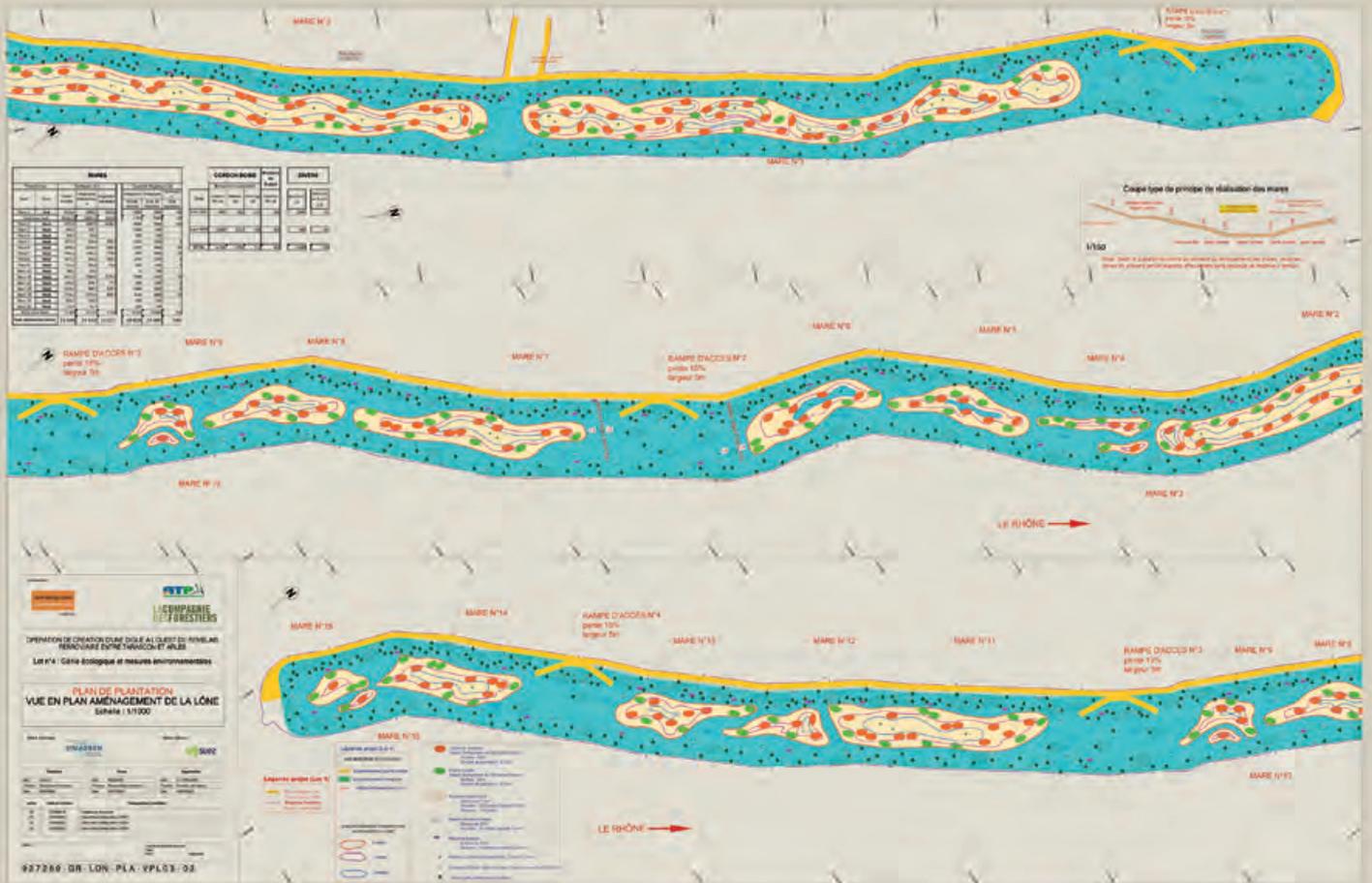
© DRONE SUD-EST



6

© DRONE SUD-EST

PLAN DE PLANTATIONS



7

© SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN

**7- Plan de plantations.
8- Baliveaux.**

**7- Drawing of plantations.
8- Tillers.**

- Le contrôle interne réalisé directement sur le site par les équipes labo du chantier ;
- Le contrôle externe réalisé en partenariat avec le bureau d'étude ;
- Le contrôle extérieur réalisé par le maître d'ouvrage.

LE CONTRÔLE DE COMPACTAGE PAR GPS

Pour un terrassier, la réalisation des remblais fait partie de la base du métier. Dans le cas de certains ouvrages sensibles comme les digues et les barrages, l'homogénéité du compactage est primordiale. De nos jours encore, le contrôle du compactage s'effectue



8
© Z'ART FILMS PRODUCTION

en utilisant la méthode du Q/S. Le Q/S exprime le rapport (exprimé en m^3/m^2) entre le volume Q de sol compacté pendant un temps donné et la surface S balayée par le compacteur dans le même temps.

Ainsi Spie Batignolles Valérian a mis au point un système innovant à l'aide de GPS qui permet d'avoir la position exacte du compacteur en continu tout au long du poste de travail. Ces enregistrements permettent de mesurer la surface balayée par le compacteur et de calculer le Q/S afin de vérifier la conformité du remblai. La zone de travail est parfaitement géolocalisée sur le plan de l'ouvrage concerné.

Le GPS permet au chauffeur de savoir à tout instant le nombre de passes qu'il a réalisées en tout point et de le compléter avec précision, si nécessaire, en se guidant avec une tablette informatique sur son tableau de bord. Un jeu de couleurs lui permet de savoir lorsque le travail est terminé et qu'il peut passer à la couche suivante.

Ce système mis au point par l'entreprise est léger et facile à installer d'une machine à l'autre, c'est pourquoi il a été utilisé sur ce chantier.

TRAVAUX SPÉCIFIQUES : CRÉATION D'UNE LÔNE EN RIVE GAUCHE DU RHÔNE

La création d'une lône est l'un des aménagements majeurs réalisés dans le cadre du chantier pour répondre aux mesures de compensation hydrauliques et environnementales.

Entre le Rhône et la digue, une lône (bras mort du fleuve) artificielle longue de 3,5 km et large de 70 mètres, a été créée pour compenser l'impact de la digue sur le niveau du Rhône (figure 1). Elle constituera un écosystème riche pour la faune et la flore. Aussi, pendant toute la durée du chantier, des espèces végétales protégées ont été transplantées au Conservatoire du littoral sur l'île de Porquerolles pour être réintroduites sur place une fois le chantier achevé.

Les lônes sont des écosystèmes d'eaux calmes qui résultent du recoupement naturel ou artificiel de chenaux fluviaux. Elles peuvent être connectées en permanence au fleuve soit par leur extrémité aval, soit par leurs deux extrémités, ou seulement lors de crues. Certaines sont alimentées par des eaux phréatiques. En période de crue, elles jouent un rôle dans l'écoulement des eaux ou le ressuyage des plaines.

Elles abritent une importante biodiversité végétale et animale, et servent de zones de reproduction et d'alimentation pour de nombreuses espèces de poissons du cours principal. La végétation des lônes participe à l'auto-épuration des milieux aquatiques en absorbant les nitrates et les phosphates.

Les travaux de mesures compensatoires environnementales ont compris la restauration de mares existantes ainsi que la création de nouvelles mares (figure 5).

Les mouvements de terre, dont 100 000 m³ de déblais, ont été optimisés pour préserver les milieux aquatiques (présence d'espèces animales et végétales protégées).

De plus, les matériaux nécessaires à l'édification de la digue sont extraits du lit du Rhône et de la zone dite d'atterrissement (située au nord de l'emplacement de la digue), ce qui réduit le temps de leur transport et donc le bilan carbone du chantier.

Les équipes travaux se sont adaptées en permanence aux recommandations du coordinateur environnemental.



9
© LA COMPAGNIE DES FORESTIERS

Les matériaux du site ont été revalorisés à 100%. L'optimisation des mouvements des terres a permis de minimiser le coût financier et l'impact écologique (figure 6).

UNE FORTE DIMENSION ÉCOLOGIQUE

À l'automne 2020, le chantier a pris une dimension écologique avec la végétalisation des espaces et la création d'habitats et corridors écologiques (figure 7). La Compagnie des Forestiers est intervenue en partenariat avec Atp environnement pour la végétalisation et la création d'habitats écologiques. Ces travaux de génie écologique ont permis de recréer une bande de végétation (végétaux bas, arbres, arbustes) située au droit des berges des cours d'eau, la ripisylve. Cette ripisylve est très importante pour :

9- Entretien et lutte contre les plantes invasives.

10- Abris à reptiles.

9- Maintenance and control of invasive plants.

10- Shelter for reptiles.

- La biodiversité avec la présence d'un milieu propice à la faune spécifique en milieu aquatique et humide ;
- Pour la qualité de l'eau, elle est un "filtre naturel" ;
- Pour la température de l'eau et donc pour la faune piscicole lors de la période estivale ou l'eau chauffe. Les travaux ont également permis de créer de nombreux refuges aux abords

des mares, mais également de créer un cordon boisé sur 7 km en parallèle de la nouvelle digue pour permettre aux espèces de se déplacer dans un environnement favorable. Ces aménagements comprennent la création de 220 gîtes à reptiles, 45 000 plants forestiers, 6 000 baliveaux (jeunes arbres âgés de 2 à 4 ans assez droits et vigoureux pour devenir de beaux arbres à l'avenir), 1 000 arbres tiges 16/18 (arbres de de taille moyenne) ainsi que la plantation de 50 000 héliophytes et hydrophytes dans des mares et autour.

Les héliophytes, plantes qui poussent "les pieds dans l'eau" sont des plantes dont l'appareil végétatif et reproducteur est totalement aérien et dont les racines ou rhizomes se développent dans la vase ou dans une terre gorgée d'eau. Les hydrophytes, pour leur part, sont des plantes semi aquatiques de type "nénuphar" qui vivent en partie ou totalement immergées dans l'eau une bonne partie de l'année voire toute l'année (figure 8).

L'ensemencement hydraulique, nommé aussi hydro-ensemencement, alternative rapide et peu coûteuse à l'installation de gazon en plaque, s'en est suivi sur plus de 330 000 m² ; il a été effectué par Alpes Azur Environnement (figure 9).

Des érables champêtres et des frênes ont été plantés sur les talus de la lône. Ainsi, des espèces protégées ont été sauvées du chantier de la digue et réintroduites dans la lône, comme la

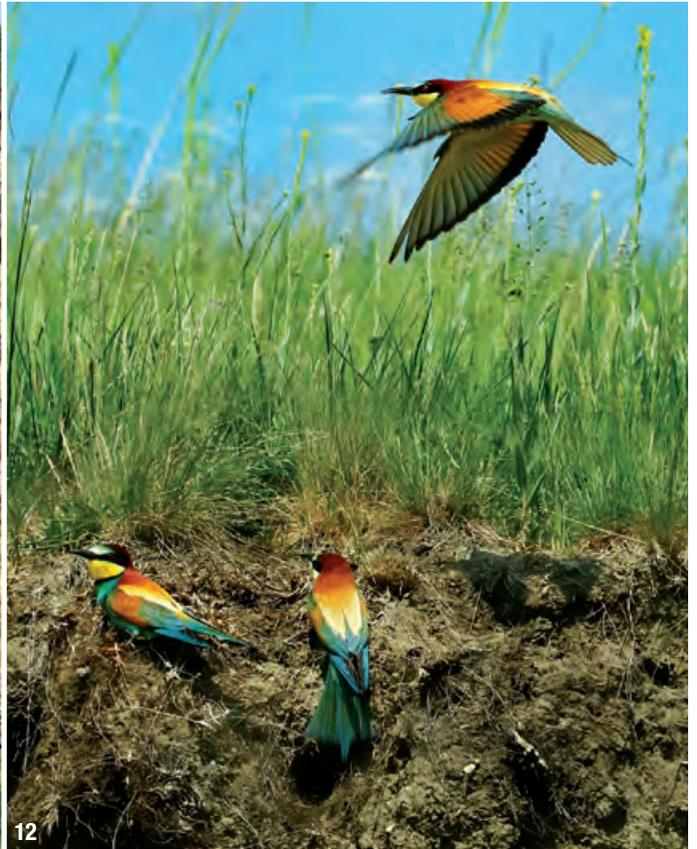


10
© Z'ART FILMS PRODUCTION



11

© Z'ART FILMS PRODUCTION



12

© SCHWOAZE

estivale d'été. Cette opération a été possible en partenariat avec le Cbn Méditerranée qui est venu prélever des bulbes qui allaient être détruits sur le talus ferroviaire, et qui les a ensuite mis en pépinière à Porquerolles pour enfin les réimplanter sur le site.

D'autre part, 200 gîtes à reptiles ont été fabriqués et positionnés tout au long de la lône, constitués d'une association de blocs et de rémanents de végétaux (figure 10).

Enfin, une belle surprise a entraîné des adaptations au projet : lors de l'extraction des matériaux, des "falaises", de hauteur moyenne de 4 à 5 m, ont été créées, qui devaient ensuite être adoucies en fin de chantier ; mais elles ont de fait constitué un refuge très intéress-

11- Falaise à guépriers.
12- Guépriers d'Europe.

11- Cliff for bee-eaters.
12- European bee-eaters.

sant pour le guépier d'Europe qui a pu y creuser son nid.

Le groupement a donc fait en sorte de conserver ces falaises pour ne pas impacter l'habitat du guépier d'Europe et pour qu'il revienne prendre possession des lieux l'année prochaine (figures 11 et 12). □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Symadrem

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Egis - Safège

GROUPEMENT D'ENTREPRISES :

Spie Batignolles Valérien (mandataire) – Atp environnement – La Compagnie des Forestiers

PRINCIPALES QUANTITÉS

MODELAGE ET RENATURATION D'UNE LÔNE : 3500 m x 70 m

RÉALISATION D'UN CORDON FORESTIER : 9 km

VÉGÉTALISATION DES TALUS DE LA DIGUE : 9 km

VÉGÉTALISATION DE L'ESPACE INTER-REMBLAIS : 9 km

VÉGÉTALISATION DU DÔME DE LA DÉCHARGE DES SÉGONNAUX : 110000 m²

ABSTRACT

DYKE STRENGTHENING AND ECOLOGICAL RESTORATION OF THE RHONE BACKWATER

CLÉMENT PORCIERO, SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN - THOMAS DELASSUS, SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN - GRÉGORI LAFOIS, SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN - STANISLAS MICHALON, LA COMPAGNIE DES FORESTIERS

On the left bank of the Rhône, a dyke 10 km long has been built between Arles and Tarascon. The works included the creation of a backwater in response to hydraulic and environmental offsetting measures. These works form part of the Rhône plan established by the government and the other regions bordering on the river. The works were completed in more than two years, in the spring of 2021. □

REFUERZO DE DIQUE Y RENATURALIZACIÓN DEL BRAZO MUERTO ARTIFICIAL DEL RÓDANO

CLÉMENT PORCIERO, SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN - THOMAS DELASSUS, SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN - GRÉGORI LAFOIS, SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN - STANISLAS MICHALON, LA COMPAGNIE DES FORESTIERS

En la orilla izquierda del Ródano, se ha construido un dique de 10 km entre Arles y Tarascon. Las obras incluían la creación de un brazo muerto artificial para responder a las medidas de compensación hidráulicas y medioambientales. Estas obras se inscriben en el plan del Ródano, elaborado por el Estado y las demás regiones ribereñas. Finalizaron en primavera de 2021 tras más de 2 años de trabajo. □



© MÉTROPOLE DU GRAND LYON

L'ANALYSE SPATIALE DU RÉSEAU EXPRESS VÉLO LYONNAIS

AUTEURS : ANTONIN GOSSET, INGÉNIEUR CONFIRMÉ, ARCADIS - NOÉMIE VITORIO, CHEF DE PROJET, ARCADIS

AFIN DE FOURNIR AUX ÉLUS DES ÉLÉMENTS DE PRIORISATION SUR SON FUTUR RÉSEAU EXPRESS VÉLO, LA MÉTROPOLE DE LYON A CONFIE À ARCADIS L'ÉTUDE DE 146 km DE VOIRIE POUR EN ANALYSER LA CONFORMITÉ VIS-À-VIS DES EXIGENCES FIXÉES POUR CE PROJET.

LE RÉSEAU EXPRESS VÉLO DE LYON MÉTROPOLE

Le nombre de cyclistes ne cesse de croître depuis plusieurs années dans la Métropole de Lyon : la fréquentation a cru de 30 % entre 2019 et 2020. Pour accompagner cette dynamique, la Métropole cherche à lever le premier frein à la pratique du vélo qu'est la sécurité du déplacement. Il s'agit donc de construire un nouveau réseau de transport alternatif à l'échelle de la Métropole avec pour objectif de tripler les déplacements à vélo d'ici 2026. Outre l'objectif de réduction de l'usage de la voiture et d'amélioration de la qualité de l'air, ce réseau a pour voca-

tion la lutte contre la sédentarité, l'accès à tous au vélo (enfants et femmes notamment), ainsi que l'accompagnement par de la végétalisation le long du réseau pour apporter l'ombrage nécessaire (figure 1), augmenter la biodiversité, et réduire le phénomène d'îlots de chaleur urbains.

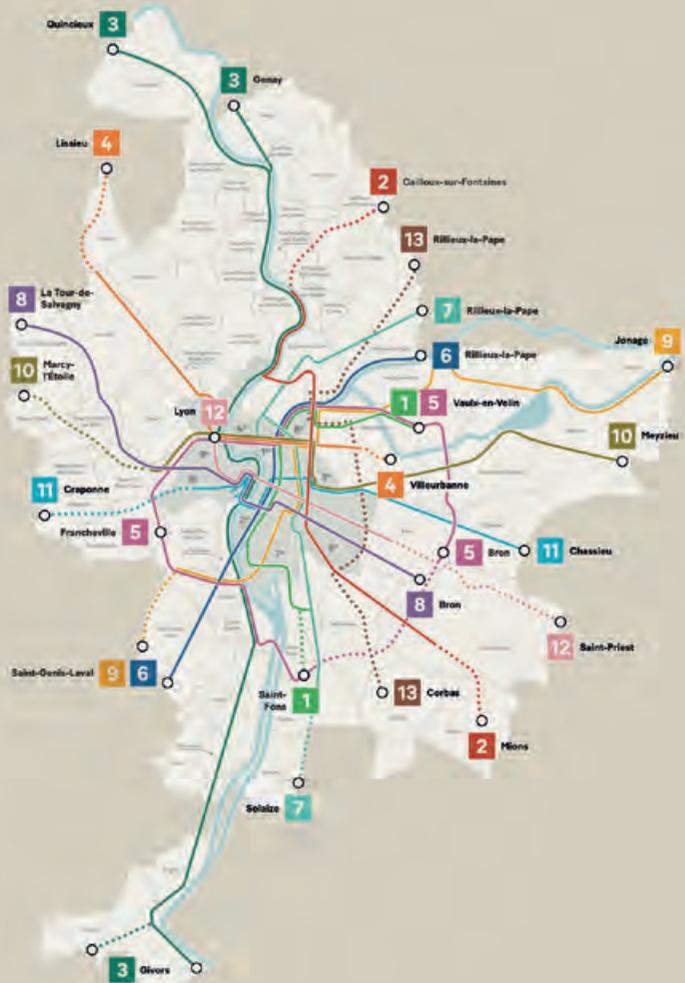
Ce Réseau Express Vélo (REV) permettra des déplacements rapides, sécurisés, confortables sur des distances plus longues. Le REV, désormais dénommé "les Voies Lyonnaises" proposera 250 km d'aménagements cyclables à l'horizon fin 2025, et 355 km en 2030 (figure 2), aux caractéristiques suivantes :

1- Vue de l'aménagement des Voies Lyonnaises.

1- View of development of the "Voies Lyonnaises".

- Des voies sécurisées, réservées aux cyclistes et séparées physiquement du reste de la route, des trottoirs et des voies de bus ou de tram ;
 - Des voies larges de 3 à 4 m pour se croiser en toute tranquillité même avec un vélo cargo (figure 3) ;
 - Du mobilier urbain adapté le long des tracés : repose-pied aux carrefours, fontaines à eau, stations de gonflage, arceaux de stationnement ;
 - Des itinéraires continus, les plus directs possibles, avec une signalétique bien visible ;
 - De la végétalisation (arbres et plantations basses) pour apporter de l'ombre et de la fraîcheur en été.
- Le REV permettra de faciliter les déplacements des cyclistes entre les communes de la périphérie de la Métropole et le cœur de l'agglomération mais aussi entre la plupart des villes de la première couronne.

CARTE DES VOIES LYONNAISES 2026-2030



Légende :

- Réseau 2026
- Réseau 2030

1 Vaulx-en-Velin Saint-Fons	21 km	8 La Tour-de-Salvagny Bron	26 km
2 Calloux Mions	32 km	9 Jonage Saint-Genis-Léval	37 km
3 Guinçieux Givors	57 km	10 Marcy-l'Étoile Meyzieu	31 km
4 Lissieu Villeurbanne	22 km	11 Creponne Chassieu	25 km
5 Saint-Fons par Francheville, Bron	48 km	12 Lyon Saint-Priest	20 km
6 Rillieux la Pape Saint-Genis-Léval	20 km	13 Rillieux Corbas	24 km
7 Rillieux Solaise	34 km		

© MÉTROPOLE DU GRAND LYON

2

Pour l'ensemble du projet, la Métropole a prévu une enveloppe de 100 millions d'euros dans sa programmation pluri-annuelle des investissements 2021-2026.

Le profil en travers type que la Métropole souhaite mettre en place est caractérisé par les dimensions cibles suivantes par typologie de fonction :

- Piste cyclable REV bilatérale de 3 m par sens ou bidirectionnelles de 4 m ;
- Trottoirs à 2 m ;
- Bande plantée d'arbres de 2 m ;
- Site propre Transport en Commun (TC) : 3,25 m ;
- Voie de circulation générale : 3,25 m.

La figure 4 illustre ce profil type, qui sera adapté en fonction des typologies existantes le long des axes, par exemple sens unique de circulation générale avec une seule bande plantée.

Dans tous les cas, les fonctions trottoir seront maintenues pour garantir l'accès piéton en parallèle du REV.

PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

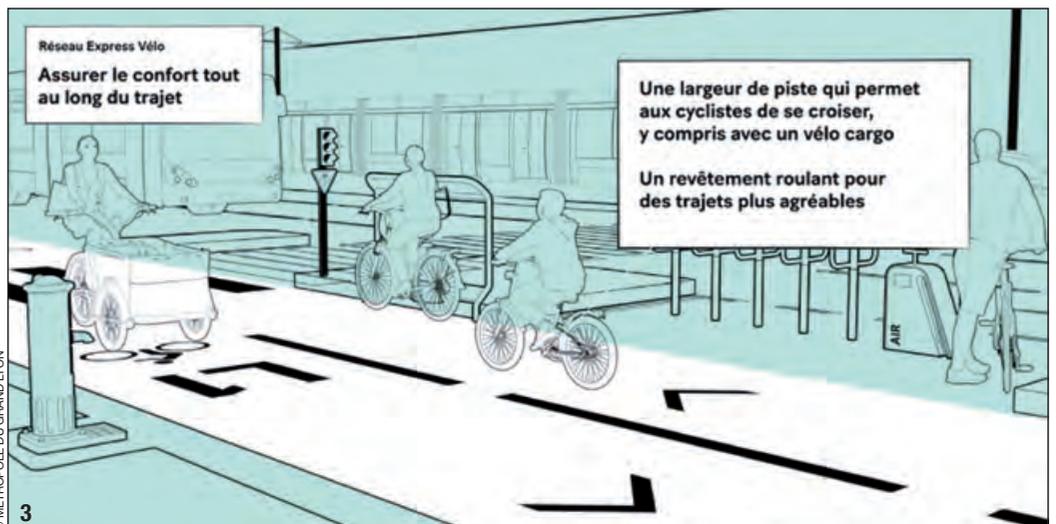
Partant de ces caractéristiques et des axes pressentis, la Métropole de Lyon a commandé fin 2020 à Arcadis et à deux autres bureaux d'étude l'évaluation sommaire de la faisabilité des 250 km d'aménagements pressentis. ▶

2- Carte des Voies Lyonnaises 2026-2030.

3- Des voies larges pour se croiser facilement et fluidifier le trafic croissant.

2- Map of the "Voies Lyonnaises" 2026-2030.

3- Broad lanes to pass one another easily and increase the fluidity of growing traffic.



© MÉTROPOLE DU GRAND LYON

3

4- Profil en travers type pour un double sens VP et double sens TC site propre.

5- Schéma simplifié des données croisées au SIG du REV.

6- Illustration de la couche REV (en rouge) et d'une couche thématique à joindre (en bleu).

7- Largeurs d'emprise autour de l'axe REV.

4- Typical cross section for reserved right-of-way two-way passenger car and two-way public transport.

5- Simplified diagram of REV data crossed with the GIS.

6- Illustration of the REV layer (in red) and a thematic layer to be attached (in blue).

7- Right-of-way widths around the REV route.

L'objectif était de fournir aux élus dans des délais contraints de grands indicateurs destinés à caractériser la possibilité d'insertion du REV sur les axes pressentis.

L'approche demandée par la Métropole a reposé sur le traitement des données existantes afin de réaliser une analyse de l'impact de l'insertion du REV sur les fonctionnalités actuelles des axes étudiés.

La Métropole a proposé des profils types, par fonctionnalités : sens de circulation, aménagements TC en site propre, piste cyclable REV, trottoirs, alignements d'arbres et les largeurs d'emprise associées.

Un atelier de travail a permis d'harmoniser entre les 3 groupements à la fois les prérequis et la manière d'analyser l'existant (portant principalement sur la distinction entre aménagement récent ou non de l'existant) ainsi que le format des livrables attendus par la Métropole (planche, échelle, graphique).

UN DIAGNOSTIC S'APPUYANT SUR LE SIG L'APPROCHE GÉNÉRALE

Arcadis a pu valoriser son savoir-faire en matière de SIG (Système d'Informa-

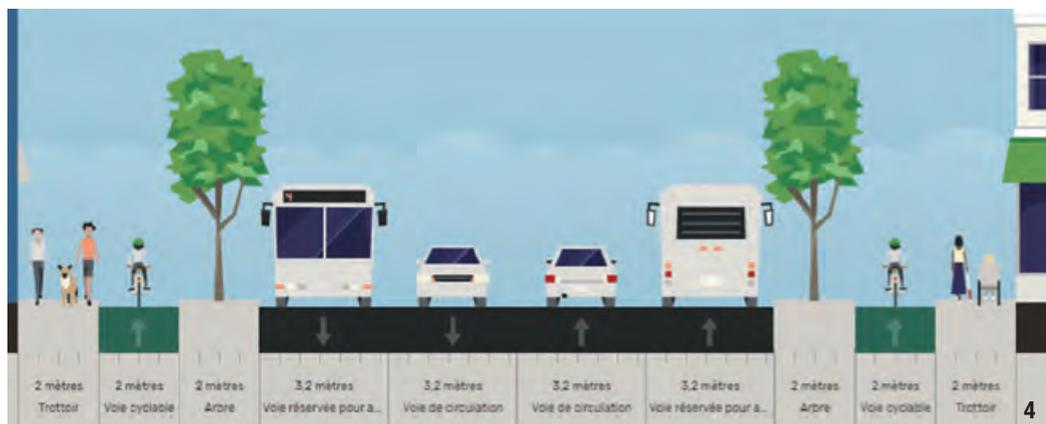


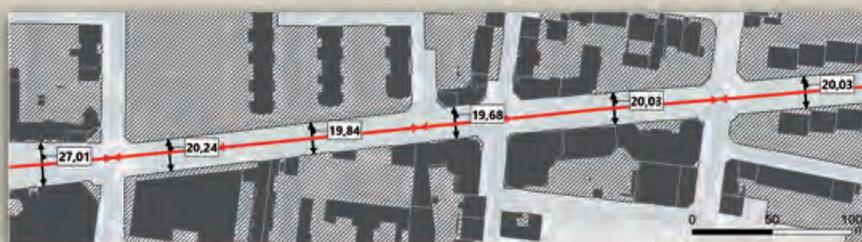
SCHÉMA SIMPLIFIÉ DES DONNÉES CROISÉES AU SIG DU REV



ILLUSTRATION DE LA COUCHE REV (EN ROUGE) ET D'UNE COUCHE THÉMATIQUE À JOINDRE (EN BLEU)



LARGEURS D'EMPRISE AUTOUR DE L'AXE REV



tion Géographique), de traitement de bases de données et en aménagement "modes actifs". Ceci a permis de proposer un rendu précis, rapide et reproductible sur 146 km linéaires :

→ Dans un premier temps Arcadis a mis en place une méthodologie ad-hoc, s'appuyant sur les données

SIG transmises par le Grand Lyon et en les traitant afin d'obtenir un état des lieux du terrain précis et rapide, correspondant à son besoin ;

→ Dans un second temps, une visite terrain a permis de confirmer le diagnostic et de réaliser les éventuels ajustements ;

→ Sur la base du diagnostic, une analyse de la conformité ou non aux exigences du REV a été réalisée. Cela consistait à comparer des largeurs et fonctions existantes avec les largeurs issues du profil type et à la définition du profil type futur.



8

© ARCADIS

Le traitement des données a été automatisé par des traitements le long des axes à analyser.

Les gains de productivité opérés en réalisant des traitements automatisés sur l'ensemble du linéaire a permis de réduire de manière drastique les temps passés sur les tâches manuelles. Ces dernières se sont retrouvées réduites à la préparation des données et au contrôle des résultats.

Ci-après sont précisés ces traitements automatiques.

LES CROISEMENTS GÉOGRAPHIQUES

L'approche a reposé sur des croisements SIG par "jointure spatiale" entre chaque tronçon à étudier et les données de la Métropole. Une jointure spatiale est un traitement SIG de base permettant d'affecter les attributs d'une couche à une autre couche en fonction de leur relation spatiale (intersecte, inclus, est inclus, au plus proche, etc.). En l'occurrence, il s'agit d'affecter les attributs des couches SIG de la Métropole au SIG du REV. La figure 5 présente les données SIG mobilisées. La figure 6 illustre une jointure spatiale à réaliser entre l'axe REV et l'axe des aménagements vélo.

Le défi reposait sur le fait que les relations spatiales entre objets linéaires sont par nature ambiguës lorsque les segments ne sont pas identiques. Arcadis a développé une méthode de

8- Photographie à 360° de la visite de terrain Place Guichard, Lyon 3.

9- Tableau de synthèse du diagnostic d'un axe REV.

8- 360° photo of the field visit to Place Guichard, Lyon 3.

9- Summary table of the diagnostic of an REV route.

traitement SIG préalable, permettant de pallier ce risque.

Cette approche a permis de renseigner les fonctionnalités actuelles (type d'aménagement cyclable, type de voi-

rie) de manière fiable, efficace et homogène pour servir de base à l'inspection de terrain.

CALCUL DES LARGEURS DE FAÇADE À FAÇADE

La largeur d'emprise de façade à façade est le critère de contrainte primordial vis-à-vis duquel les profils-types ont été testés. Il était donc nécessaire de connaître pour chaque tronçon les largeurs disponibles d'espace public (dite façade à façade) pour pouvoir définir le profil type futur avec le REV.

Arcadis a opté pour une approche exploitant les données parcellaires. Le parcellaire cadastral (parcelles et bâti) constitue la référence en matière d'emprises.

Il n'existe pas d'outil permettant de répondre directement au besoin.

Aussi, une méthodologie SIG ad-hoc a été mise en place afin de réaliser de manière semi-automatisée le calcul de l'espace public disponible. La figure 7 montre un exemple de calcul de largeurs dans le centre de Lyon avec le cadastre.

Afin de fiabiliser les résultats, chacune des largeurs a été vérifiée individuellement en s'appuyant sur l'orthophotographie haute résolution de la Métropole de Lyon (certaines parcelles étant incorrectes en milieu périurbain) et sur Google StreetView® (pour les dénivelés, non visibles sur orthophoto, sachant que les photos sur StreetView de la Métropole sont relativement récentes). Les cas ambigus restants ont été vérifiés sur le terrain.

Cette approche a permis de calculer les largeurs de façade à façade de manière efficace et fiable.

INSPECTIONS TERRAIN

Les inspections terrain ont consisté à vérifier la validité des données renseignées sur SIG, d'une part, et de s'appropriier le contexte urbain, d'autre part. L'ensemble des 146 km ayant été renseigné et cartographié en amont, la visite terrain a pu être menée de manière efficace, en se focalisant sur les zones de conflit ou de doute.

En termes d'approche innovantes, une caméra à 360° a permis de capturer l'ensemble de l'environnement (figure 8).

TABLEAU DE SYNTHÈSE DU DIAGNOSTIC D'UN AXE REV

Linéaire	km	%
Linéaire total	17	
Linéaire équipé d'aménagement cyclable	11,2 km	65%
Linéaire équipé d'une piste cyclable	6,9 km	40%
Linéaire équipé de voie verte	0,0 km	0%
Linéaire équipé d'autres types d'aménagements	4,3 km	25%
Linéaire non équipé d'aménagement cyclable	5,9 km	35%
Linéaire récemment aménagé	0,7 km	4%
Linéaire non récemment aménagé	16,3 km	96%
Linéaire récemment aménagé sans aménagement cyclable	0,7 km	100%

9

© ARCADIS

RENDU SYNTHÉTIQUE DU DIAGNOSTIC

La table SIG obtenue à l'issue des différents traitements a ensuite permis d'analyser en termes qualitatifs et quantitatifs l'existant. Le rendu demandé par la Métropole pour le diagnostic de l'existant consistait à définir les éléments indiqués en figure 9.

ÉVALUATION DE LA PRÉFAISABILITÉ DU REV ET RENDU FINAL

Comme présenté, l'approche demandée par la Métropole repose sur la définition de profils types par section homogène, décrivant de manière stéréotypée les fonctionnalités de la voirie (sens de circulation, aménagements TC en site propre, REV, trottoirs, alignements d'arbres) avec des hypothèses de largeur correspondantes.

L'approche retenue (figure 10) pour l'ensemble des groupements a donc consisté en une analyse itérative :

→ Dans un premier temps, affecter à chaque tronçon le profil type

le plus proche des caractéristiques existantes identifiées au diagnostic ;

→ Dans un second temps, proposer, à dire d'expert, le profil type permettant l'insertion du REV en fonction de la largeur disponible de façade à façade et des fonctionnalités existantes :

- Cela peut occasionner la suppression de certaines fonctionnalités viaires (ex. : stationnement) en cas d'incompatibilité. Mais en conservant certaines fonctions obligatoires : trottoirs par exemple et site propre TC,

- Il était autorisé dans certains cas de proposer des aménagements REV plus réduits (à trois mètres de large minimum pour une piste bidirectionnelle),

- Le cas échéant, l'inscription comme "non compatible" pour l'aménagement du REV sur le tronçon considéré, sauf à étudier plus en détail son aménagement par une modification de la circulation automobile ;

→ Enfin, il a été produit un rendu cartographique (figure 12) pour chaque axe étudié, permettant de qualifier par tronçon :

- Le niveau de complexité des reprises de la voirie nécessaires pour l'aménagement du REV : aucun aménagement car compatible en l'état, aménagement léger (reprise de bordures, reprise du revêtement), aménagement lourd (reprise totale du profil, déplacement de réseaux, ...),

- Le niveau de conformité du REV en piste bidirectionnelle : identifiant les sections où le REV passerait à 4 m, à 3,5 m ou à 3 m (configuration minimale), ou le cas échéant l'incompatibilité.



10- Présentation pédagogique de l'approche méthodologique globale.

11- Tableau de synthèse des aménagements d'un axe REV.

12- Extrait d'une carte de l'atlas d'un axe anonymisé.

TABLEAU DE SYNTHÈSE DES AMÉNAGEMENTS D'UN AXE REV

Linéaire	Kml	%	Aménagement ancien (kml)	Aménagement récent (kml)
0 - Non compatible REV	1,0 km	4%	0,5 km	
1 - Ajustable avec aménagements lourds – REV minimal	5,0 km	20%		
2 - Ajustable avec aménagements lourds – REV réduit	3,0 km	12%		
3 - Ajustable avec aménagements lourds – REV optimal	6,0 km	24%	4,7 km	1,3 km
4 - Ajustable avec aménagements légers – REV minimal	3,5 km	14%	3,5 km	
5 - Ajustable avec aménagements légers – REV réduit	1,0 km	4%		
6 - Ajustable avec aménagements légers – REV optimal	2,0 km	8%	5,0 km	
7 - Conforme REV minimal	2,0 km	5%	1,4 km	0,6 km
8 - Conforme REV réduit	1,0 km	4%	0,9 km	
9 - Conforme REV optimal	1,0 km	4%	0,1 km	

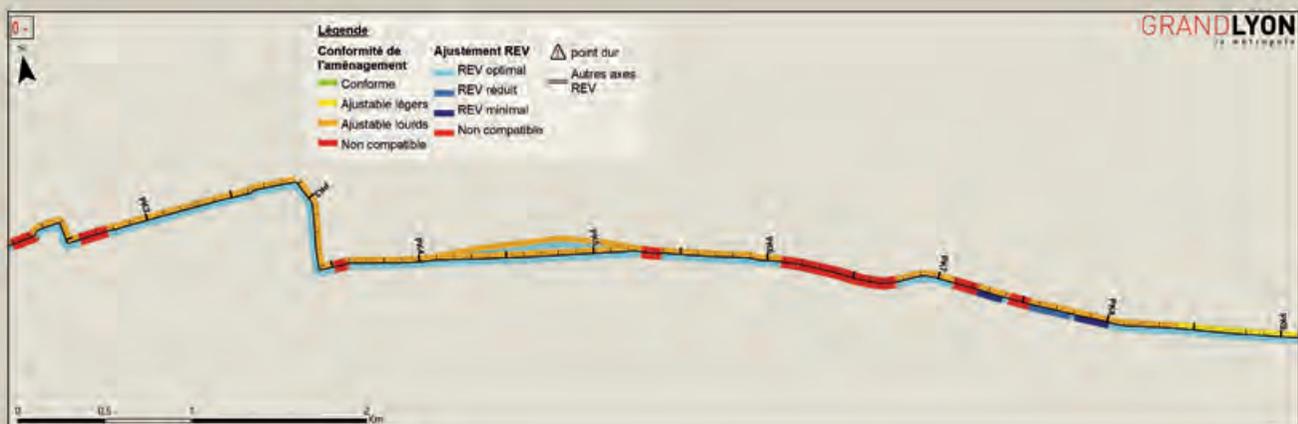
11 © ARCADIS

10- Instructive presentation of the overall methodological approach.

11- Summary table of development of an REV route.

12- Excerpt from a map of an anonymised route.

EXTRAIT D'UNE CARTE DE L'ATLAS D'UN AXE ANONYMISÉ





INNOVATIONS ENVIRONNEMENTALES DANS LES FONDATIONS

AUTEURS : CYRIELLE BERTHIER, RESPONSABLE ENVIRONNEMENT, SOLETANCHE BACHY FRANCE - STÉPHANE MONLEAU, DIRECTEUR COMMERCIAL, SOLETANCHE BACHY FRANCE - CHRISTOPHE JUSTINO, RESPONSABLE DU DÉPARTEMENT MATÉRIAUX, SOLETANCHE BACHY - RÉGIS LEBEAUD, RESPONSABLE DU BUREAU D'ÉTUDES, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES - KHALID LHAMIDI, CONDUCTEUR DE TRAVAUX PRINCIPAL, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

L'ACCORD DE PARIS, ADOPTÉ EN 2015 PAR 196 PARTIES À L'OCCASION DE LA COP21, A POUR OBJECTIF DE LIMITER LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE À UN NIVEAU BIEN INFÉRIEUR À 2°C. POUR Y PARVENIR, L'ACCORD FIXE UN OBJECTIF DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO₂ DE 40% À L'HORIZON 2030. LE MONDE DES FONDATIONS SE DOIT DE PARTICIPER LARGEMENT À CE PROGRÈS. PRÉSENTATION DE TROIS EXEMPLES D'INNOVATIONS ET DE DÉVELOPPEMENTS VISANT CET OBJECTIF : CONCEPTION DE MATÉRIELS ÉLECTRIQUES DE CHANTIER, BÉTONS DE FONDATION À ÉMISSION RÉDUITE DE CARBONE, NOUVELLES GAMMES DE PIEUX PERMETTANT DE RÉDUIRE LES QUANTITÉS DE BÉTON ET DE DÉBLAIS.

LE MATÉRIEL ÉLECTRIQUE SUR CHANTIER

C'est cet objectif que Soletanche Bachy s'engage à atteindre en matière de réduction de ses émissions de CO₂ sur les scopes 1 & 2 (installations et équipements, flotte de véhicules, achat d'électricité).

De plus, le groupe travaille depuis plusieurs années sur la réduction des nuisances occasionnées par ses chantiers et en particulier des nuisances sonores.

89% des émissions de CO₂ de Soletanche Bachy (scopes 1 & 2) provien-

1- Vue d'ensemble du chantier Testimonio II.

2- Hydrofraise avec powerpack électrique sur le chantier Testimonio II.

1- General view of the Testimonio II worksite.

2- Hydrofraise with electric power pack on the Testimonio II site.

ent de la consommation de carburant. En effet, les engins de chantier pour fondations profondes fonctionnent majoritairement au fioul, ce qui induit une consommation importante d'énergie fossile, des émissions de carbone et de particules nocives et enfin des nuisances sonores.

Par ailleurs, le mix énergétique français a l'avantage d'être fortement décarboné grâce au nucléaire et aux énergies renouvelables. La motorisation électrique apparaît alors comme une alternative plus silencieuse et plus respectueuse de l'environnement.

Depuis son invention par Soletanche Bachy dans les années 70, l'Hydrofraise® est devenue une machine emblématique pour les fouilles urbaines en parois moulées. Soletanche Bachy a continué d'innover pour améliorer cet équipement. Et naturellement, à l'image de l'évolution du secteur automobile, l'idée d'une motorisation électrique est née.

La collaboration des services Matériel et Recherche & Développement a ainsi abouti à la première utilisation d'un powerpack électrique dans le groupe en 2017 sur un chantier londonien (figure 3).

Ce développement a nécessité un travail de conception, suivi de la fabrication de matériel permettant l'intégration d'un powerpack électrique Dieseko sur l'Hydrofraise®.

Trois ans plus tard, Soletanche Bachy électrifieait son Hydrofraise® compacte à grappeurs pour le chantier Testimonio II à Monaco (figures 1 et 2).

Grâce à cette innovation, l'Hydrofraise® a pu travailler en s'alimentant directement sur le réseau de distribution d'électricité.

Cela représente plus de 60 000 litres de fioul économisés sur les mois de septembre à décembre 2020 (5 000 litres par semaine).

Des mesures réalisées sur le chantier par un bureau de contrôle montrent une réduction de plus de 6 dBA de la puissance acoustique du powerpack de l'Hydrofraise, soit une intensité sonore divisée par 4 !





3 © TIDEWAY - IMAGE2

L'utilisation de ce powerpack a également permis de constater une nette réduction des vibrations et des rendements équivalents, voire supérieurs à une Hydrofraise® thermique à grippeurs, avec une puissance moteur plus linéaire.

En 2021, la ville de Paris met en place une série d'actions pour réduire les déversements des eaux d'assainissement dans la Seine en temps de pluie. Cela permettrait, en particulier, d'atteindre une qualité de l'eau satisfaisante pour les épreuves de nage en eau libre des JO de 2024.

C'est sur le chantier emblématique du bassin Austerlitz (figures 4 et 5) que le powerpack électrique fait son entrée dans la capitale, équipant cette fois l'Hydrofraise® EV5. Pour cela, les équipes du chantier et du service matériel ont travaillé à l'élaboration d'un dispositif de raccordement multiple autour de l'ouvrage (figure 6), facilitant la mise en place de l'Hydrofraise® à tout instant. Pour poursuivre sa démarche, le groupe investit dans deux powerpacks électriques supplémentaires et modifie les Hydrofraises® afin que chacune d'entre elles puisse en être équipée.

En parallèle, un système de stockage d'énergie (pack batteries) est actuellement à l'essai sur un chantier grenoblois. Cet équipement permet d'alimenter le chantier avec un branchement au réseau de faible puissance : les batteries se rechargent lors des creux d'activité et restituent l'énergie lors des pics de consommation.

Avec ces solutions, Soletanche Bachy souhaite réaliser des chantiers plus écologiques et respectueux de leur voisinage.

L'EXPERTISE TECHNIQUE DANS LE DOMAINE DES BÉTONS DE FONDATIONS PROFONDES AU SERVICE DE SOLUTIONS BÉTON À ÉMISSION RÉDUITE DE CARBONE

Le béton fait partie intégrante de l'expertise et du savoir-faire de l'entreprise

3- Hydrofraise avec powerpack électrique sur Thames Tideway Tunnel.

4- Vue d'ensemble du bassin Austerlitz.

3- Hydrofraise with electric power pack on Thames Tideway Tunnel.

4- General view of the Austerlitz basin.

en termes de spécifications et prescriptions, particulièrement pour les ouvrages géotechniques. Pour accompagner sa stratégie visant à réduire ses émissions et répondre à ses engagements forts, Soletanche Bachy France s'est inscrit dès 2020 dans la démarche Exegy initiée par Vinci Construction pour en appliquer un des messages clés : mettre à disposition les solutions béton les plus optimisées en termes d'empreinte carbone pour chaque projet. La démarche *Exegy by Soletanche Bachy* repose sur :



4 © CEDRIC HELSY



5
© CÉDRIC HELSLY

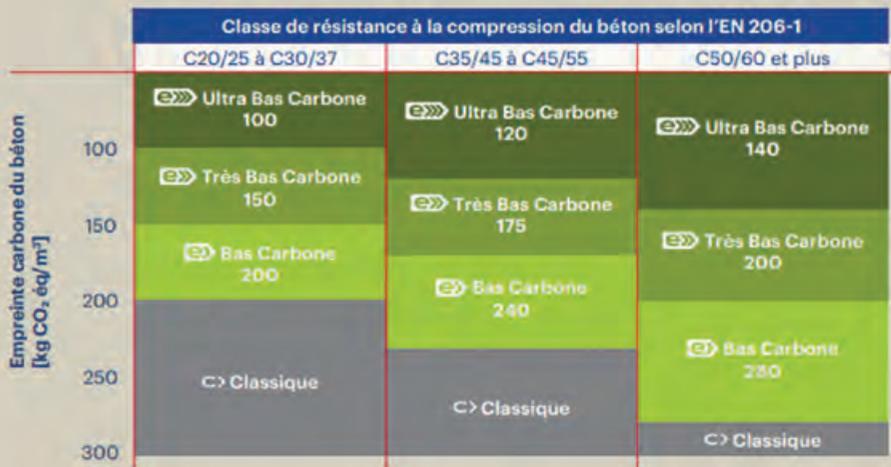
RACCORDEMENT ÉLECTRIQUE AUTOUR DU BASSIN AUSTERLITZ



© SOLETANCHE BACHY

6

PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE DES FORMULES DE BÉTON EN TENANT COMPTE DE LA CLASSE DE RÉSISTANCE DEMANDÉE



© EXEGY BY SOLETANCHE BACHY

7

5- Hydrofraise avec powerpack électrique sur le bassin Austerlitz.

6- Raccordement électrique autour du bassin Austerlitz.

7- Performance environnementale des formules de béton en tenant compte de la classe de résistance demandée.

5- Hydrofraise with electric power pack on the Austerlitz basin.

6- Electrical connection around the Austerlitz basin.

7- Environmental performance of concrete mix designs taking into account the required strength class.

→ Une proposition de standards bas carbone, très bas carbone et ultra bas carbone, afin d'évaluer la performance environnementale des formules de béton en tenant compte de la classe de résistance demandée (figure 7) pour pallier l'absence de définition claire du concept de béton bas carbone ;



8 © THIBAUT DE VREESE

- Le recours au configurateur BETie (pour les bétons fournis par les producteurs affiliés au Snbpe) ou au calculateur proposé par la fédération européenne des entreprises de fondations (Effc) ;
 - L'expertise technique du laboratoire matériaux qui spécifie, prescrit et formule les bétons de fondations profondes depuis plus de 30 ans et possède une expérience internationale dans l'emploi de fort taux de substitution du clinker par des additions minérales dans les bétons avec plus de 75 % de projets de paroi moulée et pieux réalisés en béton considéré bas carbone (émission inférieure à 200 kg CO₂/m³ pour des C35/45 et C40/50) ;
 - Un service achat formé et sensibilisé à l'approche béton bas carbone pour identifier au plus tôt la disponibilité des matériaux alternatifs répondant au besoin d'optimisation des formulations ;
 - Des partenariats techniques avec les fournisseurs de béton prêt à l'emploi et les fournisseurs de matériaux pour mettre au point les solutions les plus optimisées localement ;
 - Une communication forte au sein de l'entreprise avec la mise en place de formations à destination des chargés d'affaire et responsables environnement.
- La recherche et développement liée au béton et aux matériaux cimen-

taires vise à développer des méthodes d'essais des bétons à l'état frais, pour appuyer l'approche performantielle des formulations, tout en étudiant les performances mécaniques et les indicateurs de durabilité de formulations alternatives pouvant incorporer le plus d'additions minérales ou de produits de substitution au ciment Portland (clinker). Les leviers de réduction des émissions de carbone des formules de béton passent par une réduction

8- Vue d'ensemble du chantier de La Part-Dieu montrant plusieurs ateliers.

9- Vue de Port 2000 phase III.

8- General view of the La Part-Dieu construction site showing several sets of equipment.
9- View of Port 2000 phase III.

des teneurs en ciment des formules et la substitution du clinker. De simple contrôle de l'affaissement et de la résistance, le contrôle qualité s'est renforcé avec les essais d'évaluation de la viscosité, de la stabilité vis-à-vis du ressuage localisé, du suivi de la consistance du béton au cours du temps et du contrôle de température dans les ouvrages. Ces essais doivent permettre, au même titre que les essais de durabilité de l'approche performan-



9

© CEDRIC HELSLEY

10- Comparaison des bétons utilisés sur Port 2000 en phases II et III - Émission kg CO₂/m³ (axe à droite) - Teneur en liant + additions (axe gauche) - sources FDES Athil / Ecocem / Omya.

11- Données pressiométriques du site.

Comparison of the concretes used on Port 2000 in phases II and III - Emissions in kg of CO₂/m³ (RH axis) - Binder content + additions (LH axis). Sources: FDES Athil / Ecocem / Omya.

11- Pressure meter data on the site.

tielle, de challenger les concepts de teneur minimale en ciment et réduire encore l'impact carbone de formulation présentant déjà des valeurs basses par rapport à l'ensemble des bétons employés dans la construction.

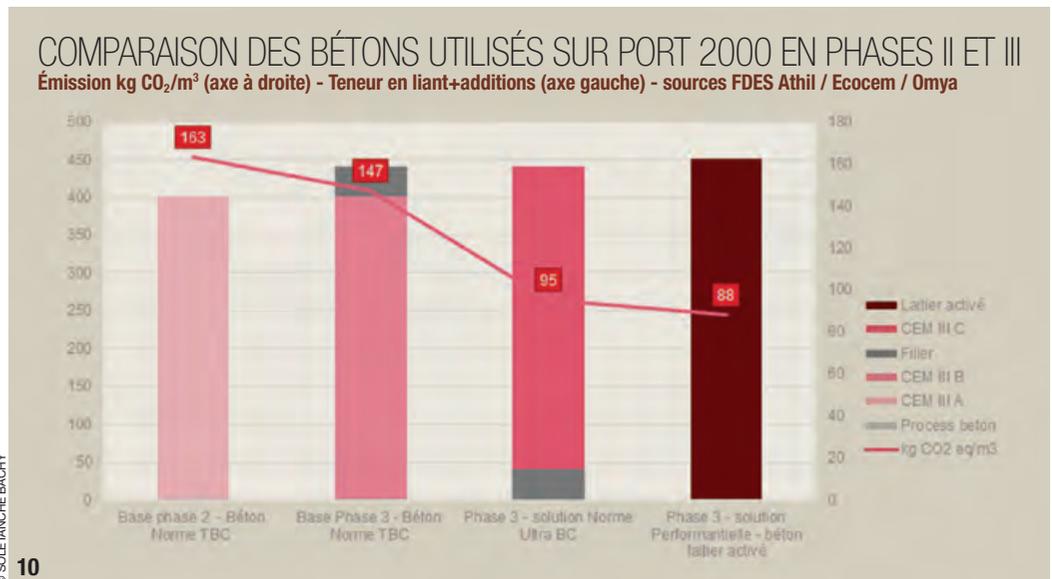
La démarche Exegy peut être également illustrée à travers deux cas concrets de chantiers réalisés entre 2019 et 2021.

LES CHANTIERS DE LA PART-DIEU À LYON

Les chantiers de La Part-Dieu à Lyon, où l'action conjointe du service achats et du laboratoire matériaux ont permis de proposer une solution alternative plus avantageuse d'un point de vue émission de CO₂.

Le quartier de la Part-Dieu à Lyon est le second quartier d'affaires de France. Le projet est le pôle d'échanges multimodal Lyon Part- Dieu et la tour To-Lyon.

Historiquement, sur la région lyonnaise, peu d'offres de béton bas carbone sont disponibles. Et même en fondation, le recours au liant CEM I reste l'offre la plus courante. Grâce à une approche transverse collaborative entre le chantier, le service achats et le laboratoire des matériaux de Soletanche Bachy, la mise en relation d'un producteur d'additions minérales (la société Ecocem) avec un fournisseur de béton prêt à

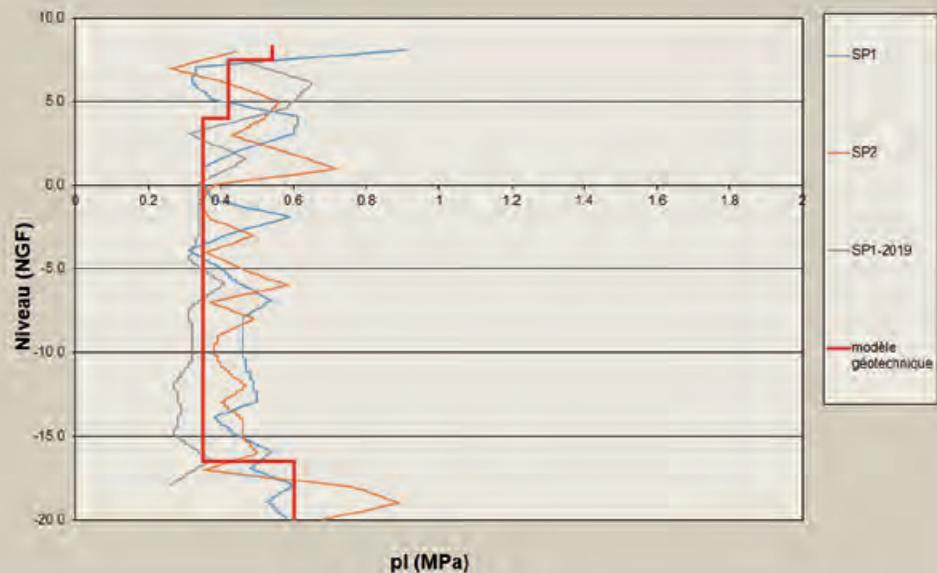


© SOLETANCHE BACHY

10

DONNÉES PRESSIOMÉTRIQUES DU SITE

Analyse des pressions limites



11

© SOLETANCHE BACHY

l'emploi local (Bml) a permis d'élaborer un béton d'ingénierie bas carbone au sens de la norme NF EN 206/CN. Pour mettre au point ce béton classe de résistance C35/45 avec 50% de substitution du ciment CEM I par le laitier de haut fourneau d'Ecocem, le laboratoire matériaux a suivi l'ensemble du processus de validation des bétons de fondation profonde, du béton d'étude à la mise en œuvre sur chantier en passant par la réalisation des essais de convenances. Dans un secteur où l'essentiel des projets était réalisé avec du CEM I ou CEM II, il a été possible d'utiliser un béton bas carbone présentant une réduction de 44% des émissions liées au matériau béton pour un volume de 18000 m³.

LE CHANTIER DES POSTES À QUAI DU PORT AUTONOME DU HAVRE

Le chantier des postes à quai du port autonome du Havre intègre les développements de 2020 du département matériaux permettant l'utilisation de béton à très faible impact CO₂ sur la base des données actuelles sur les matériaux employés.

En 2020, le groupement Soletanche Bachy France/Bouygues TP RF/ADRA (Boskalis), dont Soletanche Bachy France est le mandataire, démarre les travaux de la phase 3 de Port 2000 pour Haropa : 2 postes à quai de 350 m et des terre-pleins associés. Les ouvrages géotechniques comprennent 662 m de paroi moulée en 1,50 m d'épaisseur

(1 m pour la partie de quai en retour). Les volumes de béton concernés par le projet sont d'environ 37000 m³ pour la paroi moulée et 12000 m³ pour le génie civil. La classe d'exposition du béton de paroi moulée est XS3 et la classe de résistance minimale est C35/45. Haropa impose un ciment de type CEM III/B et un dosage minimum de 400 kg/m³. Pendant la phase d'étude du béton, une alternative a été proposée à Haropa avec un ciment de type CEM III/C (conforme à la norme NF EN 206/CN) présentant 85% de substitution du clinker contre 70% pour le CEM III/B sur la base d'une étude interne démontrant que le critère de résistance caractéristique était bien validé à 28 jours avec une telle substitution du clinker. ▷

La formulation spécifique avec ce ciment a fait l'objet d'une étude de laboratoire, d'une validation par essais de convenue et a été mise en œuvre sur 5 panneaux du quai en retour.

Sur ce projet, il a également été proposé une solution innovante en laitier activé développée conjointement avec le laboratoire béton de Vinci Construction et la société Ecocem. Cette solution n'étant pas conforme à la norme et les agréments techniques en cours de validation n'étant pas encore disponibles, il a été décidé de réaliser un démonstrateur pour prouver la faisabilité de réalisation d'un béton de fondation profonde à base de laitier activé ayant une résistance caractéristique de 35 MPa et un maintien d'ouvrabilité de 4 heures, ayant permis le coulage en 2 heures d'une barrette de 50 m³ à 17 m de profondeur. Cet élément fera l'objet d'investigations in situ complémentaires pour déterminer les indicateurs de durabilité de ce béton. Ce type de formulation s'inscrit dans les évolutions normatives que la profession souhaite voir arriver dans les prochaines années.

Le tableau de la figure 10 présente la comparaison, en émission de CO₂, entre le béton utilisé lors de la phase 2 du projet avec les 3 bétons utilisés lors la phase 3.

DE NOUVELLES GAMMES DE PIEUX

Afin d'améliorer les traditionnels pieux Starsol, Soletanche Bachy Fondations Spéciales a développé ces dernières années des pieux Starsol refoulés et munis de rainures, permettant ainsi d'améliorer le frottement latéral.

Il est intéressant de considérer, sur un exemple de chantier courant, les économies apportées par ce type de pieux. Dans le cadre du chantier du futur pôle d'échange multimodal de Cagnes-sur-Mer (06), Soletanche Bachy Fondations Spéciales est intervenu à l'été 2020 pour la réalisation des pieux de fondation du parking relais en sous-traitance de l'entreprise Berthouly.

Le parking relais de 280 places comporte deux niveaux de sous-sols, ainsi que six niveaux en superstructure.

LE CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Le site retenu pour le projet se situe dans la plaine alluviale du Malvan.

Il a fait l'objet de diverses campagnes de reconnaissances géotechniques réalisées par les bureaux Erg (missions G2 AVP et G2 PRO) et Fondasol (mission G3 partielle). Elles ont consisté



12

© SOLETANCHE BACHY

essentiellement en la réalisation de :
 → 6 sondages pressiométriques de 20 à 30 m de longueur ;
 → 6 sondages carottés de 15 à 20 m de longueur ;
 → 4 sondages au pénétromètre statique de 30 m de longueur.

Ces sondages ont confirmé la présence d'alluvions de faibles caractéristiques mécaniques (argiles molles) sur des épaisseurs très importantes et l'absence d'horizon porteur sur la hauteur des reconnaissances (figure 11).

Le niveau de la nappe phréatique a été identifié vers 2 m de profondeur environ sous le niveau du terrain naturel.

LE CONTEXTE SISMIQUE

Les principales données sismiques du projet sont les suivantes :

→ Zone de sismicité 4 = niveau d'aléa moyen (niveau le plus élevé en France métropolitaine) ;

→ Catégorie d'importance = II ;
 → Sol de classe D.

LE SYSTÈME DE FONDATION RETENU

Une solution de renforcement de sols par inclusions rigides ne semblait pas pertinente pour les raisons principales suivantes :

→ Matelas de répartition à réaliser sous nappe (impact sur les terrassements, les soutènements et le rabattement) ;
 → Inclusions du domaine 1 (nécessaires à la portance) donc armées ;
 → Effets cinématiques sous séisme à prendre en compte.

Dès la phase de conception, c'est une solution de fondations profondes par pieux, en l'occurrence des pieux à la tarière creuse, qui a été envisagée (pieux de classe 2 et de catégorie 6 selon la norme NF P94-262).

12- Pieu dégagé STARSOL.REF T-Pile®.

13- Comparaison des différentes solutions de fondation en termes de forage, béton et déblais.

12- Uncovered pile, STARSOL.REF T-Pile®.

13- Comparison of various foundation solutions in terms of boring, concrete and excavated material.

Compte-tenu des terrains rencontrés, il s'agit des pieux de grande longueur (de l'ordre de 25 m), travaillant essentiellement par frottement latéral (contribution très limitée du terme de pointe).

Pour répondre à cette problématique, Soletanche Bachy Fondations Spéciales a proposé une solution de pieux refoulés à ergot (procédé breveté STARSOL.REF T-Pile® - figure 12).

Il s'agit d'un procédé dérivé de la technique des pieux vissés moulés (pieux de classe 3 et de catégorie 7 selon la norme NF P94-262) qui apporte en outre :

→ Une meilleure qualité du béton via le bétonnage au tube plongeur télescopique (évolution du procédé Starsol®) ;
 → La création d'une nervure de béton de forme hélicoïdale autour du fût du pieu grâce à l'ergot.

COMPARAISON DES DIFFÉRENTES SOLUTIONS DE FONDATION EN TERMES DE FORAGE, BÉTON ET DÉBLAIS

	Solution Tarière creuse	Solution STARSOL.REF sans ergot T-Pile	Solution STARSOL.REF avec ergot T-Pile
Linéaire de forage	solution de référence	-28%	-38%
Volume de béton	solution de référence	-48%	-50%
Volume de déblais	solution de référence	-100%	-100%

13

© SOLETANCHE BACHY



© SOLETANCHE BACHY

Ce procédé, fruit d'un long travail de développement et d'exploitation de résultats d'essais de chargement statique, fait l'objet d'un cahier des charges particulier dont la dernière version a été évaluée et validée par l'Ifsttar et le Cerema en janvier 2021 dans le cadre de la Commission Evaluation de Procédés Géotechniques, rassemblant les représentants de la géotechnique. Dans le cas présent, cette solution de pieux STARSOL.REF T-PILE® permet de réduire notablement les quantités à mettre en œuvre, comme on peut le constater sur la figure 13.

14- Réalisation des pieux.

14- Pile execution.

De plus, contrairement aux techniques de pieux forés, le refoulement ne génère quasiment pas de déblais, ce qui supprime ainsi les circulations de camions pour l'évacuation des déblais, les frais de décharge, ainsi que les éventuels coûts de traitement en cas de déblais pollués.

Or, il est généralement constaté que les fournitures de béton et d'armatures sur un chantier de pieux représentent approximativement 75 % des émissions de CO₂, le reste des émissions provenant essentiellement de la consommation de carburant des engins. Les optimisations des fournitures impliquent de ce fait une réduction significative des émissions de CO₂ sur ce chantier.

LES TRAVAUX

Les 111 pieux STARSOL.REF T-PILE® de diamètres 520 à 720 mm et de lon-

gueur allant jusqu'à 25 m ont été réalisés sur une durée de 3 semaines avec un outillage de type Fundex F2800 (figure 14).

La plate-forme de travail avait été aménagée sensiblement au niveau du terrain naturel pour un niveau fini des pieux vers 4 m de profondeur. Pour faciliter le recépage des pieux et limiter les nuisances sonores pour les riverains et les opérateurs, le procédé breveté ARSOL® a été mis en place sur les cages d'armatures. Il permet de supprimer toutes les opérations de recépage au marteau piqueur. □

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL INNOVATIONS IN FOUNDATIONS

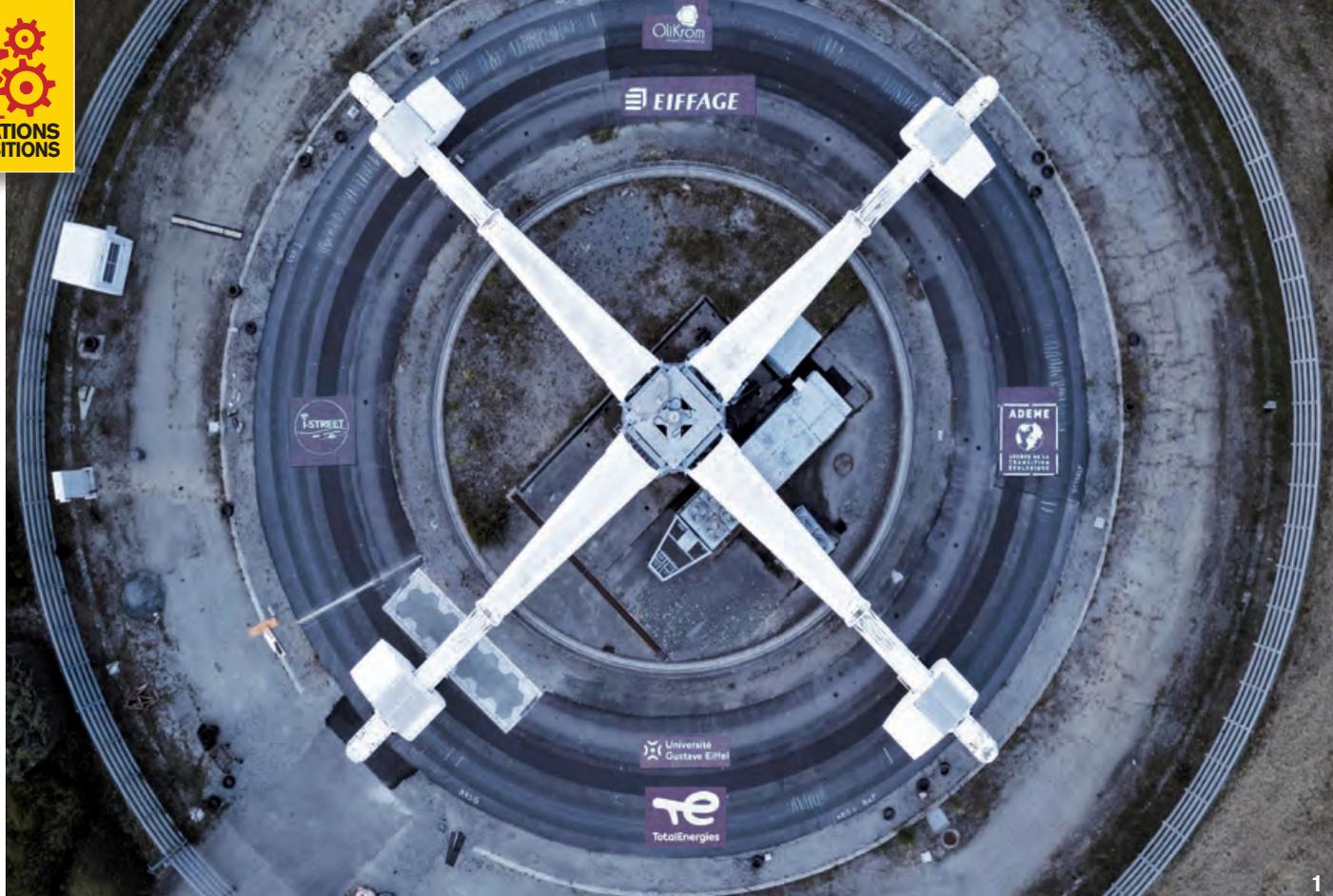
C. BERTHIER, SOLETANCHE BACHY FRANCE - S. MONLEAU, SOLETANCHE BACHY FRANCE - C. JUSTINO, SOLETANCHE BACHY - R. LEBEAUD, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES - K. LHAMIDI, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

The Paris Agreement sets a target of a 40% reduction in CO₂ emissions by 2030. *This article presents three examples of innovations and developments which will enable this target to be achieved. The design of on-site electrical equipment, and in particular Hydrofraises with an electric power pack, makes it possible to save fuel oil and use largely carbon-free energy. The development of low-carbon, very-low-carbon and ultra-low-carbon concretes in foundations is also developing extensively. Finally, new pile products can significantly reduce the quantities of concrete and excavated material.* □

INNOVACIONES MEDIOAMBIENTALES EN LOS CIMENTOS

C. BERTHIER, SOLETANCHE BACHY FRANCE - S. MONLEAU, SOLETANCHE BACHY FRANCE - C. JUSTINO, SOLETANCHE BACHY - R. LEBEAUD, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES - K. LHAMIDI, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

El acuerdo de París fija un objetivo de reducción de las emisiones de CO₂ del 40% en el horizonte 2030. *En este artículo se presentan tres tipos de innovaciones y desarrollos que permitirán alcanzar ese objetivo. El diseño de materiales eléctricos en la obra, y en particular de Hydrofraises con fuente de alimentación eléctrica, permite ahorrar combustible y utilizar una energía que genera escasas emisiones. Asimismo, el uso de hormigones bajos, muy bajos y ultra bajos en carbono se está implantando ampliamente en los trabajos de cimentación. Finalmente, nuevas gamas de pilotes permiten reducir significativamente las cantidades de hormigón y escombros.* □



1 © EIFFAGE, UGE, TOTALENERGIES, OLIKROM

LES AVANCÉES DU PROJET "ROUTE DU FUTUR" I-STREET

AUTEURS : FLAVIEN GEISLER, CHEF DE PROJETS RECHERCHE & INNOVATION, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - FRANÇOIS OLARD, DIRECTEUR TECHNIQUE, RECHERCHE & INNOVATION, EIFFAGE ROUTE - OLIVIER MOGLIA, MARKETING SERVICES / DIVISION BITUME, DÉVELOPPEMENT PRODUIT ET COORDINATION TECHNIQUE, TOTAL ENERGIES - JEAN-FRANÇOIS LETARD, PRÉSIDENT, OLIKROM - NICOLAS HAUTIERE, DÉPARTEMENT COMPOSANTS ET SYSTÈMES (COSYS), DIRECTEUR ADJOINT ET ADJOINT AU DIRECTEUR EN CHARGE DE LA R5G, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

CET ARTICLE PROPOSE UN ÉTAT DES LIEUX DES CONCEPTS ET DÉVELOPPEMENTS EN LABORATOIRE AYANT PERMIS D'ABOUTIR À DES DÉMONSTRATEURS ÉCHELLE 1 :

- UNE EXPÉRIMENTATION SUR LE MANÈGE DE FATIGUE DE L'UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL À NANTES POUR LES MATÉRIAUX ROUTIERS,
- DE NOMBREUSES RÉFÉRENCES DE CHANTIERS DANS LE CAS DES PEINTURES ROUTIÈRES PHOTOLUMINESCENTES.

INTRODUCTION

En août 2017, le projet I-STREET (Innovations Systémiques au service des Transitions Écologiques et Énergétiques dans les infrastructures routières de Transport), porté par le groupe Eiffage, en partenariat exclusif avec TotalEnergies MS - Direction Bitume, Olikrom et l'Université Gustave Eiffel, a été déclaré lauréat de l'appel à projets (AAP) "Route du futur" opéré par l'Ademe dans le cadre du programme d'investissements d'avenir (PIA).

I-STREET comprend 5 projets démonstrateurs combinés dans une vision systémique intégrée et revêt un intérêt stratégique pour chacun des parte-

naires du consortium, mais aussi pour l'ensemble de l'industrie routière nationale et au-delà pour tous les usagers directs et indirects de ces infrastructures "du futur". Des projets ambitieux sur les plans industriel et serviciel :

- **GLOBE** crée et développe une filière logistique froide de granulés de bitume, depuis la raffinerie de production jusqu'au site d'utilisation ;
- **Enrobés du Futur** est un revêtement de nouvelle génération combinant en une couche unique les caractéristiques habituellement recherchées (adhérence, drainabilité, confort de roulement, moindre résistance au roulement, etc.) ;

1- Manège de fatigue I-STREET.

1- I-STREET fatigue test facility.

- **CUD-SF** ou Chaussée Urbaine Démontable à Surface Fonctionnalisée est une route urbaine modulaire qui peut être rapidement démontée, remontée et transposée sur d'autres sites ;
- **SUSHIS** comprend le développement et la commercialisation de signalisations horizontales photo-

luminescentes, qui renforceront la sécurité des usagers et permettront des économies d'énergie ;

- **HERMES** entend révolutionner le marché de la maintenance des infrastructures routières en permettant au gestionnaire du réseau d'accéder à la maintenance prédictive. Il accompagne aussi les mutations des usages de la route en collectant et en exploitant les données nécessaires aux innovations de service. Le projet I-STREET et ses ambitions avaient été présentées dès 2018. L'objet de cet article consiste donc à présenter des résultats issus des 36 premiers mois de R&D.



2a



2b



2c

PROJET GLOBE

Le développement d'une solution bitumineuse sous forme de granulés, qui soit transportable et stockable à température ambiante permettrait de significativement réduire les dépenses énergétiques nécessaires au maintien d'une logistique du bitume chaude. Elle aurait également des conséquences positives en matière de sécurité en éliminant le risque de brûlure.

Le challenge technique qui correspond à façonner un matériau comme le bitume, d'ordinaire conditionné à chaud, sous une forme granulaire, solide et stable

2- Granulés de bitume issus du projet I-STREET/GLOBE.

3- Résultats d'absorption acoustique mesurée au tube d'impédance.

2- Bitumen pellets from the I-STREET/GLOBE project.

3- Sound absorption results measured by impedance tube.

dans le temps nécessite de modifier en profondeur ses caractéristiques de liant usuellement exploitées dans l'industrie routière, en particulier sa capacité d'écoulement et ses propriétés exceptionnelles d'adhésivité. Pourtant, la forme granulaire n'est souhaitée que le temps du stockage et du transport du bitume vers les centrales d'enrobage puisque l'utilisation finale reste identique, à savoir : la cohésion du squelette granulaire et la transmission des efforts mécaniques de l'enrobé sur la chaussée.

Des travaux en laboratoire et sur des sites industriels ont permis de sélectionner et valider à l'échelle pilote des

couples "formulations/procédés" permettant de fabriquer du bitume conditionné à température ambiante. Des études en laboratoire (sensibilité à l'eau, résistance à l'orniérage, module et résistance en fatigue) ont ensuite été menées sur des formules BBSG 0/10 de classe 3 et des GB 0/14 de classe 3. Toutes les valeurs obtenues sont conformes et supérieures aux spécifications définies par les différentes normes relatives à ces produits (EN 13108-1).

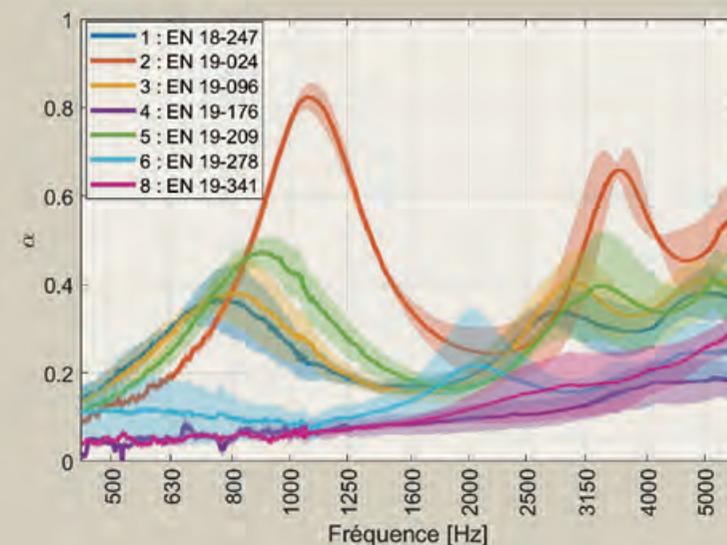


3a



3b

RÉSULTATS D'ABSORPTION ACOUSTIQUE MESURÉE AU TUBE D'IMPÉDANCE



3c



Des études sur enrobés intégrant des bitumes (à chaud ou à froid) modifiés aux polymères ont également été réalisées.

En 2020, un objectif de montée en échelle a été atteint en produisant 5 t de granulés de bitume à l'aide d'un premier procédé (figure 2). Les matériaux produits ont servi à la fabrication d'enrobés (GB et BBSG) sur le poste d'enrobage "Touraine Enrobés" à Esvres-sur-Indre.

L'introduction de bitume dans le malaxeur a été réalisée manuellement au moyen de sacs thermofusibles de 5 kg. La température de fabrication est inchangée par rapport à une fabrication avec un bitume liquide, à savoir une température de 175 °C. Une durée de malaxage de 120 secondes au lieu de 90 secondes a été utilisée du fait de l'introduction manuelle des sacs thermofusibles et afin de s'assurer que ceux-ci soient bien fondus et dispersés dans le malaxeur. Les enrobés ont ensuite été appliqués sur le manège de fatigue de l'Université Gustave Eiffel à Bouguenais afin d'éprouver tant leur résistance en fatigue qu'en orniérage. L'analyse des résultats issus de cette expérimentation sur le manège de fatigue est actuellement en cours.

En 2021, une montée à l'échelle de 5 t sur un second procédé a été atteinte. Des essais de laboratoire sur enrobés ont également été réalisés. Un travail au niveau des postes d'enrobage visant à automatiser l'introduction des granulés de bitume est actuellement en cours. Un chantier démonstrateur sera réalisé en 2022.

Enfin, des études ACV et économiques ont été entreprises afin d'étudier le potentiel industriel des solutions développées dans le cadre de ce projet GLOBE.

PROJET ENROBÉS DU FUTUR

L'objectif du projet Enrobés du Futur est d'améliorer l'acceptation des infrastructures routières par les usagers, maîtrises d'ouvrage (MOA) et maîtrises d'œuvre (MOE) en prenant mieux en compte différentes propriétés d'usage dans la formulation des matériaux développés. Pour cela, Eiffage et l'Université Gustave Eiffel travaillent à un "matériau multifonction" regroupant en un seul matériau de couche de surface urbaine et autoroutière, les performances principales suivantes : absorption acoustique, adhérence élevée, moindre résistance au roulement, durabilité, lutte contre la pollution de l'air.

Ces performances sont, pour certaines, antinomiques. Le verrou scientifique et technologique est précisément de pouvoir les combiner tout ou partie.

Pour cela, dix études de formulation (sensibilité à l'eau et résistance à l'orniérage) ont été conduites. Elles s'appuient en partie sur les travaux préliminaires d'Eiffage en matière d'enrobés phoniques. Ces dix formules ont ensuite été caractérisées, tant du point de vue de l'adhérence, de la

4- Essais sur revêtement dépolluant dans Sense-City.

5- Vérification de l'excavabilité et de la drainabilité de la grave.

4- Tests on decontaminating surface course in Sense-City.

5- Verification of gravel excavability and drainability.

résistance à l'arrachement, de la résistance au roulement que d'un point de vue acoustique (figure 3). Certaines de ces caractérisations sont directement issues de travaux de thèse menés dans le cadre du projet et ont fait l'objet de publications scientifiques.

Trois formules ont été retenues pour une application sur le manège de fatigue en comparaison d'un BBTM 0/6 de référence. Les enrobés ont été fabriqués et mis en œuvre fin septembre 2020. 200 000 cycles de chargement

pois-lourds ont été appliqués à ces couches de roulement entre octobre 2020 et janvier 2021. Ils ont permis de valider le bon comportement mécanique des enrobés phoniques testés. Par ailleurs, un procédé de dépollution innovant à base de ZnO a été étudié dans le cadre de la thèse de Marie Le Pivert soutenue le 16 octobre 2020. Afin d'évaluer les performances de dépollution des matériaux fonctionnalisés en conditions proches de la vie réelle, ces travaux de thèses ont donné lieu à des expérimentations dans Sense-City. Sense-City est un grand équipement de l'Université Gustave Eiffel sur le site de Marne La Vallée, couvrant une mini-ville de 400 m² et 3200 m³ avec des infrastructures urbaines, telles que des bâtiments, des routes et de la végétation (figure 4) et permettant d'avoir un contrôle sur différents paramètres environnementaux tels la température, l'humidité et l'ensoleillement.

PROJET CUD-SF

Le projet CUD-SF vise à développer et industrialiser une chaussée urbaine à base de dalles de béton préfabriquées qui soit facilement démontable et





6- Construction du plot de CUD-SF sur le manège de fatigue.

7- Marquage luminescent appliqués dans Sense-City.

8- LuminoKrom® sur la RN2, site de certification des peintures routière.

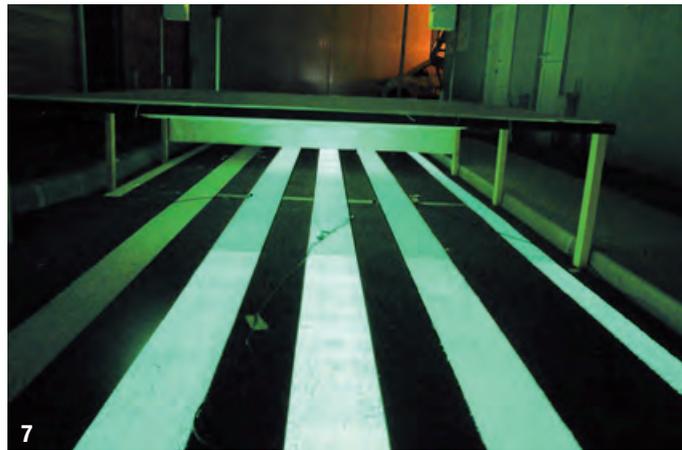
9- LuminoKrom® sur la piste cyclable de Pessac.

6- Construction of the CUD-SF section on the fatigue test facility.

7- Luminescent marking applied in Sense-City.

8- LuminoKrom® on the RN2, road paint certification site.

9- LuminoKrom® on the Pessac cycle track.



remontable pour permettre un accès rapide aux réseaux sous-jacents (gaz, eau, ...) et ainsi faciliter les interventions de maintenance de ces réseaux et accélérer la remise en service de la chaussée.

Des fonctions supplémentaires de surface sont recherchées pour améliorer l'intégration urbaine de ces chaussées : le drainage de l'eau de pluie, une bonne adhérence, la minimisation du bruit lié au trafic urbain mais également l'intégration de granulats de béton recyclés afin d'augmenter l'intégration des CUD-SF dans l'économie circulaire. Afin que la plateforme de chaussée ait une portance suffisante vis-à-vis des dalles et du trafic tout en demeurant

facilement excavable et drainante, une formule originale de grave excavable poreuse a été spécifiquement mise au point en laboratoire (figure 5). Le dimensionnement vis-à-vis du trafic des dalles béton constituant le corps de la chaussée a été optimisé. Une planche d'essai a été réalisée sur le manège de fatigue en 2020, permettant de valider que les matériaux pouvaient être fabriqués et mis en œuvre à l'échelle industrielle. Cette planche a été construite sur le même anneau que les couches de roulement testées dans le projet I-STREET-Enrobés du Futur (figure 6). La structure a donc été soumise à 200 000 passages d'essieu. L'essai a confirmé le bon fonctionnement de la structure ainsi que sa durabilité mécanique. L'essai a également permis de valider que la pérennité de la chaussée est maintenue sous trafic avec très peu d'épaufrures sur les bords de dalles et très peu d'arrachements de gravillons sur la surface poreuse des dalles. Un suivi des propriétés d'adhérence tout au long de l'essai a montré un bon comportement du plot. Enfin, l'écoute régulière de l'essai a montré de façon qualitative que la présence des dalles ne générait pas de bruit de claquement au passage des roues.

PROJET SUSHIS

L'objet du projet SUSHIS (Solutions pour Une Signalisation Horizontale Innovante et plus Sûre) est d'apporter sur le marché des produits de marquage routier photoluminescents, commercialisés sous la marque LuminoKrom®. Ils contiennent des pigments qui se chargent naturellement sous la lumière du soleil (et des phares), et stockent cette lumière pour la réémettre au cours de la nuit sans aucune source d'alimentation électrique.

FIGURE 7 © UGE / EIFFAGE / OLIKROM - FIGURES 8 & 9 © OLIKROM / EIFFAGE

Les travaux ont porté sur :

- La formulation des produits : une durée de luminance de 10h minimum a été recherchée ;
- Leur mise en œuvre sur un certain nombre de démonstrateurs : la mise en œuvre est simple, avec le matériel traditionnel du domaine ;
- Leur caractérisation en laboratoire et in situ :
 - Conformément aux performances réglementaires et norme à satisfaire en termes de couleur, anti-glissement, visibilité de jour et rétro-réflexion,
 - Sur leurs performances en luminescence, en fonction de différents environnements, des mesures sur des pistes cyclables, cheminements piétons ou encore dans la plateforme d'essai Sense-city ont été réalisées (figure 7). Elles confirment la durabilité du produit, quelles que soient les conditions météorologiques ;
- Leur développement industriel : un scale-up permet la fabrication de lots d'une tonne. La certification ISO 9001 a été obtenue en avril 2021 ;
- L'homologation des produits LuminoKrom® pour un usage sur routes ouvertes. En avril 2021, OliKrom et son partenaire historique Eiffage étaient à nouveau présents sur la RN2 afin d'obtenir la certification haute performance sur les routes et autoroutes françaises (figure 8). Le top départ est prometteur, puisque l'ensemble des peintures photoluminescentes et enduits à froid LuminoKrom® a été déclaré conforme sur la phase de mise en œuvre.

Depuis la 1^{re} piste cyclable réalisée à Pessac en septembre 2018 (figure 9),



10
© UGE / EIFFAGE

les partenaires ont maintenant 3 ans de recul sur la durabilité de ces peintures et plus de 60 chantiers réalisés avec succès et ont fait leur preuve comme solution de balisage renforçant la sécurité de nuit. Par ailleurs lauréat du Comité Innovation Routes et Rues (CIRR) 2019, LuminoKrom® sera évalué dans le cadre d'une expérimentation dans le 49, selon différents scénarii en tant que solution compensatrice à l'extinction de l'éclairage public. En effet, LuminoKrom n'est pas une solution d'éclairage mais cette signalétique lumineuse permet de continuer à assurer la sécurité des déplacements nocturnes, tout en permettant de réduire la consommation de gaz à effets de serre, la pollution lumineuse et la facture d'énergie engendrées par l'éclairage public.

PROJET HERMES

HERMES consiste à développer une nouvelle offre de services intégrés, fondée sur la chaîne opérationnelle suivante :
→ Collecte massive de données d'exploitation et de maintenance des

10- Carotte d'enrobé extraite d'une chaussée intégrant un tapis Altaroad.

10- Asphalt core sample extracted from a pavement incorporating an Altaroad mat.

chaussées par mise en place de rubans de nano-capteurs autonomes au sein des interfaces de couches de chaussées (informant sur la déformation, la température, l'humidité). Ces travaux ont été menés en lien avec la start-up Altaroad. Ils ont porté tant sur le développement d'une solution intégrable dans la chaussée au moment de la mise en œuvre des enrobés (figure 10) que sur la partie collecte d'informations ;
→ Transfert de ces données vers des unités de bords de route (réseaux d'unités de calcul), positionnées sur

candélabres ou autres équipements de la route ;

- Intégration et traitement des données en open data par mise en œuvre d'un agrégateur numérique conçu pour être interopérable avec les autres capteurs et données du marché (d'aujourd'hui et de demain) ;
- Valorisation et synthèse des données collectées grâce à une plateforme logicielle multimodale et ergonomique (gestion associée du patrimoine éclairage et voirie) ouverte elle aussi sur les données des autres capteurs positionnés le long des routes.

Une chaîne telle que décrite ci-dessus a pu être déployée et testée à l'occasion de l'expérimentation sur le manège de fatigue. Des tapis de capteurs ont donc été intégrés dans la chaussée du manège. Différents capteurs commerciaux ont permis l'acquisition de données de sources hétérogènes et une unité de bord de route a spécifiquement été conçue pour collecter et traiter ces données. Leur analyse en vue de leur valorisation est actuellement en cours.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le projet I-STREET a permis des avancées significatives dans la recherche et le développement de produits et procédés routiers ambitieux. Les produits de marquages routiers LuminoKrom® sont d'ores et déjà commercialisés à l'échelle industrielle. Les autres solutions ont pu être testées du laboratoire jusqu'au niveau prototype. Une expérimentation sur le manège de fatigue en 2020/2021 a permis de faire la preuve de cette faisabilité. En 2022, l'ensemble des solutions devrait être testé sur des démonstrateurs en milieu opérationnel. □

ABSTRACT

PROGRESS ON THE "ROAD OF THE FUTURE" PROJECT, I-STREET

FLAVIEN GEISLER, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - FRANÇOIS OLARD, RECHERCHE & INNOVATION, EIFFAGE ROUTE - OLIVIER MOGLIA, TOTAL ENERGIES - JEAN-FRANÇOIS LETARD, OLIKROM - NICOLAS HAUTIERE, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

I-STREET is a collaborative R&D project started in 2017 and to be completed by end-2022. I-STREET consists of 5 sub-projects aimed at developing a cold supply chain for bitumens, functionalised wearing courses, dismountable urban pavements, photoluminescent road paints and, lastly, pavement monitoring solutions. This project is of strategic interest for each of the consortium's partners, but also for the French road industry as a whole. At the end of 2020, the project passed a major stage. Work on the fatigue test facility of Gustave Eiffel University in Nantes was able to demonstrate the technical feasibility of industrial scaling up of the solutions developed. □

LOS AVANCES DEL PROYECTO DE "CARRETERA DEL FUTURO" I-STREET

FLAVIEN GEISLER, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - FRANÇOIS OLARD, RECHERCHE & INNOVATION, EIFFAGE ROUTE - OLIVIER MOGLIA, TOTAL ENERGIES - JEAN-FRANÇOIS LETARD, OLIKROM - NICOLAS HAUTIERE, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

I-STREET es un proyecto de I+D colaborativa iniciado en 2017 y que concluirá a finales de 2022. I-STREET consta de 5 subproyectos para el desarrollo de una logística fría de los asfaltos, capas de rodamiento funcionalizadas, calzadas urbanas desmontables, pinturas viales fotoluminescentes y, finalmente, soluciones de monitoreo de las calzadas. Este proyecto reviste un interés estratégico para cada uno de los miembros del consorcio, pero también para el conjunto de la industria vial francés. A finales de 2020, el proyecto superó una etapa importante. Una obra en el carrusel de fatiga de la Universidad Gustave Eiffel, en Nantes, ha permitido demostrar la viabilidad técnica de un paso a escala industrial de las soluciones desarrolladas. □



BTP BANQUE

GRUPE CREDIT COOPERATIF

C'est le métier
qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

www.btp-banque.fr

Villes intelligentes
Infrastructures innovantes
Réseaux performants



Bienvenue dans un monde qui se construit autrement.

L'univers de la construction se transforme. SMABTP adapte ses solutions d'assurance pour mieux vous accompagner. Avançons ensemble.

Notre métier : assurer le vôtre.

www.groupe-sma.fr

SMABTP – Société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics.
Société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances
RCS PARIS 775 684 764 – 8 rue Louis Armand – CS 71201 – 75738 PARIS CEDEX 15



SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

**1^{er} assureur
de la construction**