

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

SOLS ET FONDATIONS. PARKING SOUTERRAIN FOCH A SAINT-JEAN-DE-LUZ. RUTA 40 - STABILISATION DES TALUS ROCHEUX DE MELGAR - COLOMBIE. COMPLEXE SPORTIF HUNEBELLE A CLAMART. LE LYCEE FENELON A PARIS VI^e. RC² : REGENERATION CATENAIRE DU RER C. LIGNE 18 DU GRAND PARIS EXPRESS - GARE MASSY-PALaiseAU. PERTES DE TENSION DANS LES TIRANTS - BRESIL. A64 : MICROPIEUX POUR FRANCHIR UNE ZONE COMPRESSIBLE A URT

N°990 OCTOBRE 2023



LE FLYSCH, SUBSTRATUM ROCHEUX DE LA CÔTE BASQUE
© SOLETANCHE BACHY





GLOBAL INGÉNIERIE

La solution pour garantir l'ensemble de vos responsabilités professionnelles

BET, économistes, ingénieurs de la construction,
assurez votre expertise !

Toutes nos solutions d'assurance sur www.auxiliaire.fr



L'Auxiliaire BTP
L'assurance toujours à votre hauteur



Directeur de la publication
Alain Grizaud**Directeur délégué**
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fntp.fr**Comité de rédaction**Jean-Bernard Detry (Setec),
Denis Etienne (Bouygues),
Philippe Gotteland (Fntp),
Ziad Hajar (Systra),
Florent Imbert (Razel-Bec),
Nicolas Law de Lauriston (Vinci),
Romain Léonard (Demathieu Bard),
Claude Le Quéré (Egis),
François Louvel (Spie Batignolles),
Véronique Mauvisseau (Ingerop),
Stéphane Monleau (Soletanche Bachy),
Laetitia Pavel (Arcadis),
Claude Servant (Eiffage),
Nastaran Vivan (Artelia),
Michel Morgenthaler (Fntp)**Ont collaboré à ce numéro****Rédaction**
Sophie Le Renard (actualités),
Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente****TBS GROUP**
Service Abonnement Revue Travaux
20 rue Rouget de Lisle
92130 Issy les Moulineaux
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.frFrance (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.comLa 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 GÉOTECHNIQUE POUR LES NULS



© DR

Dans la lignée de tous ces "dictionnaires" qui ont été publiés ces derniers temps pour diffuser les connaissances sur divers sujets auprès du plus grand nombre, il serait pertinent d'en éditer un sur la géotechnique, car elle concerne tout un chacun et pourtant peu nombreux sont ceux qui savent ce qu'elle est et ce qu'elle leur apporte.

Appelée autrefois "mécanique des sols", terme estimé trop réducteur par les grands spécialistes, la géotechnique est avant tout une "discipline" qui a pour but de permettre à l'être humain d'aménager son environnement tridimensionnel pour améliorer ses conditions de vie. Ainsi elle est proche de deux autres disciplines qui prennent soin de lui : la médecine et la cuisine. Comme elles deux, elle est complexe et allie étroitement la théorie et la pratique. S'appuyant sur la mécanique des sols et des roches, la géologie, l'hydrogéologie, la rhéologie des matériaux, la géophysique, la dynamique des sols, la géochimie, elle est indispensable pour réaliser les ouvrages géotechniques qui assurent le transfert des interactions entre chaque ouvrage projeté et le terrain dans lequel il s'insère.

La complexité de la géotechnique réside en particulier dans le fait qu'elle intègre à la fois la théorie sur le comportement des terrains, les investigations possibles pour connaître leurs caractéristiques, les techniques et procédés de construction qui ont fait leur preuve, les matériels disponibles et le management

des risques liés aux incertitudes résiduelles sur la connaissance des propriétés des terrains mobilisés. Cette complexité valorise les retours d'expérience et permet à celui qui la pratique de progresser en permanence. La géotechnique enseigne la modestie et l'humilité, mais reste très attractive car l'amélioration des connaissances est permanente comme je peux en témoigner après 58 années de pratique.

Comme monsieur Jourdain faisait de la prose sans le savoir, chacun d'entre nous fait de la géotechnique depuis son enfance sans forcément en être conscient : qui n'a pas fait des châteaux de sable, bâti des circuits sur le sol pour faire rouler ses voitures miniatures, construit une cabane enterrée pour se réunir entre copains ? Ainsi tous les acteurs de la construction devraient être suffisamment sensibilisés pour donner à la géotechnique la place qu'elle doit occuper dans chaque projet. Elle doit orienter les choix constructifs dès les premières étapes de la conception et accompagner les travaux de réalisation afin de permettre une forte réactivité en cas de rencontre de difficultés liés à des comportements de terrains non anticipés.

Dans le contexte actuel du virtuel, avec en particulier les réunions dématérialisées et l'intelligence artificielle, la géotechnique reste une discipline du concret : chaque projet est un prototype au minimum sous l'angle de l'interaction sols-structures et nécessite des interventions sur site. Elle permet de relever le défi du développement durable en optimisant l'insertion du projet dans son site. En synthèse, la géotechnique étudie les terrains pour réaliser la partie enterrée d'une construction, un aménagement de surface ou pour exploiter les matériaux ou les eaux souterraines. Elle contribue à la prévention des risques naturels et à la préservation de l'environnement. Avec de tels atouts, la géotechnique doit attirer la jeune génération en illustrant la forte pensée de Confucius : « Choisissez un travail que vous aimez et vous n'aurez pas à travailler un seul jour de votre vie. » Il n'y a donc pas d'âge légal de départ à la retraite.

JACQUES ROBERTEXPERT EN INTERACTIONS SOLS-STRUCTURES
ANCIEN PRÉSIDENT DU COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE (CFMS)

SOLS & FONDATIONS

PARKING SOUTERRAIN FOCH A SAINT-JEAN-DE-LUZ © CÉDRIC HELSLY



04 ALBUM

06 ACTUALITÉ



18

ENTRETIEN AVEC SAMUEL HEUMEZ
CEREMA -
« NOTRE PRIORITÉ : ADAPTER NOS INFRASTRUCTURES AU CLIMAT DE DEMAIN »

26 SEISTER -
PRÉVENIR L'ALÉA SISMIQUE ET LE GÉRER

36

PARKING SOUTERRAIN FOCH À SAINT-JEAN-DE-LUZ
Le Twinsoil® s'attaque au flysch de la côte basque

44

RUTA 40 - BOGOTA GIRARDOT - COLOMBIE
La stabilisation des talus rocheux de Melgar

52

COMPLEXE SPORTIF HUNEBELLE À CLAMART (92)
Un puzzle 3D intégré dans la colline

58

LE LYCÉE FÉNELON À PARIS VI®
Le BTP au service des désordres des bâtiments patrimoniaux

64

RC² : RÉGÉNÉRATION CATÉNAIRE DU RER C
Réalisation de minipieux de fondation des futurs poteaux caténaux

70

LIGNE 18 GRAND PARIS EXPRESS
Gare Massy-Palaiseau - Le chantier au milieu du faisceau ferroviaire

78

PERTES DE TENSION DANS LES TIRANTS
Sud-est du Brésil

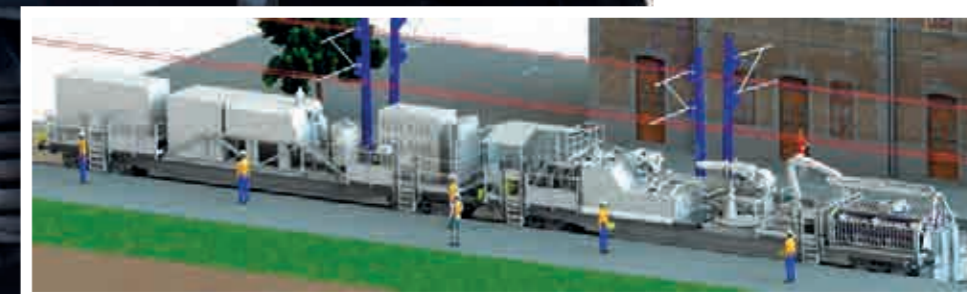
86

AUTOROUTE A64
Des micropieux pour franchir une zone compressible à Urt (64)

FONDATEMENTS DE LA CATÉNAIRE DU RER C DES TRAINS TRAVAUX BREVETÉS POUR RÉSOUDRE LA QUADRATURE DU CERCLE

Soletanche Bachy Fondations

Spéciales a obtenu, en proposant une variante innovante, le marché des fondations de la rénovation de la caténaire sur la partie Sud du RER C réalisée par le consortium d'entreprises ferroviaires RC². Deux ans ont été nécessaires pour concevoir et réaliser en interne les trains travaux qui satisfont aux multiples sujétions spécifiques du projet : plages horaires très réduites, travail de nuit, encombrement des réseaux, précision de l'implantation, dimensionnement sur mesure de chaque fondation, forage à travers des matériaux et obstacles variés, non pollution du ballast, etc. Le forage a été réalisé par la méthode Hi'Drill. L'ensemble du dispositif a été breveté. (Voir article page 64).



© SOLETANCHE BACHY FRANCE

© CEDRIC HELSLEY

35 M€ SUPPLÉMENTAIRES POUR LES OUVRAGES D'ART COMMUNAUX



Sospel (06) fait partie ses 32 000 communes françaises éligibles au Programme national ponts.

Pour endiguer la forte dégradation des ouvrages d'art à l'échelle des communes, l'État va mobiliser 35 M€ supplémentaires pour accompagner les collectivités dans la réalisation travaux de remise en état de leurs ponts. Cela fait suite au recensement engagé dans le cadre du Programme national ponts 1 et 2, pour 50 M€ au total. Pour les professionnels de ce secteur, les moyens déployés sont insuffisants au regard des besoins.

La dégradation des ouvrages d'art n'est plus à démontrer. Selon le récent rapport du Sénat, 35 000 ponts communaux sont en mauvais état. À la suite du recensement des ouvrages communaux engagés dans le cadre du Programme national ponts 1 et 2 (pour 50 M€ au total), les ministres de la Transition écologique et des Transports ont annoncé, le 19 septembre 2023, une mobilisation de 35 M€ supplémentaires pour accompagner les collectivités à réaliser les travaux

de remise en état de leurs ouvrages communaux les plus dégradés et notamment ceux présentant un enjeu majeur de sécurité des usagers et de continuité des dessertes locales.

→ 32 000 communes éligibles

En complément d'un appui au financement des travaux, cette enveloppe intègre également des actions ponctuelles d'accompagnement des collectivités locales par le Cerema, de la remise du carnet de santé des ouvrages au

lancement des travaux. Près de 32 000 communes sont éligibles au Programme national ponts travaux qui subventionnent jusqu'à 60 % des projets, soit un montant d'aides compris entre 5 000 € HT et 500 000 € HT. Ainsi pourront être financés des études techniques et réglementaires (inspections spécifiques, sondages, dossier loi sur l'eau, études techniques, dossier de consultation des entreprises) ainsi que les travaux de démolition et de reconstruction d'ouvrages, des grosses

réparations, des actions de confortement et de restauration ainsi que les dépenses liées aux coûts de maîtrise d'œuvre. Le montant prévisionnel des travaux doit être supérieur ou égal à 40 000 € HT. Le porteur de projet est soit la commune propriétaire de l'ouvrage, soit l'Établissement public de coopération intercommunale (EPCI) auquel elle est rattachée.

→ Une goutte d'eau

L'ouvrage de franchissement doit présenter une ouverture supérieure ou égale à 2 mètres. Pour être éligible à ce dispositif, les ponts doivent avoir fait l'objet d'un recensement (soit par le Cerema, soit par tout autre professionnel), d'un diagnostic préalable, ainsi que d'un programme de travaux précis. « 35 M€ de crédits d'État dédiés aux travaux sur les ponts. Telle est l'annonce des ministres de l'écologie, des collectivités territoriales et des transports du début de semaine. C'est certes un encouragement pour les communes si l'on regarde le verre à moitié plein, mais si l'on reprend le chiffres du Sénat de 35 000 ponts malades, cela fait 1 000 euros par pont. C'est une goutte d'eau, sachant que nous estimons qu'un premier investissement minimum de 350 M€ est nécessaire pour faire face à l'urgence de la situation, » a réagi Lionel Lobet, président du syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et de renforcement des structures (Strres). Les collectivités concernées peuvent faire parvenir depuis le mois septembre, leurs demandes de financement "au fil de l'eau" depuis le site initié par l'État, Démarches simplifiées. Ce dispositif s'arrêtera en août 2025. ■

DERNIER MARCHÉ DE CREUSEMENT ATTRIBUÉ POUR LA LIGNE PARIS-TURIN

Le marché qui concerne le creusement de la ligne Paris-Turin côté italien, vient d'être attribué à un groupement comprenant Spie Batignolles et Itinera (mandataire) et Ghella deux entreprises transalpines dans le cadre d'un contrat de 1,1 Md€. Pour le tronçon du tunnel côté français, le marché avait lui déjà été attribué à l'été 2021. Les travaux d'excavation du tunnel ferroviaire se déroulent sur une distance totale de 57,5 km sous les Alpes. Pour la partie italienne, les entreprises lauréates vont creuser 28,5 km qui comprennent un tunnel de

base et la galerie Maddalena 2 d'où descendront les tunneliers, les galeries de connexion et les rameaux de communication entre les deux tubes. Le chantier sera implanté dans le Val de Suse, dans le Piémont, à partir du chantier déjà actif de la Maddalena à Chiomonte, par une équipe de presque 700 personnes. Les travaux sont prévus pour durer sur 91 mois. À la fin des travaux, 2,3 millions de mètres cubes de roche auront été extraits, dont « jusqu'à 60 % seront réutilisés, » affirme le maître d'ouvrage Telt. ■



Vue panoramique du site de la Maddalena, à Chiomonte (Piémont), base du chantier de creusement côté italien.



**ESPACE REPAS
INDISPENSABLE**

**Dans le BTP, l'hygiène
c'est notre chantier !**

Agissons ! À chaque chantier sa solution. Rendez-vous sur

HYGIENEBTP.fr



FORMATION INÉDITE DE FOREURS EN GÉOTHERMIE DE SURFACE

Métier en tension, la géothermie est une des solutions dans le cadre de la diversification des énergies renouvelables. Dans cette optique, l'École Française de forage (EFF Training), en collaboration avec le Greta- CFA Midi-Pyrénées Ouest et le bureau de recherches géologiques et minières, lancent une première formation de foreurs en géothermie de surface. Elle abordera les aspects techniques mais également les obligations réglementaires, la sécurité au travail et les normes environnementales. Elle est à la fois prévue pour les professionnels en poste ainsi que dans le cadre de l'insertion professionnelle des demandeurs d'emploi.

DES BORNES ÉLECTRIQUES ÉVÉNEMENTIELLES POUR LES JO ET AU-DELÀ

Pour connecter au réseau certains sites temporaires des Jeux, Paris 2024, fait appel à Enedis pour le déploiement des bornes électriques événementielles. Installées sous la chaussée et rétractables, elles permettent des branchements temporaires, rapides et de forte puissance. Ces bornes resteront après les JO pour profiter à d'autres événements. Par ailleurs, un appel à manifestation d'intérêt a été lancé à destination de 300 collectivités qui pourraient voir cette technologie installée sur leur territoire. Porté par l'Ademe ce dispositif pour le compte de l'État, et celui d'Enedis, prévoit une prise en charge de 60% du coût total du matériel et du raccordement.

UN FOND BLEU POUR ENDIGUER LA CRISE DE L'EAU



Pose de canalisations enterrées pour l'eau potable.

Malgré le plan de mars 2023 et les 1500 M€ additionnels annoncés par Elisabeth Borne en septembre dernier, pour une meilleure gestion de l'eau, le syndicat professionnel représentant l'ensemble de la filière industrielle des fabricants du transport de l'eau potable et de l'assainissement (ITEA) tire la sonnette d'alarme sur une crise de l'eau qui est une évidence. « Il y a un déficit de 2,7 Mds€ d'investissement en matière de réseaux d'eaux et d'assainissement. Le taux de renouvellement des tuyaux est de 0,6% soit une période de 150 ans avant que les infrastructures soient changées ! Et les 20% de taux de fuite très souvent mis en avant ne concernent que les collectivités qui communiquent sur les

chiffres, d'où une sous-évaluation certaine, » déplore Anaud Treguer, président d'ITEA qui ne se lasse pas répéter que l'eau « est un bien unique et fondamental et pourtant 600 communes en 2022 ont manqué d'eau. » À l'image du fond vert, l'organisation professionnelle milite pour un fond bleu, soit la mobilisation de moyens dédiés sur le long terme, car les projets mettent beaucoup de temps à se réaliser.

→ Besoin d'ingénierie

Ce fond bleu pourrait permettre de soutenir des projets très concrets favorisant l'entretien et le renouvellement du patrimoine de l'eau, ou encore la mise en place de systèmes de réutilisation des eaux non conventionnels et de récupéra-

tion de l'eau de pluie. « Mais au-delà des questions d'investissements financiers, nous avons aussi besoin d'ingénierie, en particulier pour les territoires ruraux. Les départements semblent une bonne échelle pour initier et porter des projets. Il faut une maîtrise d'ouvrage suffisamment forte pour que ceux-ci aboutissent, » souligne Anaud Treguer, qui met aussi en garde sur le risque de vétusté qui peut empêcher, à termes la croissance économique du pays. « L'enjeu est aussi de développer une filière française d'excellence qui pourrait servir aux Travaux publics et aux équipementiers. Car selon l'OCDE, 1€ investi dans la ressource en eau, cela aboutit à 3€ de plus dans l'économie du pays. » ■

5 FÉDÉRATIONS DU BTP S'ALLIENT POUR UNE DÉCARBONATION DES ENGINES DE CHANTIER

Cinq fédérations dans le secteur du bâtiment et des travaux publics (DLR, EVOLIS, FFB, SEIMAT ainsi que la FNTP), ont souhaité unir leurs efforts pour aborder la question de la décarbonation des matériels et engins de l'industrie de la construction. Face à cette filière qui représente 25% de l'empreinte carbone nationale, les organisations professionnelles considèrent que « pour atteindre la neutralité carbone, il n'y a donc ni solution, ni technologie miracle ! ». Alors que 90% des engins de chantier fonctionnent

encore au gasoil, elles pointent deux actions prioritaires.

→ Biocarburant de synthèse

Premièrement, elles souhaitent favoriser l'achat de matériels et d'engins utilisant les énergies non fossiles, soit à batteries électriques, soit à pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène, par une subvention directe de 40% de l'investissement, accessible à tous les acteurs. La seconde proposition concerne l'utilisation dans des proportions croissantes de biocarburant de synthèse (HVO/XTL3) qui

permettent une décarbonation de 90% par rapport au diesel. Il peut être produit à partir de déchets telles que les huiles végétales. Pour cela le corpus réglementaire doit évoluer pour tenir compte des spécificités des chantiers de construction (arrêté du 19 janvier 2016). L'utilisation de l'hydrogène ou de l'électricité à forte puissance peuvent être aussi envisagée, mais « en raison des contraintes particulières des chantiers, ces solutions alternatives ne sont pas viables à horizon prévisible, » préviennent les fédérations. ■



> Essais sur tirants de barrage - détermination de la force de tension



> Contrôle Non Destructif de colonnes de jet grouting



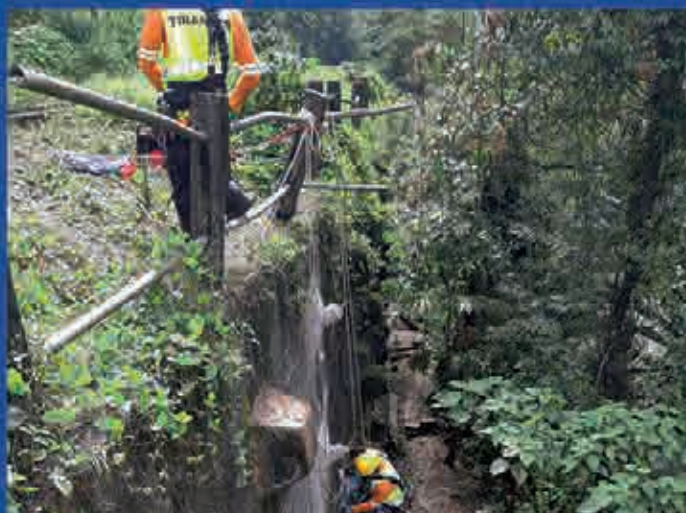
> Essais à l'arbalète - Pont - Espagne



> Essais à la dynaplaque type II



> Suivi de battage de tubes métalliques



> Essais non destructifs sur tirants Brésil



> Contrôle de compactage des remblais



> Essais statiques de traction sur tirants

> Les agences Rincenc Laboratoires répondent aux sollicitations techniques en s'appuyant sur les entités spécialisées qui apportent leur savoir-faire.

CONCOURS MED'INNOVANT

L'Établissement Public d'Aménagement Euro-méditerranée souhaite encourager les jeunes entreprises impliquées dans l'aménagement du territoire. Startups, TPE et PME locales sont appelées à répondre aux problématiques de développement urbain et de durabilité de territoires méditerranéens comme Marseille. Euroméditerranée a lancé un appel à candidatures à destination de ces acteurs économiques qui doivent répondre à cinq défis selon leurs compétences et secteurs d'intervention.

→ Réutilisation des eaux grises et noires

Dans les sujets abordés, on peut noter la réutilisation des eaux grises et noires au service des espaces verts, sur l'intégration de la biodiversité à plusieurs échelles (le logement, le bâtiment, le quartier et la ville), ou encore le développement des mobilités décarbonées pour les activités des artisans et des commerçants. Pour cette édition 2023, les candidats avaient jusqu'à fin septembre pour répondre.

Saint-Gobain Distribution Bâtiment France, Engie, Eiffage ou encore le promoteur Redman sont les parrains des lauréats, et les accompagneront dans la réalisation de leur défi. Ils compléteront aussi la dotation globale de 50 000 € pour les cinq équipes qui bénéficieront également pendant un an de l'écosystème d'Euroméditerranée. Ce concours existe depuis 2010 et plus d'une cinquantaine de startups lauréates ont ainsi eu l'opportunité d'accélérer leur développement.

BESOINS D'INVESTISSEMENTS MASSIFS POUR LE RÉSEAU FERROVIAIRE

L'Autorité de régulation des transports (ART) a publié en juillet 2023, une étude dans laquelle est exploré l'avenir du réseau ferroviaire en fonction de deux scénarios d'investissement. Le premier appelé « tendanciel » est déjà sur les rails car il correspond à la trajectoire des dépenses d'investissements telle que prévue par l'actuel contrat de performance. Cela représente 136 Mds€ pour la période 2022-2042, dont 50 Mds€ pour la modernisation du réseau. Le second scénario de « transition écologique » affiche des ambitions plus importantes, avec une augmentation des investissements de 50 % soit 204 Mds€ dont 98 Mds€ pour le renouvellement du réseau. L'ART insiste sur l'intérêt que

représente en termes de trafic et de coûts d'exploitation un investissement de ce type.

→ Diminuer les coûts d'exploitation

Cela représenterait une augmentation de 36 % des trains d'ici 2042, compatible avec l'objectif de doublement de la part modale du fret et des circulations voyageurs. A contrario, l'autre scénario conduirait « à un vieillissement et à une baisse de performance du réseau et à des pertes de trafics, incompatibles avec les ambitions de développement du mode ferroviaire pour accompagner les objectifs de décarbonation des transports. » De plus, seul l'investissement le plus important permettrait de diminuer significativement et durablement les

coûts d'exploitation durant la période, pour atteindre une baisse de près de 40 % à horizon de vingt ans. Mais quel que soit le scénario envisagé, il ne pourra y avoir d'autofinancement des investissements sur le réseau. Le besoin de financement serait de 7 Mds€/an en moyenne dans le scénario "tendanciel" et de 10 Mds€/an en moyenne dans le scénario "transition écologique". La mise en œuvre de l'un ou l'autre des scénarios nécessite l'élaboration d'un document de planification unique, détaillé et transparent, régulièrement actualisé. L'ART pourrait assurer un suivi étroit des investissements du gestionnaire d'infrastructures, en annexe du contrat de performance conclu entre l'État et SNCF Réseau. ■

CONSULTATION NATIONALE SUR L'ÉCLAIRAGE PUBLIC



Exemple d'éclairage public solaire à Escource (40).

Le gouvernement a lancé une consultation nationale pour connaître l'avis de la population sur l'éclairage public. Elle s'est déroulée entre la mi-juillet et la mi-septembre. Les conclusions doivent intervenir avant la fin de l'année. L'objectif est de réduire la consommation d'énergie, premier poste de dépenses des communes, mais aussi de lutter contre la pollution lumineuse qui nuit à la biodiversité, en particulier aux insectes.

« Faut-il baisser l'intensité de l'éclairage public pendant la nuit ? Est-ce qu'il faut même peut-être l'éteindre sous certaines conditions ? Et puis l'éclairage des vitrines, est-ce que 1 h du matin, c'est la bonne heure pour éteindre les vitrines ? Est-ce qu'il faut le faire un peu plus tôt, et comment mieux faire respecter, à leur avis, ces préconisations, » a détaillé Agnès Pannier-Runacher, ministre de la transition énergétique.

Cette consultation intervient alors que le gouvernement a déjà pris à l'automne 2022 un décret généralisant l'extinction des lumières des magasins et des publicités lumineuses entre 1 h et 6 h du matin.

Les exploitants de gares, stations de métro et aéroports se sont aussi engagés, sous l'égide de l'État, à éteindre fin 2023, les publicités lumineuses quand ces lieux sont fermés au public. ■

LE GROUPE D'INGÉNIERIE ARTELIA S'IMPLANTE AU CANADA



Déconstruction du pont Champlain, à Montréal, dont l'ingénierie a été attribuée à FNX-INNOV.

Implanté en Europe et Asie Pacifique, le groupe d'ingénierie Artelia sera désormais présent aussi au Canada. Il a acquis 100 % des actions de la société FNX-Innov, acteur majeur de l'ingénierie au Québec qui appartenait jusque-là à des fonds d'investissement québécois. Cette opération financière doit permettre à Artelia de développer son activité au Canada. Car FNX-INNOV est une des principales firmes d'ingénierie au Québec, disposant d'un ancrage territorial, avec 14 bureaux régionaux et des implantations en Ontario, à Terre-Neuve-et-Labrador et en Colombie Britannique. Son expertise concerne les infrastructures, l'énergie, l'environnement, les sciences de la terre, le traitement des eaux, le bâtiment et l'industrie et les télé-

communications. L'entreprise québécoise accompagne le ministère des Transports du Québec, la Ville de Montréal et les principales villes et municipalités au Québec, ainsi que des acteurs majeurs de l'énergie, tels qu'Hydro One en Ontario et Hydro Québec, dans tous leurs projets d'aménagement à l'Est du pays.

→ Des besoins exponentiels

Avec cette acquisition, 1 100 personnes ont rejoint le groupe Artelia qui compte désormais 8 500 collaborateurs. Cela permettra aussi au groupe d'ingénierie d'atteindre un chiffre d'affaires de 930 M€. Pour sa part, FNX-INNOV a réalisé un chiffre d'affaires de 97 M€ en 2022, et bénéficie d'une visibilité basée sur un carnet de commande de plus de 24 mois. Au Canada, les perspectives

de développement sont importantes car les besoins en matière d'infrastructures de transport, de production énergétique décarbonée, de gestion des ressources et d'aménagement urbain durable sont exponentiels. « En rejoignant Artelia, FNX-INNOV va pouvoir accélérer son développement et continuer à voir plus grand, tout en poursuivant à bien traduire notre ADN de "Redéfinir l'ingénierie sans aucune barrière". Pour nos collaborateurs, c'est également l'opportunité de construire un parcours professionnel motivant et de s'ouvrir d'autres horizons. Une nouvelle aventure commence et nous pouvons tous nous sentir fiers et confiants en l'avenir. » s'est réjoui Richard Hélie, chef de la direction de FNX-INNOV. ■

ACCORD PUBLIC PRIVÉ POUR LE DÉVELOPPEMENT DE PROJETS D'ÉOLIEN EN MER

L'entreprise BW Ideol, spécialisée dans l'éolien offshore, a conclu un accord avec l'Ademe Investissement, pour un financement de ses projets à hauteur de 40 M€. Intégré à France 2030 et piloté par le secrétariat général pour l'investissement, cette société est détenue à 100 % par l'État. Elle a pour but de financer en fonds propres des projets innovants d'infrastructures dans le domaine de la transition énergétique et écologique aux côtés d'acteurs privés. Dans le cadre de cet accord, BW Ideol

transférera son portefeuille à la société de développement de projets BW Ideol Projects Company SAS et ADEME Investissement y apportera 17,85 M€ dans le cadre d'un premier accord financier prévu en septembre 2023. Les injections de capital ultérieures se feront sur la base d'appels à financement de projets avec un cofinancement à parts égales entre BW Ideol et ADEME Investissement, jusqu'à ce que chaque société ait injecté 40 M€, dans BW Ideol Projects Company. ■



Parc éolien en mer, au large de Fécamp en cours d'installation.

EIFFAGE REMPORTE EN GROUPEMENT LE MARCHÉ DE CONSTRUCTION D'UN PONT SUR LE RHIN

Eiffage, au travers de SEH, la filiale allemande d'Eiffage Métal, vient de remporter en groupement (avec Max Boegl, Plauen Stahl Technologie, Zwickauer Sonderstahlbau et Hochtief Infrastructure) le marché pour la réalisation d'un nouveau pont sur le Rhin à Leverkusen en Allemagne, pour un montant global de 358 M€ dont 126 M€ pour Eiffage. Ce marché porte sur la construction d'un ouvrage d'art de 688 mètres de long sur le tracé de l'autoroute qui reliera Leverkusen à Cologne. Le futur pont à 2x4 voies vise à remplacer une structure en acier déjà existante, qui sera démolie par SEH.

→ 16 000 tonnes d'acier

La filiale d'Eiffage sera chargée de 25 % de la fabrication de la nouvelle structure métallique, de la protection anti-corrosion, des travaux d'assemblage pour la quantité totale d'acier ainsi que l'assemblage des câbles de l'ouvrage. Les éléments métalliques, qui totalisent plus de 16 000 tonnes d'acier, seront fabriqués en Allemagne et livrés par voie fluviale sur le Rhin.

Les travaux ont débuté en septembre 2023 pour une livraison prévue fin 2027. Ce nouveau contrat fait suite au projet remporté par les mêmes acteurs pour la réalisation du premier pont de Leverkusen dont la livraison est prévue en 2024. Ce second pont sera construit en parallèle de la première infrastructure. À terme, ces deux ouvrages d'art viendront remplacer le pont existant devenu sous-dimensionné.

LE GROUPEMENT MENÉ PAR NGE ENTAME LA RÉHABILITATION DU PONT DE GROLÉJAC

Dans le cadre des travaux de réhabilitation du pont de Groléjac, au cœur du Périgord noir, le groupement piloté par NGE, a procédé au lancement de la charpente métallique, en plein été 2023. Cette manœuvre délicate a été réalisée préalablement à la démolition de l'ouvrage existant. Ce procédé innovant, en amont de la phase de démolition, permettra la stabilisation de la structure existante pendant toutes les phases de déconstruction ainsi que l'évacuation des matériaux issus de la démolition, sans intervenir sur la rivière.

→ **Ouvrage existant vétuste**
En effet, l'objectif principal de ce procédé est de réhabiliter l'ouvrage sans intervenir sur la Dordogne afin de préserver la faune et la flore. Axe majeur dans le secteur qui permet de relier Groléjac, ville frontalière au département du Lot, à Sarlat-la-Canéda, ancienne ville médiévale réputée pour son tourisme, cet ouvrage d'art de 154 m en béton armé réalisé en 1932, était devenu trop vétuste. Le Conseil départemental de Dordogne a attribué, en juin 2022, le marché de conception-réalisation à un groupement d'entreprises composé des entités Lavigne et Cheron (architecte), Arcadis (concepteur et maître d'œuvre intégré), Matière, Avenir Déconstruction, Guintoli, NGE ingénierie et NGE GC (mandataire et pilote). Les travaux vont durer 11 mois.



Le pont de Groléjac en cours de rénovation.

© DÉPARTEMENT DE LA DORDOGNE

CHANTIER HORS-NORME POUR LE REMPLACEMENT DE DEUX PONTS, SUR LES LIGNES B ET C DU RER



© AURÈRE DOUDOUX

Pose et dépose du pont de Gallardon par une des plus grandes grues au niveau mondial.

Les lignes B et C du RER sont les plus fréquentées en Île-de-France, mais certains de leurs ouvrages d'art nécessitent des travaux importants. C'est le cas dans la commune de Massy (Essonne), entre les gares de Massy-Verrières et Massy-Palaiseau, où les deux ponts ferroviaires centenaires, le pont de Chartres (RER B) et le pont de Gallardon (RER C) vont être remplacés. Au mois de juillet 2023, ils ont fait l'objet d'une dépose. Démarré en 2020, ce chantier d'ampleur est mené conjointement par SNCF Réseau et la RATP, pour un montant global de 116 M€ financés sur fonds propres. SNCF Réseau, société anonyme du groupe SNCF, qui compte plus de 50 000 collaborateurs pour un chiffre d'affaires de près de 7,1 Mds€ en 2022, a mobilisé un groupement d'entreprises pour réaliser ce chantier hors-normes. La société Demathieu Bard est le mandataire de ce groupement qui comprend l'entreprise Berthold spécialisée dans les ouvrages d'art, Botte Fondations pour le génie civil, TSO pour la signalisation et Alstom pour les caténaires.

→ Pour des trains plus rapides, plus performants et plus capacitaires

L'opération de renouvellement de ces deux ponts, appelée "Chagall" (contraction de Chartres et Gallardon) doit permettre de renforcer la robustesse des circulations dans cette zone. Les voies, rails et traverses ont été pensés pour être posés sur du ballast afin d'amortir les vibrations et le bruit des circulations, offrant un gain acoustique aux riverains de cette zone très fréquentée. Ces infrastructures permettront d'ac-

cueillir de nouveaux trains plus rapides, plus performants et plus capacitaires, notamment sur le RER B à l'horizon 2025 avec l'arrivée des trains de type "M120". Les nouveaux ouvrages d'art sont bien plus massifs que les infrastructures anciennes, soit 1 375 tonnes pour le pont de Chartres et 950 tonnes pour celui de Gallardon contre 460 tonnes pour chacun des ouvrages actuels.

→ Grue spectaculaire

Ce chantier d'une grande technicité a nécessité l'intervention d'une des plus

grandes grues au niveau mondial. D'une hauteur de 100 mètres et d'un poids total dépassant les 4544 tonnes, elle a été acheminée en pièces détachées depuis l'Indonésie.

En 2022, la construction d'une paroi de soutènement et la pose de 22 pieux ont été nécessaires, sur le terrain sur lequel la grue a été posée.

Le montage de la grue a été réalisé en 6 semaines. Sa capacité de levage est de 1 600 tonnes. La circulation des RER B et C a été interrompue quelques semaines à l'été 2023. L'opération "Chagall" va se déployer jusqu'à la mi-2024, la grue spectaculaire a été démontée en septembre dernier. « Le renouvellement des ponts de Chartres et de Gallardon est une opération d'envergure exceptionnelle et une prouesse technique majeure. C'est une étape essentielle dans la modernisation du RER B qui contribuera à l'amélioration de la qualité de transport pour nos voyageurs. Chaque année, nous investissons massivement avec notre autorité organisatrice pour la modernisation et l'entretien des infrastructures en Île-de-France. En 2023, 2,2 milliards d'euros ont été injectés sur le réseau RATP, un effort qui sera encore amplifié dans les années à venir, » a déclaré Jean Castex, Président directeur général du groupe RATP. ■



Le nouveau pont de Chartres est une étape de la modernisation du RER B.

© GILBERT LASNE



Envie d'œuvrer avec nous pour
construire un monde durable ?
Rejoignez Ingérop !

Nous attendons votre CV, lettre de
motivation et région de prédilection.

NousRecrutons@ingerop.com

Depuis plus de 10 ans,
les collaborateurs d'Ingérop
participent à l'aménagement
du quartier Île Seguin - Rives de Seine.

Bâtiment • Eau • Énergie • Industrie • Infrastructure & Mobilité • Transport • Ville

PAR NUMÉRO : 15€ AU LIEU DE 25€

ÉNERGIE

975

MAINTENANCE DES INFRASTRUCTURES

976

TRAVAUX SOUTERRAINS

977

INTERNATIONAL

978

TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

979

OUVRAGES D'ART

980

SPÉCIAL JEUX DE PARIS 2024

981

SOLS ET FONDATIONS

982

SPÉCIAL BÉTONS DU FUTUR

983

VILLE ET PATRIMOINE

984

TRAVAUX SOUTERRAINS

985

INTERNATIONAL

986

TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

987

OUVRAGES D'ART

988

SPÉCIAL LIGNE À GRANDE VITESSE HS2

989

*Offre valable jusqu'au 31/12/23

BON DE COMMANDE ■ REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

À renvoyer à : TBS GROUP - Service Abonnement Revue TRAVAUX - 20 rue Rouget de Lisle - 92130 Issy les Moulineaux
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22 - Fax : +33 (0)1 40 94 22 32 - Email : revue-travaux@cometcom.fr

JE COMMANDE LES NUMÉROS SUIVANTS (cochez les cases de votre choix en indiquant le nombre d'exemplaires) :

- | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 975 x | <input type="checkbox"/> 980 x | <input type="checkbox"/> 985 x |
| <input type="checkbox"/> 976 x | <input type="checkbox"/> 981 x | <input type="checkbox"/> 986 x |
| <input type="checkbox"/> 977 x | <input type="checkbox"/> 982 x | <input type="checkbox"/> 987 x |
| <input type="checkbox"/> 978 x | <input type="checkbox"/> 983 x | <input type="checkbox"/> 988 x |
| <input type="checkbox"/> 979 x | <input type="checkbox"/> 984 x | <input type="checkbox"/> 989 x |

Soit un montant total de :
_____ numéros x 15 € = _____ €

(Pour une commande de plus de 20 numéros le prix passe de 15 € à 13 € l'unité)

*Offre valable jusqu'au 31/12/23 et hors frais postaux (exemple pour un numéro : 5,00€ d'envoi France, 10,00€ d'envoi Europe et 12,50€ d'envoi étranger hors Europe). Conformément à la Loi « Informatique et des libertés » du 06/01/78, le droit d'accès et de rectification des données concernant les abonnés pour s'assurer auprès du service abonnements. Ces données peuvent être communiquées à des organismes tiers. Si vous ne le souhaitez pas, veuillez cocher cette case.

JE VOUS INDIQUE MES COORDONNÉES :

Nom _____ Prénom _____
 Entreprise _____ Fonction _____
 Adresse _____
 Code postal [] [] [] [] [] [] Ville _____
 Tél. : _____ Fax : _____
 Email : _____ Merci de ne pas communiquer mon adresse mail

Je joins mon règlement d'un montant de _____ € TTC par Chèque à l'ordre de COM'1 ÉVIDENCE

ATTENTION : tous les règlements doivent être libellés exclusivement à l'ordre de COM'1 ÉVIDENCE

- Je réglerai à réception de la facture
 Je souhaite recevoir une facture acquittée

Date, signature et cachet de l'entreprise obligatoire

UNE INNOVATION POUR DES RÉSEAUX D'EAU PLUS PERFORMANTS

Afin d'effectuer un diagnostic pour identifier les dysfonctionnements des réseaux d'eaux, les collectivités doivent mettre en œuvre des points de mesure dans les canalisations. Cette manœuvre s'avère souvent laborieuse. Pour que ce processus soit plus simple, rapide et sûr, Wavin France, entreprise spécialisée dans la conception, la fabrication et la commercialisation de fournitures de systèmes de canalisations en matière plastique, a conçu un nouveau système de mesure à l'aide de capteurs. Facile à installer, il s'adapte aux regards d'inspection "Wavin Tegra". Ces nouveaux seuils de mesure facilitent ainsi les campagnes pour évaluer les débits et valider ainsi la performance du réseau.



Wavin a conçu un nouveau système de mesure à l'aide de capteurs, qui facilite les campagnes d'évaluation des débits pour valider la performance du réseau.



Facile à installer, sans aucun perçage, ni modification à réaliser à l'intérieur du regard, cette innovation est vendue sous forme de kits préfabriqués.

→ Une installation 5 fois plus rapide

Ces kits préfabriqués comprennent un support de capteur, un support de seuil, 1 seuil triangulaire, 1 seuil rectangulaire, 1 lest, 1 canne, 1 boîte de joint de 7,5 m et 1 boîte d'embouts. L'installation du seuil de mesure est 5 fois plus rapide que les solutions traditionnelles. Aucun perçage ni modification n'est à réaliser à l'intérieur du regard car les kits ont été conçus sur mesure pour les regards d'inspection. Une visseuse suffit pour assembler le support de capteur et les cannes permettent ensuite de manœuvrer les différents éléments en toute sécurité depuis la surface. Cette innovation, issue de l'expertise Wavin permet des réseaux performants, une aide précieuse pour les collectivités et les bureaux d'études qui interviennent sur les réseaux d'assainissement des eaux usées. ■

UNE TECHNOLOGIE AMÉLIORE L'INFORMATION SUR LA CIRCULATION EN ÎLE-DE-FRANCE

L'acteur allemand de la gestion de données en temps réel, PTV Group, va déployer sa technologie pour améliorer le trafic en Île-de-France. Il a été retenu lors d'un appel d'offre lancé par la Direction des routes d'Île-de-France (DIRIF). Le marché consiste en la fourniture de données de vitesse en temps réel, issue de la Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites (GNSS) des véhicules. Ce système de positionnement par satellites vient compléter et enrichir les

données liées au trafic dont dispose déjà la DIRIF grâce à ses propres équipements de mesure et qui sont diffusés sur la plateforme Sytaadin.fr. Les usagers de la route peuvent ainsi être informés sur les conditions de circulation actuelles, les zones de bouchons et les fermetures de route sur l'ensemble de la région francilienne. L'Île-de-France comprend un réseau routier de 1 300 km emprunté quotidiennement par plus de 4 millions d'usagers en moyenne. « Chaque jour,

plus de 100 000 personnes consultent les informations trafic sur le portail [Sytaadin](http://Sytaadin.fr). Nous sommes ravis d'accompagner la DIRIF et de contribuer à la sécurité des usagers et de leur permettre de se déplacer sereinement. Des données précises permettent non seulement de réduire les retards et de renforcer la sécurité, mais aussi d'améliorer l'efficacité globale du système de transport, » a déclaré Frédéric Reutenauer, Vice President Southern Europe de PTV Group. ■

UN MANIPULATEUR DE CHARGES CONÇU POUR LIMITER LES TROUBLES MUSCULO-SQUELETTIQUES DES OPÉRATEURS

Pour opérer le levage, le déplacement, le stockage ou la mise sur palette de planches et de poutres en bois, Dalmec a développé une nouvelle version de son manipulateur pour annihiler les troubles musculo-squelettiques des opérateurs. Cet équipement est destiné aux secteurs du bois, du BTP, de la menuiserie et de la distribution de matériaux de construction. Il comprend un dispositif de préhension réglable à ventouses, adapté pour favoriser la manutention de planches et de poutres en bois lourdes et encombrantes et aux dimensions, formes et poids variables. Le poids du bois à transporter est ainsi annulé. Ce système est équipé de 9 à 15 ventouses qui sont utilisées intégralement ou en partie selon la taille de la pièce à manipuler.

→ Gain de sécurité

Ce manipulateur dénommé Partner Equo permet donc une saisie des planches et des poutres en bois de manière équilibrée, les maintenant en position horizontale. Il a été conçu pour les manipulations répétitives et minutieuses en offrant un rayon d'action important jusqu'à 3 500 mm pour soulever au maximum 100 Kg. Les opérateurs peuvent déplacer la charge, sans aucun effort et dans des conditions optimales d'ergonomie et de sécurité. Les conditions de travail sont ainsi améliorées, avec un gain de sécurité pour les opérateurs mais aussi productivité pour l'entreprise.



Dispositif pour faciliter la manipulation de tous types de structures en bois.

NOUVELLE FORMULE POUR UNE PEINTURE DE TRAÇAGE

ITW Spraytec sort une nouvelle version de sa peinture de traçage, de signalisation et de marquage HD au sol pour la délimitation et la signalisation des voies de circulation ou des zones dangereuses.

Cette formule actualisée de TraitVite® Précision permet de réduire le temps de séchage et d'obtenir un débit toujours plus important. Le séchage au toucher est maintenant de huit minutes avec une reprise de trafic qui peut être envisagée après 30 minutes. Ces nouveaux aérosols sont disponibles dans une palette de 9 couleurs vives (du jaune haute visibilité au blanc opaque), réglementaires et aux normes de sécurité en vigueur.

→ **Marquages visibles et durables**

Sa composition permet de résister aux agressions chimiques et aux produits de nettoyage standards, garantissant ainsi des marquages visibles et durables même dans des environnements exigeants. TraitVite® Précision peut être utilisé dans de nombreux domaines, dans des sites industriels, usines et zones de fabrication, pour l'aménagement d'entrepôts, sur des chantiers, parkings, routes, trottoirs, cours de récréation, salles ou terrains de sport et autres stades. Ces peintures peuvent être appliquées à l'aide d'une machine de traçage dédiée très ergonomique mais aussi s'utiliser avec des pochoirs pour un lettrage clair et précis.

Les nouvelles peintures de sol développées par ITW Spraytec, sèchent plus rapidement et peuvent être appliquées à l'aide d'une machine de traçage dédiée.



CLIMAT'ROAD, UNE PEINTURE POUR FAIRE BAISSER LA TEMPÉRATURE AU SOL



Cimat'Road a été appliquée sur une esplanade jusque-là dégradée à Marseille, un moyen de lutte contre les îlots de chaleur.

Pour lutter contre les îlots de chaleur en ville, Agilis, filiale de NGE, a développé un revêtement qui se présente sous forme d'une peinture spécialement adaptée pour l'aménagement des espaces urbains et routiers. Climat'Road a pour objectif de baisser la température ressentie au sol en réduisant la quantité

de chaleur emmagasinée qui est ensuite rejetée une fois la nuit venue. Mince et rapide à appliquer, cette peinture thermique agit donc à la fois comme un isolant et un réflecteur. Elle forme ainsi une barrière thermique à l'accumulation de chaleur et de l'humidité. Sans solvant et sans odeur, ce produit innovant est

composé essentiellement d'eau et de billes de céramique. L'isolation de la surface traitée empêche le stockage de la chaleur.

→ **Sur les types de supports, enrobé, asphalte, béton, fonte, pierre...**

Cimat'Road est appliqué à l'aide d'une machine à peinture en couche fine de 0,5 mm à 1 mm. Ce revêtement innovant peut être utilisé dans de nombreux environnements, aussi bien les trottoirs, les places, les zones de circulation piétonnière, les pistes cyclables et autres parkings. Autre particularité, il s'adapte à tous les types de support : enrobé, asphalte, béton, fonte, pierre... Un nuancier de 54 couleurs est disponible pour permettre une adaptation à l'environnement et aux matériaux sur lesquels la peinture thermique peut être posée. Des essais ont été réalisés à Paris, dans la métropole de Lyon mais aussi dans des collectivités de plus petite taille comme Le Thor (84), Drap (06) ou encore à Limoges (87). Agilis met en avant « une différence de 10°C de ressenti au sol, à proximité des surfaces traitées par Climat'Road. » En juillet 2023, le revêtement a été posé, sur 100 m², sur une esplanade dégradée à proximité du Mucem, à Marseille. La mairie qui, comprend les 2^e et 3^e arrondissements de la cité phocéenne, a eu recours à Agilis et à sa peinture Climat'Road pour transformer cette surface. Des motifs bleus en forme de vagues ainsi qu'un message « Ici commence la mer » sur un fond beige, structurent désormais cet espace urbain. ■

UN LOGICIEL POUR AMÉLIORER LE DÉPLOIEMENT DES RECHARGES ÉLECTRIQUES

Afin d'optimiser la conception d'un plan d'infrastructures de recharge, Mobileese, cabinet de conseil et bureau d'études en mobilité électrique, a mis au point un outil d'aide à la conception de ces lieux permettant d'approvisionner en électricité les batteries automobiles. Optimeese™, est une plateforme SaaS (Software as a service), qui permet aux utilisateurs d'accéder au logiciel via sa page web et un droit d'accès sous forme d'abonnement. L'algorithme conçu par les ingénieurs de Mobileese, rassemble

les informations recueillies lors de la visite d'un site par un expert afin de réaliser un plan 3D précis à l'échelle. L'implantation de bornes peut être réalisée sur tous les types de parking : extérieur, souterrain, sur voie publique, sur plusieurs niveaux ou encore en silo.

→ **Calcul des cheminements**

Grâce à l'ajout de photos et de vidéos recueillies et géolocalisables, la solution prend en compte l'ensemble des caractéristiques du site et ses contraintes, les éléments de l'infrastructure élec-

trique, la taille et la surface. Optimeese™ réalise alors le calcul des cheminements et détermine avec exactitude les matériaux nécessaires afin de dresser un chiffrage optimisé. L'utilisateur peut ainsi suivre chaque étape du projet et plus globalement, l'avancement du chantier. En effet, face à l'ambition gouvernementale d'équiper les parkings de 400 000 bornes de recharge d'ici 2030, ce secteur a pris du retard, 100 000 bornes points de charges sont aujourd'hui ouverts au public. ■

La CNETP regroupe **9 000 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations auprès de **288 000 salariés**.



NOS MISSIONS

- La gestion des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics
- La mise en oeuvre du régime de chômage intérimaire 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](#)


AGENDA

ÉVÈNEMENT

• 16 NOVEMBRE

Colloque "Bruits et vibrations au voisinage des infrastructures ferroviaires : quelles perspectives ?", organisé par le centre d'information sur le bruit

Lieu : Cité Internationale Universitaire de Paris, 17 boulevard Jourdan 75014 Paris

• 15 ET 16 NOVEMBRE

Journées Techniques du GRETh (Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques)

Lieu : Aix-les-Bains (73)

FORMATIONS

Nous invitons les lecteurs à vérifier par internet que les formations annoncés dans cette rubrique sont maintenus, à quelle date et dans quelles conditions (en présentiel et/ou à distance).

• 15 AU 17 NOVEMBRE

Gestion des risques juridiques et réglementaires des projets d'infrastructure

Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

• 22 AU 24 NOVEMBRE

Dossier loi sur l'eau des projets d'infrastructures linéaires

Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

• 6 ET 7 DÉCEMBRE

Projets ferroviaires : comprendre et challenger les hypothèses de coûts en phase AVP

Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

• 12 AU 15 DÉCEMBRE

Les liants hydrocarbonés : des bitumes purs aux liants modifiés et bitumes spéciaux

Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

• 15 ET 16 JANVIER

BIM pour la Maîtrise d'Ouvrage

Lieu : Paris
<https://formation-continue.enpc.fr>

NOMINATIONS

COLAS

Pascal Grangé a été nommé président non exécutif de Colas et Pierre Vanstoflegatte est devenu directeur général de Colas en remplacement de Frédéric Gardès.

FRANCE ÉNERGIES MARINES

Ronan Stephan a été nommé en assemblée générale Président de France énergies marines. Il succède Jean-Philippe Pagot qui a occupé cette fonction au cours des trois dernières années.

EPA PARIS-SACLAY

Martin Guespereau est nommé directeur général de l'Établissement public d'aménagement Paris-Saclay et succède à Philippe Van de Maele.

CEREMA

« NOTRE PRIORITÉ : ADAPTER NOS INFRASTRUCTURES AU CLIMAT DE DEMAIN »

Le Cerema est le premier établissement public à pilotage partagé entre l'État et les collectivités territoriales pour l'adaptation des territoires au changement climatique, présent partout dans l'hexagone et dans les Outre-Mer grâce à ses 26 implantations et ses 2500 agents. L'adaptation au changement climatique des infrastructures de transport est une priorité pour les activités géotechnique et ouvrages d'art du Cerema. Samuel Heumez, expert référent géotechnique et ouvrages d'art au Cerema, fait le point sur quelques-unes des approches les plus significatives de cet organisme : assistances à maître d'ouvrage, sondages, essais, instrumentations, normalisation, méthodologie, recherche, expertises, etc. Le champ d'intervention est immense ainsi que le précisent les propos de Samuel Heumez citant des exemples diversifiés d'activités en cours. **Entretien avec Samuel Heumez, expert référent géotechnique et ouvrages d'art du Cerema.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1 - Samuel Heumez, référent géotechnique et ouvrages d'art au Cerema.

Le Cerema est un établissement public qui intervient sur l'ensemble du territoire national et dont l'une des missions majeures est d'apporter aux acteurs territoriaux (services de l'État et collectivités territoriales) un appui dans leurs projets d'aménagement et de transport par ses missions de recherche & innovation, d'expertises de référence, de capitalisation des retours d'expériences et de promotion des règles de l'art.

Les domaines d'activités du Cerema concernent la transition écologique de l'aménagement, le bâtiment, les mobilités, les infrastructures de transport,

l'environnement et les risques naturels, la mer et le littoral. La géotechnique représente une expertise socle pour l'ensemble des domaines d'activité du Cerema.

Quelques exemples récents ou en cours pourraient-ils préciser la nature de vos interventions ?

Concrètement, l'activité géotechnique au Cerema se répartit essentiellement entre la recherche, la méthodologie, la normalisation et les missions d'expertise. Le Cerema assure des missions de type "études" (G1, G2), "AMO et suivi de chantiers" (G4) et "expertises"

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURES 2 & 3 © CEREMA



1

2



3

2- La grosse boîte de cisaillement à Bron pour des essais de cisaillement rectiligne sur de grandes surfaces a été utilisée notamment pour étudier la résistance au cisaillement des fondations de barrages poids pour EDF.

3- Déviation du Teil : le Cerema assiste la DIR CE pour le contrôle des études et de l'exécution des fondations du viaduc du Chabassot.

4- La paroi clouée M8 du Teil avec sujet d'interaction ouvrage / paroi clouée, dans le cadre de la mission d'AMO pour la DIR CE.

5- Les travaux de confortement du "Pont de pierre" à Bordeaux.

(G5) au sens de la norme NF P94-500. Pour illustrer les activités d'expertise géotechnique, on peut citer plusieurs projets ou chantiers importants auxquels le Cerema est associé.

En Île-de-France par exemple, le Cerema réalise actuellement des missions d'expertise pour les futures lignes 15, 16 et 17 du projet du Grand Paris Express. Un des objectifs de nos missions est de vérifier que leurs impacts, notamment les déformations dues à ces nouveaux ouvrages, soient compatibles avec les ouvrages existants. Le Cerema est également associé à l'Ineris pour un projet de recherche

SAMUEL HEUMEZ : PARCOURS

Samuel Heumez est ingénieur de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE).

Il commence sa carrière en 2004 comme chargé d'études en mécanique des sols au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'Est Parisien (LREP) au Bourget.

Le LREP est ensuite devenu CETE IF (Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Île-de-France) puis a été intégré au Cerema. Samuel Heumez a accompagné ces évolutions, d'abord en tant que responsable de l'unité géotechnique, puis en tant qu'adjoint à la Direction du Département Géosciences-Risques du Cerema Île-de-France.

Depuis 2021, il occupe le poste de référent thématique "Géotechnique et Ouvrages d'Art" au sein du Cerema Île-de-France pour des missions d'expertise, de conseil, de normalisation et de méthodologie.

Il intervient également dans les formations géotechniques de plusieurs organismes et écoles (notamment PFC, ENTPE, ENPC et CNAM).

appliquée visant à améliorer la connaissance sur les risques de dissolution du gypse et sur les mesures de traitement dans certaines zones du projet tant pour les ouvrages à ciel ouvert que pour les tunnels.

Une autre des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage récentes du Cerema concerne la tranchée couverte de Marange-Silvange, construite sous la maîtrise d'ouvrage de la Dreal Grand Est, qui s'inscrit dans l'aménagement de la Voie Rapide 52 entre l'autoroute A4 et Rombas (département de la Moselle 57).

Il s'agit d'un ouvrage enterré constitué d'un portique double d'une longueur de 400 m offrant le passage à deux voies de circulation par sens. Les piédroits du portique sont fondés sur des parois moulées.

Pour cette opération, le Cerema a apporté son assistance technique à la DIR Est sur tous les aspects géotechnique et ouvrages d'art tant lors des

études de la phase projet que pour la phase des travaux.

Pour le pont Saint Joseph à Annot (département des Alpes-de-Haute-Provence 04), le Cerema a apporté son assistance pour résoudre trois problématiques : deux fondations très différentes au rocher dont l'une en falaise, la construction verticale de la structure en treillis de l'ouvrage avant son basculement d'où le dimensionnement de platines d'ancrage en falaise pour le système de câbles et poulies, et les déblais dans le rocher de hauteur importante.

À noter de nombreuses missions d'assistance et d'expertise sur des ouvrages très spécifiques : pour le Grand Port Maritime de Dunkerque et son projet d'extension des quais pour accueillir des porte-conteneurs, pour les travaux de confortement du "Pont de Pierre" à Bordeaux, et pour la région Réunion pour la Nouvelle Route du Littoral et son viaduc de 5400 m.

Il convient aussi de mentionner nos missions relatives à la gestion du patrimoine d'ouvrages d'art existants notamment auprès des maîtres d'ouvrages publics.

Par exemple, en Île-de-France, le Cerema inspecte actuellement en collaboration avec la DiRIF (Direction Interdépartementale des Routes d'Île-de-France) les très nombreux murs en Terre Armée® de première génération qui ont été construits dans les années 70. Ces murs ont vieilli et le Cerema assiste la DiRIF pour les travaux de réparation qui permettront de prolonger leur durée de vie.

Cette problématique du vieillissement du patrimoine existant est très importante et certains évènements nous le rappellent régulièrement. En 2018, le Cerema a assuré l'AMO et le contrôle extérieur du chantier de réparation du mur en Terre Armée® qui s'est effondré au niveau de la culée nord du viaduc ouest de Gennevilliers qui porte le sens Province-Paris de l'autoroute A15. Suite à l'effondrement brutal du mur, le Cerema avait assisté la DiRIF pour la définition de la solution de réparation et la passation du marché de travaux dans des délais très courts, ce qui constituait une contrainte supplémentaire s'ajoutant à la complexité en elle-même de la réparation. L'ouverture à variantes de la consultation avait permis de faire émerger une solution de paroi clouée préfabriquées.

Le Cerema intervient-il également sur le terrain, directement sur des chantiers ?

Oui, le Cerema dispose de matériel d'essais et des mesures pour pouvoir mener des interventions sur le terrain, dans le cadre d'expertise ou de recherche, ▷

© CEREMA

4



© CÉDRIC HELSLY

5





6 © CEREMA



7 © CEREMA

avec par exemple plusieurs équipes de sondages géotechniques, capables d'intervenir sur tout le territoire.

Des investissements importants ont d'ailleurs été engagés depuis environ 3 ans pour renouveler le parc de matériel de nos équipes.

Nous possédons également certains matériels qu'on pourrait qualifier de rares comme une boîte de cisaillement de très grandes dimensions à Bron pour des essais de cisaillement rectiligne sur de grandes surfaces éventuellement renforcées par des boulons. Elle a été utilisée récemment pour étudier la résistance au cisaillement des fondations de barrages poids pour EDF, dans le cadre d'une thèse pilotée par l'Université Gustave Eiffel (UGE).

Nous avons également des missions de suivi et d'instrumentation.

Par exemple, une application actuelle et novatrice est le suivi des digues (états, risques de submersion, risques d'érosion, de rupture) en intégrant des méthodes à haut rendement (géophysique, vidéo par drone, etc.) complétées par des essais géotechniques.

On peut également mentionner la surveillance depuis de très nombreuses années des mouvements de versants importants pour des communes de montagne comme Séchillienne ou La Clapière.

Concrètement comment se traduit la position du Cerema vis-à-vis des différents acteurs de la profession ?

Le Cerema est un expert technique qui veut se positionner comme un intégrateur au bénéfice de tous. En tant qu'établissement public, nous avons pour obligation d'agir en acteur neutre et impartial en intervenant prioritairement là où les besoins de l'État et des collectivités sont les plus importants. Nous avons également un rôle à jouer pour la promotion des bonnes pratiques.

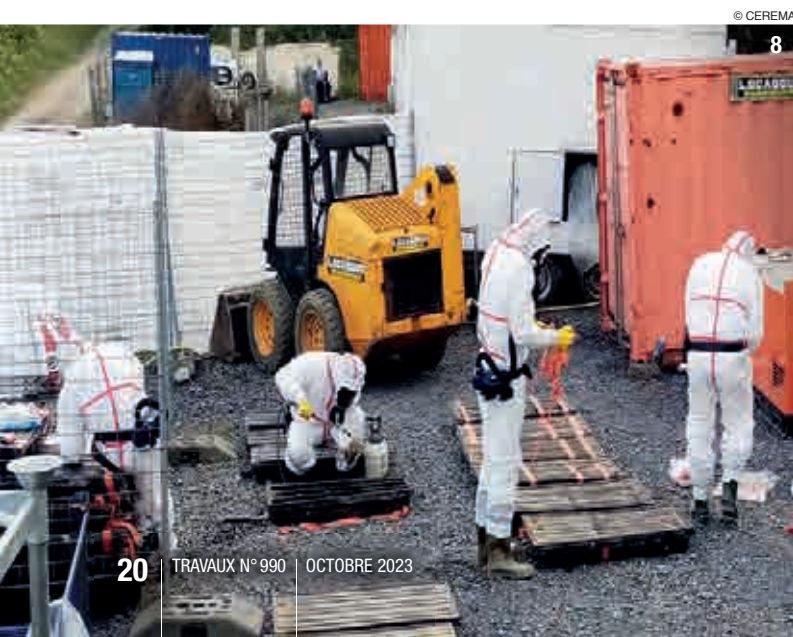
Le lien entre le Cerema et les différents acteurs de la profession se traduit de plusieurs manières.

On peut citer tout d'abord la normalisation, c'est une des missions prioritaires confiées au Cerema par l'État : le Cerema est en charge du BNTRA (bureau de normalisation des transports, des routes et de leurs aménagements). Le Cerema est donc très présent dans les différentes commissions de normalisation géotechnique nationales, y compris terrassement, granulats, roches, exécutions, etc. Le Cerema est également impliqué dans le domaine des vibrations (loi LOM), des géosynthétiques et de l'amiante environnementale. Dans le même esprit, le Cerema pilote avec l'Université Gustave Eiffel (UGE) les Évaluations de Procédés Géotechniques (EPG) qui permettent aux entreprises de travaux spéciaux possédant des cahiers des charges relatifs à des procédés géotechniques particuliers de déroger aux normes en vigueur sur la base d'un certain nombre d'essais ou d'une démarche de conception et de dimensionnement optimisée.

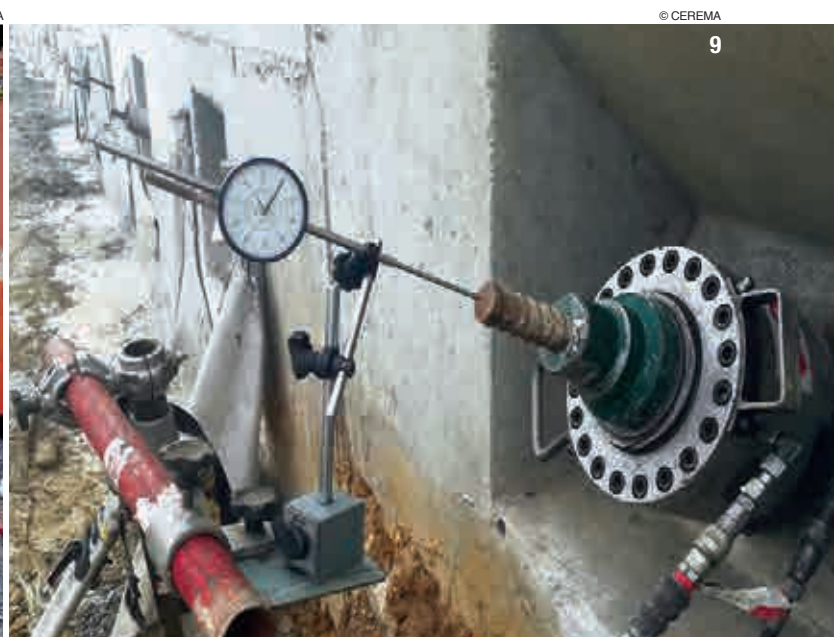
Dernièrement, on peut citer les évaluations des procédés géotechniques

Starforeuse de Spie Batignolles ou 3TER de Keller, qui ont été conduites par l'UGE et le Cerema et approuvées de manière consensuelle par une commission dont le rôle et la composition est précisée dans un référentiel relatif à l'évaluation des procédés géotechniques. Cette démarche permet d'accompagner les entreprises tout en allant au-delà de la norme en vigueur pour des procédés innovants.

En ce qui concerne la diffusion des règles de l'art, le Cerema assure également la rédaction et la diffusion de guides méthodologiques et techniques. Le guide "Pieux forés pour les ouvrages d'art et les bâtiments - Guide de réalisation" doit paraître prochainement. Ce document construit en pleine collaboration avec la profession permettra d'intégrer toutes les nouveautés techniques utilisées pour la réalisation des pieux forés. Le guide "Micropieux" est en cours de rédaction. Le Cerema a également participé largement à la rédaction du guide sur les terrassements routiers.



8 © CEREMA



9 © CEREMA

6- Instrumentation de planches d'essais à Cizancourt, dans la Somme.

7- À Cizancourt : sondes TDR, sondes de succion et lignes électriques.

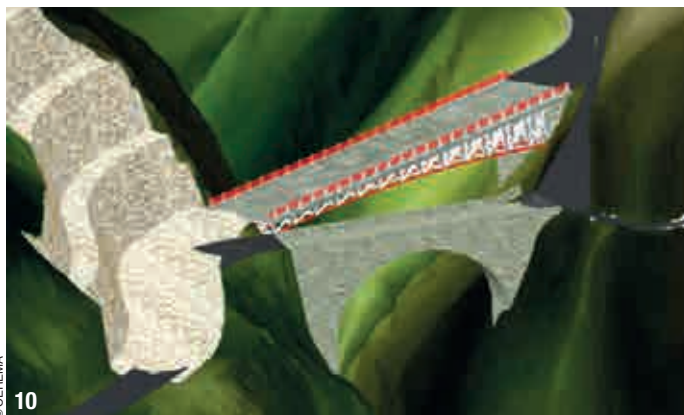
8- Chantier de repérage de l'amiante environnemental.

9- Pour les travaux de réfection de voirie entre Marange -Silvange et Pierrevilliers sur l'ex RN52, dispositif de suivi d'essais en assistance à maître d'ouvrage (AMO).

10- Le pont Saint Joseph à Annot, (PACA) : dessin d'architecte du pont ancien, couvert depuis plus de dix ans d'une dalle orthotrope du Cerema, et du pont projeté.

11- Les violentes intempéries survenues dans les Alpes-Maritimes le 2 octobre 2021 ont mobilisé de nombreuses compétences au Cerema : géotechnique, ouvrages d'art, spécialistes des inondations, du bâtiment, des infrastructures... Ici à l'entrée du tunnel de Tende.

12- Pour le projet d'extension des quais accueillant les porte-conteneurs, le Grand Port Maritime de Dunkerque a sollicité le Cerema Hauts-de-France.



© CEREMA

LE CEREMA : PLUS DE 50 ANS D'EXPERTISES

Né de la fusion des laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC), des CERTU (sécurité routière), SETRA (routes et ouvrages d'art), CETMEF (maritime et fluvial) et des CETE (équipement), le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, la mobilité et l'aménagement), créé en 2014, capitalise plus de 50 ans d'expérience. Cohérent dans son approche de l'aménagement grâce à ses compétences multidisciplinaires, il constitue un établissement public unique détenteur d'une forte expertise mutualisée au niveau national, tout en étant en capacité partout en France d'accompagner tous les types de territoires. En 2023, le Cerema a évolué comme établissement public dont la gouvernance est désormais partagée entre l'État et les collectivités territoriales ce qui permettra d'accompagner tous les acteurs territoriaux.

Les acteurs publics ont toujours eu besoin d'ingénieurs, de techniciens, d'experts. C'est de la conjugaison de visions et de savoir-faire que naissent les politiques d'aménagement puis leur mise en œuvre concrète. Les années 2000 ont vu l'expertise en ingénierie au service des collectivités territoriales les plus fragiles se tarir.

Alors que, dans le même temps, les enjeux majeurs d'érosion de la biodiversité, de lutte contre le changement climatique ou de transition numérique ont renouvelé les grands paradigmes de l'aménagement, des solutions innovantes, systémiques dans leur approche englobant tous les enjeux à l'échelle d'un territoire, doivent être trouvées.

Ancrée dans les territoires mais également intégratrice des politiques européennes et expériences internationales, l'expertise du Cerema constitue un socle pour le développement d'intelligences territoriales, un catalyseur d'ingénierie innovante, essentiels au regard des enjeux d'avenir.

Pour la recherche, le Cerema revendique un positionnement particulier entre recherche théorique et appliquée.

Comment cela se traduit-il ?

Dans le domaine de la recherche, le Cerema s'appuie sur son label de l'Institut Carnot : "Clim'adapt", pour accompagner les entreprises, les ingénieries, les industriels, les autorités locales dans les démarches de recherche et d'innovation afin de tenter de répondre aux enjeux du changement climatique notamment en améliorant les bilans carbone et les besoins en ressources. Le Cerema veut être un partenaire pour la valorisation de la recherche et de l'innovation. L'objectif est de se positionner sur une recherche appliquée permettant d'accompagner les entreprises en étant un chaînon entre la recherche théorique et son application dans les projets à réaliser.

Le Cerema dispose de 12 équipes de recherche dont l'équipe GeoCoD "Géomatériaux et géomécanique - couplages et dynamique en géotechnique" qui travaille sur la compréhension et la mesure des risques géotechniques tels que les chutes de blocs, les éboulements, les glissements de terrain, les avalanches pour mieux dimensionner les dispositifs de protection des infrastructures de transport.

On peut également citer l'équipe de recherche UMR MCD (Matériaux pour une Construction Durable) en collaboration avec l'Université Gustave Eiffel, orientée plus spécialement sur la durabilité, l'innovation et la valorisation des matériaux alternatifs : caractériser la structure, la durabilité, les impacts environnementaux et la valorisation économique des matériaux de construction intégrant des déchets des bâtiments, des travaux publics ou de l'industrie. ▷

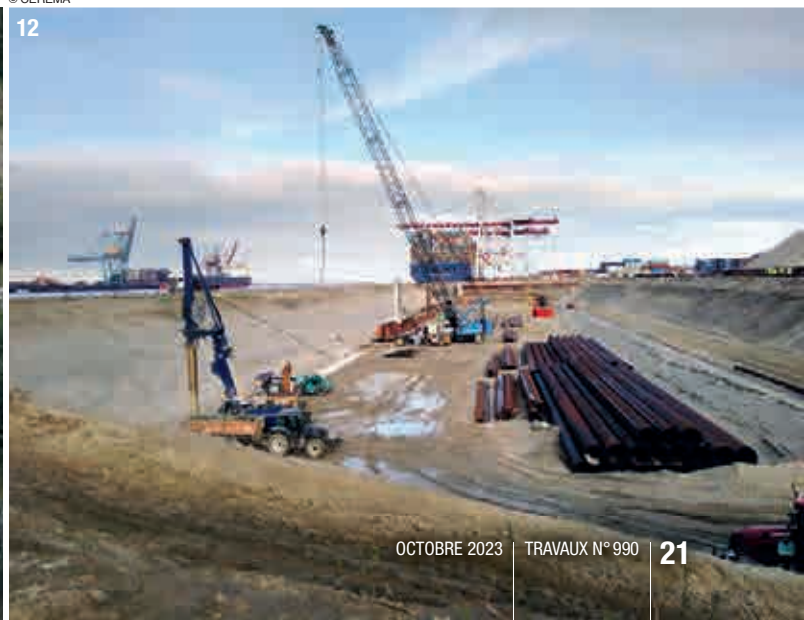
© CEREMA

11



© CEREMA

12



Ce lien voulu entre la recherche théorique et son application pratique est parfaitement illustré par les activités d'une autre entité du Cerema : le Centre d'Expérimentation et de Recherche de Rouen (CER).

Le CER permet de réaliser des expérimentations en vraie grandeur sur des ouvrages géotechniques et des infrastructures routières ou ferroviaires, ainsi que la validation d'appareils de mesures et de matériels innovants. On peut citer l'exemple de la route électrique, permettant de recharger les véhicules en marche, qui sera testée prochainement grâce à ce centre.

Pouvez-vous donner quelques exemples pour illustrer concrètement des actions du Cerema vis-à-vis de la prise en compte du changement climatique ?

La prise en compte des enjeux liés au changement climatique peut être vue de différentes manières selon que l'on vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre ou à adapter les ouvrages pour plus de résilience face aux effets du changement climatique, ou encore à mieux se préparer à la gestion de crise. En termes de décarbonation, le Cerema travaille à des procédés de construction d'infrastructures moins coûteux en ressources et en carbone.

Par exemple, le Cerema participe à des missions d'économie circulaire concernant le réemploi des matériaux de chantier, en particulier actuellement pour la Société du Grand Paris dont les travaux d'excavation tant des tunnels que des gares, génèrent un volume très important de matériaux qu'il convient de réutiliser au mieux.

De même, pour le Canal Seine-Nord-Europe, le Cerema a participé à la mise au point de techniques inédites au



© LAMINE IGHIL AMEUR/CEREMA



© LAMINE IGHIL AMEUR/CEREMA

niveau des matériaux de terrassement et de remblai.

La construction de ce canal va générer des volumes de terrassements et nécessiter des approvisionnements de matériaux extérieurs (chaux, liants, granulats, aciers) très importants, de l'ordre de plusieurs millions de mètres cubes ou de tonnes. La gestion des déblais et des flux de matériaux est un défi environnemental et sociétal majeur pour la Société du Canal Seine-Nord-Europe (SCSNE) qui a l'ambition d'en faire un projet emblématique de la transition écologique et énergétique et à l'écoute des enjeux territoriaux.

Pour la réalisation des travaux, la SCSNE poursuit un triple objectif : la qualité de l'étanchéité des canaux, le respect de l'environnement et le respect des délais pour la livraison de l'infrastructure. Elle a lancé en 2019 un marché pour la réalisation de planches d'essais en sols traités destinés à vérifier la faisabilité de réalisation d'un complexe d'étanchéité réemployant les sols extraits de la trace du Canal pour sa propre étanchéification.

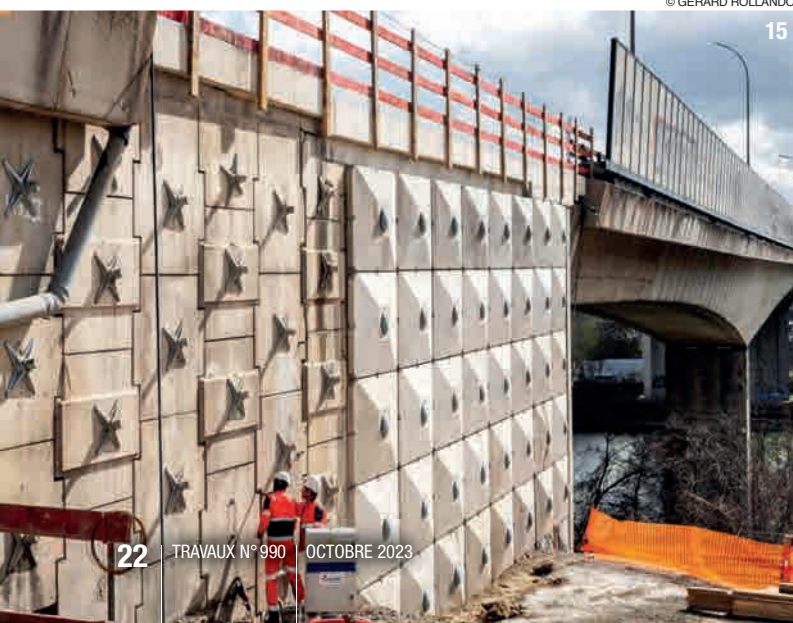
À cet effet, la SCSNE a sollicité le Cerema afin qu'il propose une méthodologie d'évaluation de l'homogénéité et de l'étanchéité des sols traités en place, à long terme

Dans le cadre de la réalisation de planches d'essais en sols traités, à Cizancourt (80), afin d'en tester l'étanchéité, le Cerema, en partenariat avec l'Université Gustave Eiffel, a proposé à la SCSNE une instrumentation permettant de suivre l'évolution des matériaux, leur homogénéité et leur perméabilité à long terme par une série d'essais destructifs, ponctuels et instantanés. L'instrumentation mise en place permet de contrôler l'homogénéité et la perméabilité des matériaux mis en œuvre et leur évolution vis-à-vis des sollicitations du milieu extérieur (météorologie, immersion...). Elle est couplée à une station météorologique mise en place spécifiquement sur le site afin de corréler les réponses des capteurs aux variations de l'environnement. Le suivi permettra ainsi de vérifier l'impact de la météorologie sur l'évolution des sols traités ayant une fonction d'étanchéité.

13 & 14- Mesures de retrait-gonflement des argiles dans les très nombreuses maisons individuelles concernées par le phénomène.

15- Un exemple d'entretien des murs en Terre Armée® en Île-de-France : les écaillés en béton préfabriqués pour le confortement de la culée Nord du viaduc de Gennevilliers sur l'autoroute A15 (Sogea Île-de-France, NGE Fondations, Soletanche Freyssinet, Fayolle).

16- Recépage de la paroi moulée de la tranchée couverte de Marange-Silvange dans le cadre de l'aménagement de la Voie Rapide 52 entre l'autoroute A4 et Rombas (57).



© GÉRARD ROLLANDO

15



© CEREMA

16

17- À la suite de la tempête Fiona qui a frappé la Guadeloupe en septembre 2022, le Cerema a réalisé des missions d'expertise sur site puis a évalué le coût de remise en état des ouvrages structurants du réseau routier.

18- Travaux de mise à 2x2 voies de la RN141 entre Roumazières et Exideuil comportant 10 km de tracé neuf (MOA : DREAL NA - MOE : DIRCO).

19- Le Cerema a élaboré la solution de confortement retenue pour la culée en Terre Armée® du viaduc de Beauregard sur l'autoroute A31 entre Metz et le Luxembourg, à hauteur de Thionville (57).

L'analyse des données de ce suivi permettra de proposer une méthodologie de suivi des sols traités appliqués dans un objectif d'étanchéification du canal. Cette méthodologie, ainsi que les seuils de perméabilité à atteindre, pourront être proposés aux entreprises de terrassement souhaitant se positionner pour la réalisation du Canal.

L'instrumentation pourra également être déployée sur les sections du Canal dont l'étanchéité sera assurée par la mise en œuvre de sols traités.

Ensuite, pour ce qui concerne les actions du Cerema dans le domaine



© D.BATISTA / CEREMA

INTÉGRATION DU CNPS

Intégré au Cerema depuis le 1^{er} janvier 2021, le Centre National des Ponts de Secours (CNPS) étudie et met en place de manière rapide des franchissements grâce à son important stock de ponts modulaires, de viaducs métalliques démontables (VDM), de caissons flottants et de palées. Il réalise également les études ainsi que la définition des méthodes et moyens de franchissement possibles puis la visite annuelle des ponts provisoires installés.

Dotées d'un savoir technique unique en France dans les solutions de pontage modulaires, les équipes du CNPS font preuve d'une grande réactivité.

Le délai de mise en place d'un pont provisoire est variable selon le contexte et les caractéristiques de l'ouvrage. À titre indicatif, pour les cas les plus urgents, à compter de la première visite de site le CNPS est capable de mettre en service un pont entre 3 semaines et 2 mois selon sa portée (délais d'études, de préparation des matériels, d'acheminement et de travaux).

Le stock du CNPS de ponts modulaires, de viaducs métalliques démontables (VDM), de caissons flottants et palées répond à des besoins variés dans toute la France métropolitaine et en Outre-Mer : déviation routière lors de travaux sur un ouvrage d'art existant, rétablissement de communication suite à intempéries destructrices, voie de chantier, desserte événementielle...

Le CNPS intervient pour le compte de collectivités territoriales, de l'État (DIR) et ses établissements publics, mais aussi des entreprises notamment en tant que sous-traitant dans le cadre de marchés publics.

géotechnique sur l'adaptation des ouvrages aux effets du changement climatique, elles concernent principalement deux impacts : le retrait-gonflement des argiles et la stabilité des pentes.

En France métropolitaine, plus de 10 millions de maisons individuelles sont potentiellement très exposées au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. Les sécheresses plus fréquentes et intenses ont contribué à l'extension du phénomène et à l'augmentation des coûts.

Le Cerema développe depuis 2016 un nouveau procédé basé sur la réhumidification du sol argileux pendant les périodes de sécheresse grâce à l'eau de pluie, récupérée et stockée pendant les périodes humides. Cette solution innovante, nommée MACH "MAison Confortée par Humidification", est actuellement en cours d'expérimentation pour une mise en service à horizon 2025.

Le Cerema est également impliqué dans des projets de recherche relatifs aux stabilités de pentes, et plus spécifiquement pour les éboulements rocheux. On peut citer le développement d'un logiciel de simulation des impacts sur les écrans de filets à Bron avec une thèse en cours, ou l'utilisation de l'intelligence artificielle pour déterminer les causes des chutes de blocs (projet ANR en cours).

Enfin, en ce qui concerne les actions en lien avec le changement climatique, la gestion que l'on peut appeler "post-crise" des conséquences d'événements climatiques exceptionnels relève aussi de notre action.

Celle-ci s'étend à tout le territoire avec, par exemple, des événements comme la tempête Fiona en 2022 en Guadeloupe.

© THIERRY DEGEN DREAL NOUVELLE AQUITAINE



© CEREMA



Pendant cette tempête, des pluies torrentielles de 450 à 500 mm en 24 heures ont provoqué des coulées de boue et des endommagements graves, voire des ruines d'ouvrage : modification du lit de rivières, présence de coulées boueuses sur les berges, affouillements de grande profondeur. Des géotechniciens du Cerema ont été sollicités par le ministère des Outre-Mer pour évaluer sur place l'importance des dégâts. Le bilan de l'expertise a mis en évidence 4 ouvrages ruinés ou inexploitable, 5 ouvrages fortement affouillés dont 3 en situation très critique, 7 ouvrages présentant des affouillements significatifs.

Plusieurs recommandations ont été émises par les géotechniciens du Cerema : réaliser des investigations spécialisées (visites subaquatiques, bathymétrie, mesures des affouillements, instrumentation...), mettre en place des surveillances renforcées, fermer certains ouvrages en cas de crue significative, réaliser des confortements d'urgence, rechercher les dossiers d'ouvrages ou réaliser des investigations pour les reconstituer, préserver la sécurité des usagers (désordres sur les garde-corps, par exemple).

D'autres expertises post-crise sont en cours : sur le viaduc de Fontan pour la SNCF, suite au passage de la tempête Alex dans la vallée de la Roya, à la Réunion, suite à la tempête Fiona en Guadeloupe, sur le pont de Mirepoix dans le Tarn suite à un effondrement. À la suite de la tempête Alex qui a frappé les Alpes-Maritimes en octobre 2020, entraînant des inondations et d'importants dégâts au bâti et aux infrastructures, de nombreuses interventions ont été réalisées en urgence pour déterminer les dommages et rétablir la liaison avec des territoires enclavés du fait de la destruction du réseau routier. Depuis, le Cerema poursuit des missions sur place. De nombreuses compétences ont été mobilisées au Cerema dès le lendemain de l'événement : géotechnique, génie civil et infrastructures, risques naturels, bâtiment, ouvrages de protection contre les submersions...



20

© SPIE FONDATIONS

Plusieurs équipes ouvrages d'art ont été mobilisées, d'abord pour identifier les dégâts aux ouvrages, puis pour la conception et l'installation de ponts de secours destinés à désenclaver des zones habitées. Le pont provisoire de Breil-sur-Roya a été posé en février 2021, en cinq jours, par un département spécialisé du Cerema. Un appui est désormais apporté pour la reconstruction du pont du Bourg Neuf à Tende. Pour la gestion de crises de cette nature, le Cerema a d'ailleurs intégré

vés du fait de la destruction du réseau routier. Depuis, le Cerema poursuit des missions sur place. De nombreuses compétences ont été mobilisées au Cerema dès le lendemain de l'événement : géotechnique, génie civil et infrastructures, risques naturels, bâtiment, ouvrages de protection contre les submersions...

Plusieurs équipes ouvrages d'art ont été mobilisées, d'abord pour identifier les dégâts aux ouvrages, puis pour la conception et l'installation de ponts de secours destinés à désenclaver des zones habitées. Le pont provisoire de Breil-sur-Roya a été posé en février 2021, en cinq jours, par un département spécialisé du Cerema. Un appui est désormais apporté pour la reconstruction du pont du Bourg Neuf à Tende. Pour la gestion de crises de cette nature, le Cerema a d'ailleurs intégré

20- La Starforeuse de Spie Fondations a fait l'objet d'une évaluation par l'Université Gustave Eiffel et le Cerema.

21- Portique de chargement utilisé pour les expérimentations en vraie grandeur au CER.

22- Pour le Canal Seine-Nord-Europe (CSNE), le Cerema a participé à la mise au point de techniques inédites au niveau des matériaux de terrassement et de remblai.

depuis janvier 2021 le CNPS (Centre National des Ponts de Secours) ce qui lui permet de préconiser les mesures d'urgence à prendre ainsi que les réparations à effectuer.

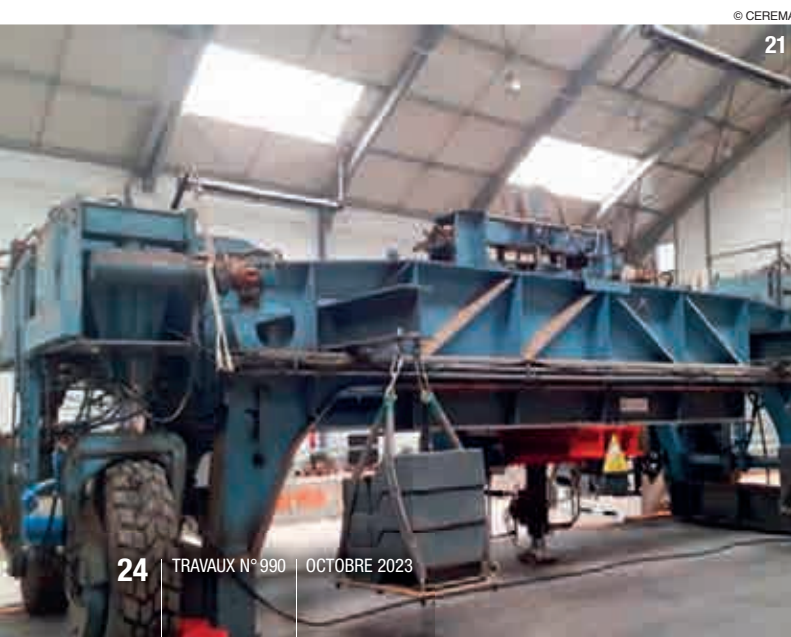
Et quelles seront les orientations du Cerema pour 2024 et au-delà ?

Selon les chiffres de la Commission européenne, le coût des dommages causés par les aléas climatiques aux infrastructures de transport pourrait être multiplié par 6 d'ici 2050 si des mesures fortes d'adaptation ne sont pas mises en œuvre.

Le prendre en compte dès aujourd'hui constitue la clé d'un service rendu à nos concitoyens optimal, sécurisé et au meilleur coût.

Le Cerema intensifie la mobilisation de son expertise, portée par plus de 50 ans d'expérience, pour adapter au climat de demain les politiques et projets de transports terrestres ou maritimes, les bâtiments...

Les principales évolutions attendues à court et moyen terme concernent plusieurs domaines de l'action du Cerema : la gestion des ouvrages d'art, la résilience, la décarbonation des infrastructures, les appuis confirmés aux territoires d'Outre-mer avec la réalisation de guides post-crise, etc. À ceci s'ajoute évidemment le maintien d'une expertise de haut niveau en capacité d'accompagner les maîtres d'ouvrage publics et les entreprises. Le Cerema s'inscrit de plus en plus dans un rôle de porteur de politiques publiques, comme c'est le cas pour les Programmes Nationaux Ponts qui vient aider les Collectivités Territoriales les plus modestes à enclencher des pratiques vertueuses de gestion de leur patrimoine d'ouvrages d'art. □



21

© CEREMA



22

© AC BARBIER

DEPUIS 70 ANS AUX CÔTÉS DU BTP

Acteur de référence du BTP, nous sommes aux côtés des entreprises, artisans, salariés et retraités de ce secteur pour les protéger, les assurer et les soutenir en cas de besoin. Nous nous engageons chaque jour à proposer des services qui vous aident à avancer avec sérénité.



PRO BTP
GROUPE

ASSURÉ POUR DEMAIN

www.probtp.com



SEISTER

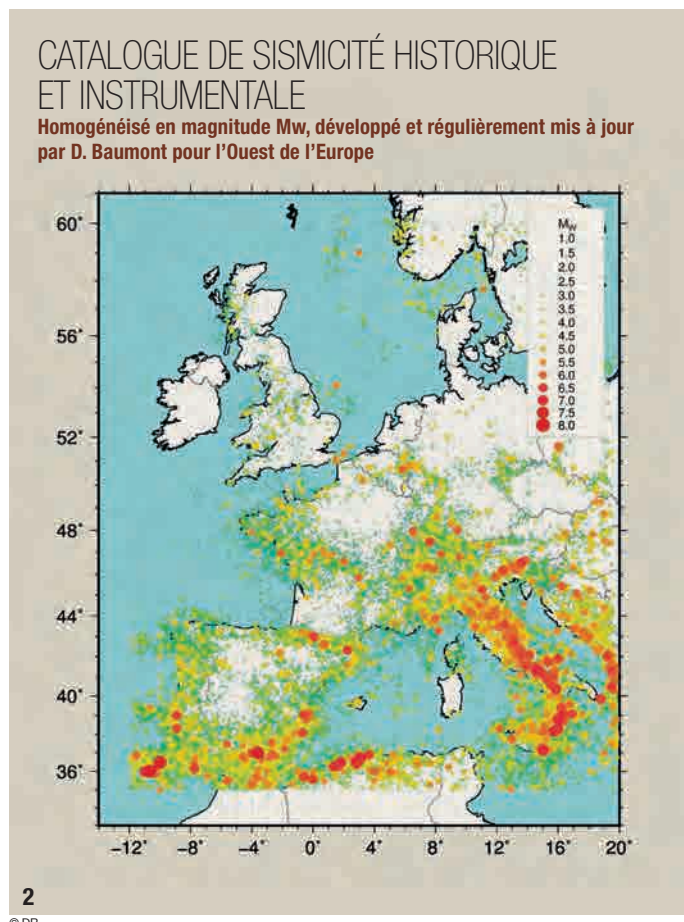
PRÉVENIR L'ALÉA SISMIQUE ET LE GÉRER

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

SEISTER EST UNE SOCIÉTÉ DE CONSEIL SPÉCIALISÉE DANS LE DOMAINE DES GÉOSCIENCES ET CELUI DE L'INGÉNIEURIE GÉOLOGIQUE ET SISMIQUE. ELLE EST FORMÉE D'UNE ÉQUIPE D'EXPERTS DE RENOMMÉE INTERNATIONALE FOURNISSANT DES SOLUTIONS INNOVANTES AXÉES SUR LES ÉTUDES D'ALÉA ET DE RISQUE SISMQUES POUR LES CONSTRUCTIONS OU OUVRAGES EXISTANTS OU EN DEVENIR, DE TOUS TYPES, AFIN DE LES DIAGNOSTIQUER ET LES PROTÉGER LORSQU'ILS EXISTENT DÉJÀ OU DE LES CONCEVOIR ET LES DIMENSIONNER AU SÉISME LORSQU'ILS SONT ENCORE À L'ÉTAT DE PROJET. LES RÉCENTS ÉVÉNEMENTS SURVENUS EN 2023 EN TURQUIE, EN SYRIE ET EN FRANCE, METTENT EN LUMIÈRE L'IMPORTANCE D'UNE TELLE ENTREPRISE. CE SUJET COMPLEXE EST PRÉSENTÉ AVEC MAÎTRISE ET DE MANIÈRE COMPRÉHENSIBLE PAR DAVID BAUMONT, PRÉSIDENT DE SEISTER ET CHRISTOPHE MARTIN, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE SEISTER.

Les dirigeants de Seister sont issus du monde universitaire, tous ayant un doctorat de physique avec spécialisation en sismologie. Ils ont forgé l'assise de leurs compétences au travers de parcours professionnels variés, d'abord au sein de laboratoires de recherche (ISTERRE Grenoble, INGV à Milan), d'organismes de service public tels que le BRGM et l'IRSN, puis d'un bureau d'études spécialisé, la PME Geoter, au sein de laquelle ils mettent à profit leurs savoir-faire au service de l'ingénierie géologique et sismologique.

1- Voie ferrée, traversée par une faille.
2- Catalogue de sismicité historique et instrumentale, homogénéisé en magnitude Mw, développé et régulièrement mis à jour par D. Baumont pour l'Ouest de l'Europe.



À la suite du rachat de cette dernière en 2012 par un groupe international plus axé sur l'acquisition de données onshore et offshore que sur leur valorisation scientifique, trois sismologues décident, fin 2017, de voler de leurs propres ailes et de créer leur entreprise : David Baumont, Christophe Martin et Gabriele Ameri, respectivement, président et directeur général de Seister.

En 2023, l'entreprise compte une dizaine de collaborateurs et dispose de deux implantations, à Chatenay-Malabry, en Île-de-France, et à Gémenos, à la périphérie de Marseille.

Cette société indépendante est spécialisée en géosciences et en particulier dans l'évaluation de l'aléa sismique et la prévention des risques sismiques. Ses services sont principalement axés sur la définition de mouvements sismiques de référence pour le dimensionnement d'installations nouvelles ou la vérification d'installations existantes. Elle s'est donnée comme règle de tenir compte du meilleur état de la connaissance scientifique pour développer des méthodes et services de qualité, et répondre aux besoins des projets de ses clients qui doivent se conformer aux exigences réglementaires.

« Les mouvements sismiques doivent en effet être définis, la plupart du temps, indique Christophe Martin, en appliquant des méthodes recommandées par les guides méthodologiques de la profession, et en répondant à des exigences fixées par le corpus réglementaire applicable, qui varie d'un pays à l'autre. Nous sommes amenés à définir ces mouvements sous la forme de spectres de réponse élastique et d'accélérogrammes associés à différentes périodes de retour. Plus les exigences de protection parasismique sont élevées, plus les périodes de retour sont longues, et plus les mouvements sismiques sont élevés. Ces règles varient également en fonction de la catégorie d'importance des ouvrages qui traduit une acceptabilité plus ou moins grande des risques et de la nature existante ou nouvelle du projet. »

Ces mouvements sismiques sont destinés aux bureaux d'ingénierie des structures qui vont utiliser les résultats de Seister pour étudier la conception et le dimensionnement des ouvrages ou les vérifier de sorte à définir des mesures de confortement appropriées.

« Une problématique a été plus particulièrement mise en avant au cours des dernières années, précise David Baumont, qui est, précisément, la quantification des effets potentiels liés aux failles à l'origine des séismes et



3- De droite à gauche, David Baumont, président de Seister et Christophe Martin, directeur général de Seister.

des déplacements permanents qu'elles peuvent engendrer en surface du sol. La variété des contextes sismotectoniques dans lesquels nous travaillons, stable comme celui de la France, ou très actif comme celui de la Turquie, nous impose dans tous les cas d'avoir recours à l'exploitation de nombreuses bases de données relatives aux géos-

ciences et de tenir compte d'incertitudes multiples à chacune des étapes de nos évaluations. Les résultats de nos études sont ainsi fournis sous la forme d'une meilleure estimation, traduisant un aléa sismique moyen, et de grandeurs statistiques traduisant une variabilité de cette estimation liée à ces incertitudes. Ces sont les estimations moyennes qui sont généralement utilisées par l'ingénierie des structures. »

Ce type d'étude est réalisé pour deux sortes d'installations : soit des projets futurs, soit des structures existantes potentiellement sujettes à risque.

Il faut bien réaliser que la discipline dans laquelle travaille Seister - la sismologie de l'ingénieur - est une discipline récente qui a évolué et continue d'évoluer très rapidement : la tectonique des plaques datant seulement de la fin des années 60.

« Les progrès scientifiques sont très rapides, précise David Baumont et, de ce fait, ce que l'on était capable de faire il y a 50 ans, est loin de ce que l'on est capable de faire aujourd'hui et, probablement, de ce que l'on saura faire dans 50 ans. Il est ainsi essentiel, pour optimiser les politiques de protection parasismique de mettre à jour régulièrement les évaluations de l'aléa sismique, qu'il s'agisse des zonages nationaux qui supportent les applications des codes de construction

DAVID BAUMONT : PARCOURS

David Baumont a 20 ans d'expérience dans les services de géoconseil pour une variété d'installations critiques (sites nucléaires, projets pétroliers et gaziers, grandes infrastructures et barrages) nécessitant le développement d'arbres logiques complexes dans les analyses PSHA et DSHA (Évaluation probabiliste des mouvements sismique et évaluation déterministe de l'aléa sismique).

Président et co-fondateur de Seister, David Baumont est un expert sismologue reconnu pour les évaluations des risques sismiques menées conformément à diverses normes et directives (IAEA et RG 1.208, ASME/ASN, EN 98-1, EN 1473, NFPA, API). Il a effectué ou revu par des pairs de nombreuses études d'aléas sismiques dans divers contextes sismotectoniques, y compris les régions continentales stables ainsi que les zones de subduction 3D complexes, suivant l'approche SSHAC, soit en tant qu'intégrateur technique, chef de l'équipe de calcul, chef de projet ou membre du comité d'examen participatif par les pairs. En tant qu'ancien directeur de l'IRSN / BERSSIN, il était responsable des revues d'évaluation de l'aléa sismique sur les sites nucléaires français.

Il a été impliqué dans des collaborations internationales avec TSO, notamment pour vérifier que les SHA des sites nucléaires étaient menés en conformité avec les réglementations nationales et les pratiques internationales.

Il est l'auteur d'outils numériques de pointe dans le domaine de la sismologie de l'ingénieur (modélisation du mouvement du sol fort, évaluation probabiliste et déterministe des aléas prenant en compte les incertitudes épistémiques et aléatoires).

CHRISTOPHE MARTIN : PARCOURS

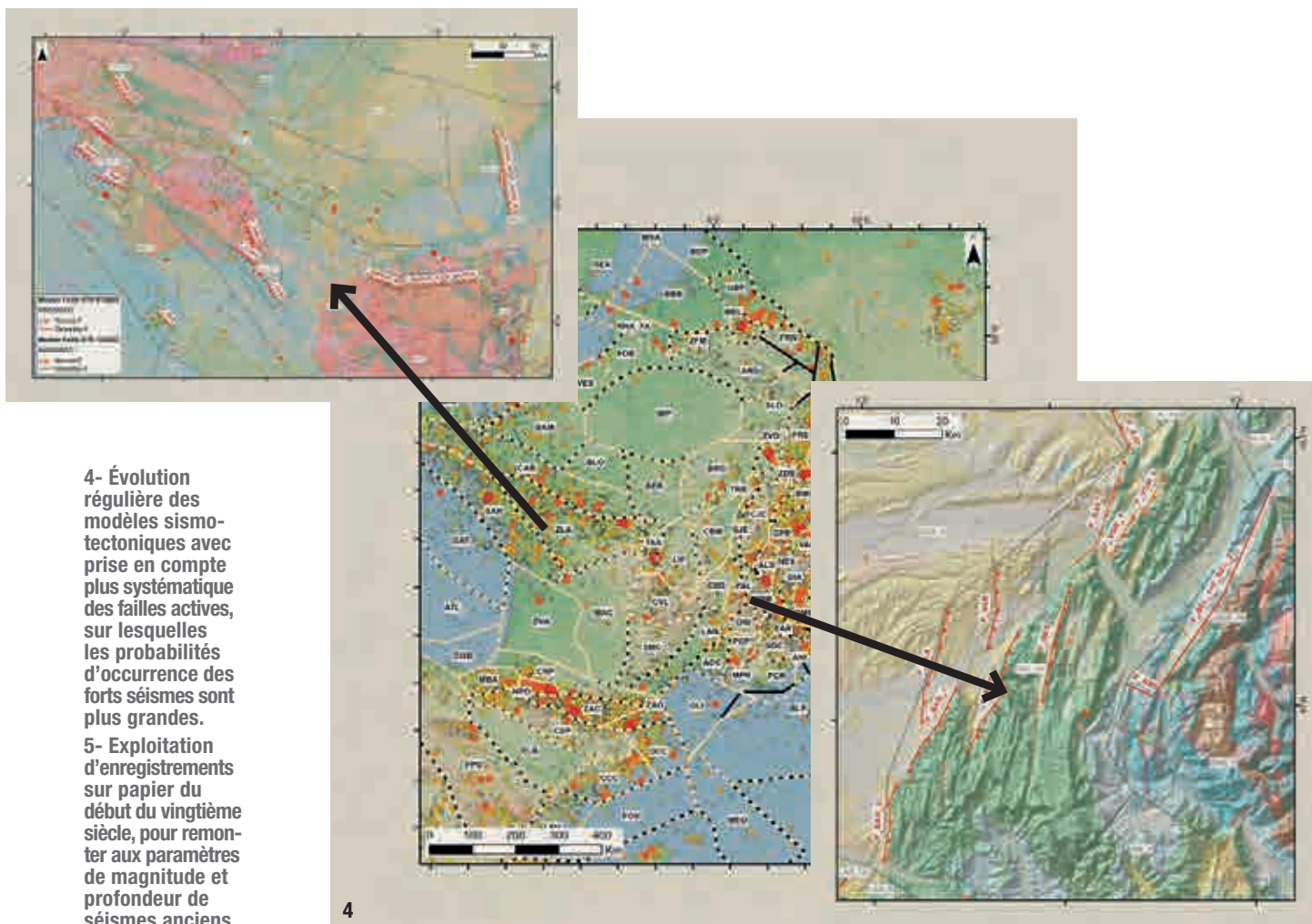
Christophe Martin, directeur général et co-fondateur de Seister, est docteur en physique et en sismologie de l'Université de Grenoble (1988).

Après un début de carrière au BRGM (1990-1998), il rejoint GEOTER dont il assure la direction technique de 2004 à 2012. À l'absorption de cette dernière par le groupe Fugro il assure la responsabilité des services risques naturels jusqu'en 2017 avant de co-fonder Seister en 2018.

Christophe Martin a plus de 30 ans d'expérience professionnelle dans les services de géoconseil liés à l'évaluation de l'aléa et du risque sismiques. Il a réalisé les études techniques pour l'élaboration du zonage sismique de la France, et réalisé de nombreux plans de prévention des risques sismiques, en particulier aux Antilles. Il a fourni des services de conseil pour un large éventail de projets multidisciplinaires, avec une spécialisation sur les projets d'énergie nucléaire, d'énergie hydraulique, d'industrie chimique et de pétrole et de gaz.

Son expérience couvre toute la France, les Antilles et plusieurs autres pays (Arménie, Algérie, Azerbaïdjan, Bolivie, Chine, Chili, Croatie, Turquie, Indonésie, Iran, Italie, Pérou, Jordanie, Maroc, Myanmar, Roumanie, Espagne, Russie, Émirats Arabes Unis, Royaume-Uni).

Au cours des 15 dernières années, Christophe Martin a coordonné la révision des évaluations de l'aléa sismique pour la quasi-totalité des sites nucléaires en France et a mené des PSHA et DSHA (Évaluation probabiliste des mouvements sismique et évaluation déterministe de l'aléa sismique) avancés pour différents sites à l'étranger en assurant le rôle d'intégrateur technique selon les procédures SSHAC.



4- Évolution régulière des modèles sismo-tectoniques avec prise en compte plus systématique des failles actives, sur lesquelles les probabilités d'occurrence des forts séismes sont plus grandes.
5- Exploitation d'enregistrements sur papier du début du vingtième siècle, pour remonter aux paramètres de magnitude et profondeur de séismes anciens.

4 © SEISTER

parasismique, ou les évaluations particulières de sites.

Une des difficultés que pose l'étude des séismes est liée au fait que les séismes sont des événements qui se produisent à grande profondeur et que l'on ne dispose pas de moyens d'observation directs de ce qui se passe à 10 km de profondeur. »

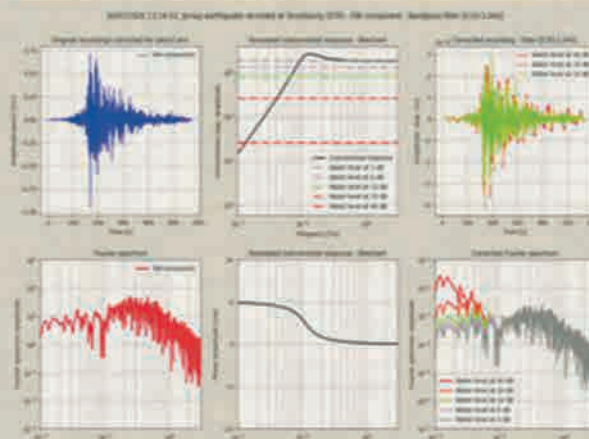
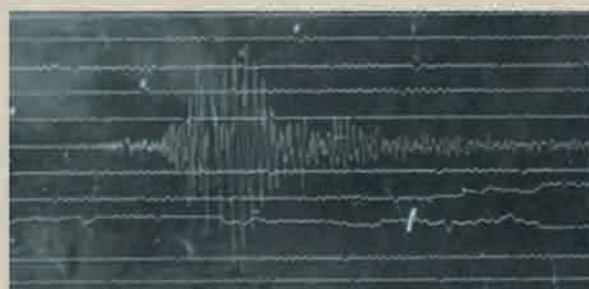
La manière de les étudier est d'interpréter les enregistrements des mouvements sismiques produits en surface par les tremblements de terre. Seister exploite ou acquiert également des données de surface puis réalise des modèles inverses visant à relier les causes aux effets produits en surface et potentiellement sur le milieu construit.

« En dépit des nombreux progrès, cette discipline comporte encore beaucoup d'incertitudes et de zones d'ombre dont on espère que certaines seront levées dans le futur. En attendant, nous cherchons à tenir compte de ces incertitudes dans la mise en œuvre et le développement de nos modèles prédictifs.

Les modèles de prédiction du mouvement du sol sont complexes et font beaucoup appel aux statistiques. Ces modèles reposent sur l'exploitation de grandes bases de données qui s'enrichissent au fur et à mesure que de

EXPLOITATION D'ENREGISTREMENTS SUR PAPIER DU DÉBUT DU VINGTIÈME SIÈCLE

pour remonter aux paramètres de magnitude et profondeur de séismes anciens



5 © SEISTER

nouveaux enregistrements sont disponibles, permettant d'affiner petit à petit les modèles. Statistiques et probabilités font partie du lot quotidien de Seister. »

La forte évolution des connaissances et les incertitudes qui pèsent sur les modèles structurent la manière dont Seister travaille et mène son activité. Il y a un temps qui consiste à faire de la veille scientifique en prenant en compte toute l'actualité de la recherche mais également un temps qui vise à développer de nouveaux outils pour prendre en compte l'évolution de la connaissance. Il s'agit d'un besoin permanent pour maintenir notre pratique en cohérence avec l'état de l'art et valoriser les retours d'expérience dont nous disposons.

Ce retour d'expérience se fait également à la faveur des observations menées par la communauté scientifique à l'occasion des séismes récents. En France de tels séismes ont fait l'objet de l'actualité le 11 novembre 2019 sur la commune du Teil en Ardèche et, plus récemment, le 16 juin 2023 en Charente-Maritime. Pour Seister, de tels séismes ne constituent pas une surprise car des séismes de beaucoup plus forte magnitude (jusqu'à Mw 7) sont pris en compte dans les modèles prédictifs.

Seister avait d'ailleurs réalisé de nombreuses études d'aléa sismique pour des sites régionaux d'installations classées pour la protection de l'environnement avant l'occurrence du séisme du Teil. À la demande de la Direction de la Prévention des Risques qui contrôle ses sites, Seister a dû vérifier a posteriori ses modèles en intégrant ce séisme, et a montré que les effets de ce séisme étaient bien anticipés par ses modèles prédictifs.

En revanche, une des leçons nouvelles apportées par le séisme du Teil, réside dans l'apparition d'une rupture de surface pluri-centimétrique observée sur une distance d'environ 5 km, très rare pour une magnitude aussi faible, et liée également à la profondeur très superficielle (entre 1 et 2 km) de la rupture. Cette observation a conduit les autorités à mieux prendre en compte de type de phénomène, jamais observé sur le territoire métropolitain. Dans ce cadre et pour apporter des éclairages et estimations fiables sur ces sujets, Seister participe actuellement à un benchmark organisé par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, pour fiabiliser les méthodes de calcul et vérifier et valider les codes de calcul, encore assez rares permettant la réalisation d'évaluations probabilistes des déplacements de surface générés par les failles actives. Les séismes se produisant dans les zones actives, plus nombreux et de plus forte magnitude, constituent à l'évidence une source d'information essentielle pour améliorer les modèles prédictifs. Christophe Martin a participé récemment à la mission post-sismique organisée par l'association française du Génie Parasismique (AFPS) à la suite du doublet de séismes de magnitude respectivement Mw 7.8 et Mw 7.5 qui ont eu lieu le 6/02/2023 sur des failles déjà cartographiées, rattachées au système Est-Anatolien. Il estime que les informations collectées lors de la mission de l'AFPS et leur exploitation par la communauté scientifique dans les mois et années à venir seront de nature à enrichir notre compréhension de la complexité de la propagation des ruptures primaires et secondaires en surface du sol (plus de 350 km de déplacements observés en surface du sol pour le premier séisme avec des déplacements métriques et plus de 100 km observés pour le second séismes avec des déplacements permanents jusqu'à 8 m), à mieux quantifier les mouvements sismiques produits à proximité des failles (jusqu'à 2 g mesurés lors du premier séisme), mais aussi à améliorer



les règles d'urbanisme dans les régions traversées par de tels accidents.

Pour conduire ses études appliquées, Seister couvre l'intégralité de la chaîne de calcul de l'aléa. La première étape consiste à identifier et caractériser les sources sismiques en constituant par exemple des catalogues de sismicité, quitte à remonter très loin dans le temps en recherchant les traces laissées dans les sédiments par des séismes même très anciens, en mettant en évidence les modalités de déformation de la croûte terrestre, etc. Après l'identification des sources, une deuxième étape consiste à modéliser les mouvements sismiques, à prévoir comment ils peuvent être générés, leur fréquence, leur magnitude, leur intensité et à les caractériser dans leur complexité.

La troisième étape consiste à assembler toutes ces données - les probabili-

6- Cas rare de rupture de surface observée en Ardèche suite à l'occurrence du séisme du Teil du 11 novembre 2019 de magnitude Mw 4.9.

7- Poinçonnement des murs par les poutres des planchers, entraînant l'effondrement de l'étage.

8- Sortie hors plan d'un mur en maçonnerie non chaînée et non harpée de blocs.

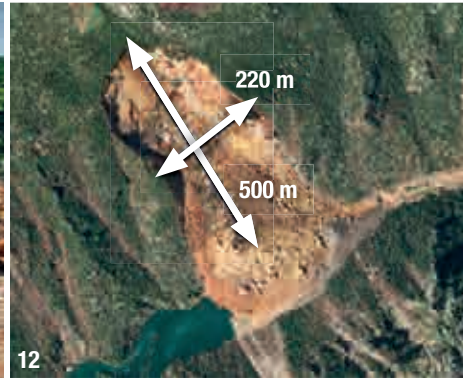
9- Déplacement latéral de 6 m dû au séisme d'Elbistan (Mw 7.5).

10- Rupture de surface suivie sur plus de 100 km de longueur, due au séisme d'Elbistan (Mw 7.5).

tés d'occurrence, les modèles prédisant les mouvements - pour aboutir à des modèles d'aléas intégrant la dimension probabiliste.

« Il se produit de nombreux séismes de faible magnitude. Les séismes de plus fortes magnitudes sont plus rares fort heureusement, poursuit David Baumont. On peut tenir compte de la probabilité d'occurrence des différents scénarios de rupture sismique dans les approches probabilistes, ce qui consti-





tue un des intérêts de ces approches. On peut également inclure dans nos analyses différentes interprétations qui peuvent coexister dans la communauté scientifique sur l'activité des failles par exemple. L'objectif étant de produire des évaluations d'aléas qui collent au plus près à l'état de la connaissance, ce qui explique que nous faisons une veille permanente sur les progrès de cette science. Dans ce domaine, il y a une forte porosité entre les progrès de la recherche et la pratique. »

En France, la plupart des études spécifiques de site sont conduites dans les zones de sismicité 3 et 4 du zonage, soit lorsque l'accélération normative à 475 ans de période de retour dépasse 0,1 g ou 1/m². La plupart des études sont conduites pour des installations à risque (centrales nucléaires, barrages, installations classées pour la protection de l'environnement, fermes éoliennes). Certains ouvrages courants peuvent être concernés. Christophe Martin évoque par exemple les études qu'il a conduites pour le Mucem à Marseille, le Grand stade de Lille, le tramway de Nice pour leur dimensionnement, ou le Palais des Festivals de Cannes, la cité

11 & 12- Glissement-éboulement de grande ampleur déclenché par le séisme de Kahramanmaras (Mw 7.8) sur la commune d'Islahiye, (220 m de large sur 500 m de long, environ 22 Millions de m³), ayant obstrué une vallée et généré un lac de 3 km de longueur.

13- Méga-glissement de terrain de Tepehan, déclenché par le séisme de Kahramanmaras.

14- Volcan de sable dû à la liquéfaction des sols.

administrative de Nice, les ponts autoroutiers de Perpignan pour leur vérification et leur renforcement au séisme. Les étapes et les composantes de l'activité de Seister commencent par la compilation et l'analyse de données multiples : structure du sous-sol et

de ses failles dans une vaste région, localisation et amplitude de leurs déformations. Comme il n'est pas possible de connaître directement la structure de la terre en profondeur, il est ainsi fait appel à des méthodes indirectes (e.g. prospections géophysiques, profils sismiques, tomographie électrique) afin de produire de l'imagerie depuis la surface, tout comme on le fait pour le corps humain, ce qui permet de déduire de manière indirecte les propriétés mécaniques du sol. Dans des cas favorables, il est possible de réaliser des tranchées au travers de failles pour déterminer comment les dépôts ont été affectés par son activité ce qui nous renseigne sur l'histoire de la déformation (âge, ampleur, direction des mouvements, traces subsistantes...).

« Il est par ailleurs nécessaire, précise Christophe Martin, de reconstituer l'histoire de la sismicité sur des périodes de temps aussi grandes que possible. Or les catalogues de sismicité remontent, pour les plus récents et très modestement, aux années 60 ; la connaissance dans ce domaine a fait un bond significatif à partir des années 80/90 avec la création de réseaux d'observatoires

de manière plus dense, ce qui permet d'affiner le seuil de détection. Mais, pour avoir une statistique plus robuste, il est nécessaire de remonter dans le temps. On distingue pour cela la période historique, qui couvre généralement quelques siècles et est fondée sur l'exploitation de témoignages humains, et la période préhistorique, elle-même composée de l'archéo-sismicité qui s'attache à l'étude de désordres observés sur des sites archéologiques que l'on essaie d'interpréter comme liés à des phénomènes d'origine tectonique, et de la paléosismicité qui permet de vérifier si les déformations géologiques observées en surface peuvent être dues à la propagation en proche surface de ruptures provoquées par les séismes. »

Seister s'emploie ainsi à caractériser les effets des séismes historiques, par exemple ceux provoqués par le séisme de Lambesc en 1909 dans le sud-est de la France. Les archives historiques sont également parcourues avec le plus de précision possible : recherche de témoignages de chutes de clocher, de fissurations de murs, réveil des populations même à grande distance par les vibrations et le bruit engendré - 300 km - comme ce fut le cas, par exemple, pour le séisme de Bouin dans le marais breton-vendéen en 1799. Les témoignages sont nombreux. En exploitant l'ensemble des caractéristiques de ces effets, il est possible de cartographier les effets d'un séisme même très ancien et d'en déduire sa localisation et sa magnitude.

Cette première démarche permet d'établir le potentiel sismogénique d'une faille, d'un volume de croûte, d'une zone. C'est un élément important à prendre en compte et que l'on caractérise en croisant les mesures qui mobilisent des compétences en géophysique et géologie, pour détecter des traces morphotectoniques, ainsi que des historiens pour trouver des traces dans les archives.

La deuxième démarche a pour objet, pour un séisme donné se produisant sur une faille, de prédire le mouvement, soit de manière empirique en s'appuyant sur des bases de données, soit par modélisation, à partir des propriétés de la croûte terrestre en termes d'atténuation, de structure..., du champ d'onde sismique au cours du temps. Sachant que les mouvements sismiques sont extrêmement sensibles aux propriétés des couches les plus superficielles, sont également modélisés ou pris en compte ce que l'on appelle des "effets de site".



15- Dommages très importants sur le milieu construit, en dépit d'un code de construction parasismique efficace, mais pas toujours appliqué : la faille passe entre le mur et les poteaux.

16- École à Hissa, traversée par la faille à la jonction entre les deux blocs d'une école.

17- Fronton écroulé d'une église à Iskenderun.

18- Destruction d'un habitat traditionnel en blocs de terre, paille et argile.



Certains sites sont en effet de nature à piéger les ondes en les modifiant en termes d'amplitude mais aussi de durée par un phénomène de résonance. Dans ce domaine, Seister combine de multiples compétences en instrumentation de site, physique, mathématique appliquée et traitement des enregistrements de données, en combinant des approches empiriques et des modélisations.

C'est seulement à partir du moment où ces deux domaines - identification et caractérisation des sources sismiques et prédiction du mouvement sismique - sont couverts qu'il est possible de faire des estimations de l'aléa en tenant compte du lieu d'occurrence des séismes et de leurs effets. Cette quantification se fait au travers de modèles déterministes ou probabilistes, selon les réglementations ou prescriptions applicables, en prenant en compte une grande diversité d'incertitudes. Chaque modèle d'aléa tient ainsi compte de multiples hypothèses scientifiquement fondées, qui sont gérées en ayant recours à des arbres logiques, chaque branche d'un arbre correspondant à une hypothèse particulière relative à chaque paramètre d'entrée au calcul d'aléa.

SURVEILLANCE SISMIQUE

Les services de Seister couvrent l'ensemble des éléments qui contribuent à la caractérisation de l'aléa sismique. Des moyens de mesure lui permettent de réaliser les investigations géophysiques de site dont elle a besoin pour caractériser les paramètres du sous-sol. Il en est de même au niveau de la surveillance sismique, conçue pour

répondre à deux objectifs. Le premier correspond à l'acquisition de données dont l'exploitation est destinée à fiabiliser les modèles de propagation des ondes. Ces données permettent de mieux caractériser la source sismique, le trajet entre la source et le site, et la

réponse du site lui-même. Le second est relatif à l'alerte sismique et à la mise en repli éventuelle de l'installation concernée, quelle que soit sa nature : usine de type Seveso, barrage hydro-électrique, centrale nucléaire, bâtiment industriel... Un mouvement sismique

est toujours caractérisé par des ondes primaires et des ondes secondaires. En général, ce sont les ondes secondaires (ondes S) qui sont les plus destructrices. Lorsqu'un séisme se produit à proximité d'un site industriel sensible, on dispose d'un certain laps de temps entre la détection des premières secousses et l'arrivée des ondes S pour, par exemple, fermer des vannes. Les stations d'enregistrement installées par Seister permettent de détecter les ondes primaires dans les trois directions. Elles sont reliées à un automate qui contrôle le bon fonctionnement des capteurs et déclenche les mesures de sécurité à prendre dès que le seuil d'alerte envoyé par la station est atteint. Le laps de temps pour l'envoi d'un ordre de mise en repli est de l'ordre d'une fraction de seconde.

DES CERTIFICATIONS CLÉS

Seister est certifiée ISO 9001 :2015.

Elle dispose également d'une certification du Ministère de l'Environnement relative aux sites d'installations classées pour la protection de l'environnement qui constitue un agrément pour la réalisation d'études d'évaluation de l'aléa sismique conformes à l'arrêté du 15/02/2018 (sites SEVESO).

Cet agrément permet d'effectuer des études sur ce type de sites et dans un marché concurrentiel, Seister a mené de nombreux projets : le couloir de la chimie de la Vallée du Rhône, les installations industrielles de l'étang de Berre et de Fos-sur-Mer, les complexes industriels du Bec d'Ambès, l'ensemble des sites de TotalEnergies et d'Arkema en France, tous les sites du bassin industriel (Haut-Rhin/Bas-Rhin), les sites industriels du Nord-Aquitaine.

Seister dispose également du statut JEI (Jeune Entreprise Innovante) délivré par le Ministère de l'Économie en 2020.

des sols et permettent de constituer une base de données de référence afin d'optimiser la disposition la plus judicieuse du système et éviter tout déclenchement intempestif de l'alerte.

« Dans ce domaine, poursuit David Baumont, la technique a d'ailleurs évolué de façon significative. Auparavant, les capteurs étaient utilisés essentiellement pour enregistrer les phénomènes sismiques lorsqu'ils se produisaient. Désormais, un intérêt est également porté aux vibrations ambiantes permanentes que connaissent tous les sols. L'analyse de



19
© SEISTER

19- Destruction d'immeuble lié au non-respect de l'application du code parasismique.

20- Instrumentation permanente de site, pour acquérir des données permettant de mieux caractériser la réponse sismique de site et fiabiliser les modèles prédictifs.

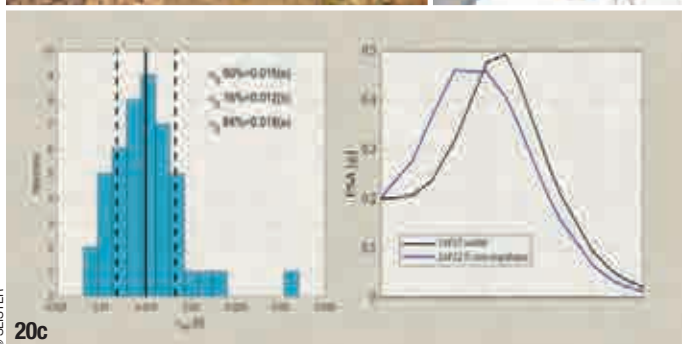
21- Campagne de mesures géophysiques permettant d'acquérir les informations nécessaires à l'estimation de la réponse sismique des sols et l'identification de zones présentant un comportement particulier sous séisme.



20a



20b



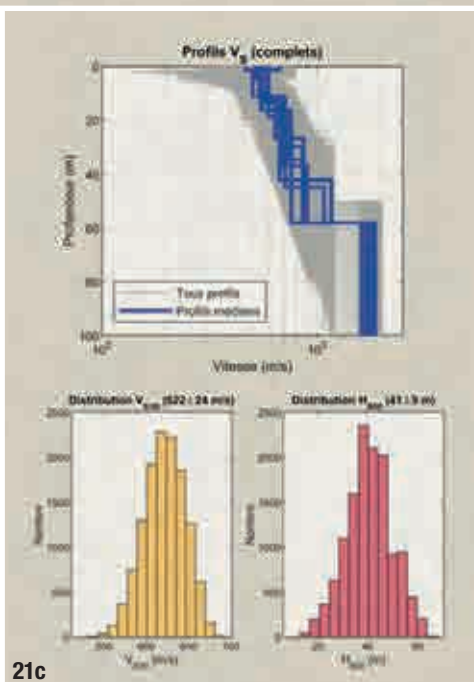
© SEISTER
20c



21a



© SEISTER
21b



21c

ces vibrations ambiantes a fait évoluer considérablement la technique d'analyse des mouvements du sol. »

Les stations installées sur les sites peuvent être complètement autonomes, y compris en énergie, et pilotables à distance. C'est le cas, par exemple, des stations installées sur les sites d'Arkema à Lacq et Mont, dans les Pyrénées Atlantiques.

Pour certaines exploitations, les industriels font le choix d'installer des réseaux de capteurs en surface mais également à grande profondeur (jusqu'à -500 m) afin de prévenir au mieux des mouvements éventuellement à risque que pourrait connaître le sous-sol et réduire ainsi les incertitudes des modèles prédictifs.

Ces réseaux de capteurs extrêmement sensibles enregistrent des séismes à toutes distances, locaux (50/60 km) de faible magnitude ou très éloignés un peu partout dans le monde pour les séismes de plus forte magnitude. Ces enregistrements renseignent sur la manière dont se comporte le milieu géologique sous sollicitation sismique, ce qui contribue à prédire plus aisément les mouvements en profondeur et à consolider l'état des connaissances.

DES DONNEURS D'ORDRE MULTI-ACTIVITÉS

L'activité de Seister se répartit globalement à 60% en France et 40% à l'exportation.

Le domaine du nucléaire en représente 20% (centrales nucléaires, stockage de déchets nucléaires, Small Modular Reactor).

Tout ce qui concerne les installations critiques hors centrales nucléaires (usines chimiques, usines Seveso) s'élève également à 20%.

Il en est de même pour l'énergie autre que nucléaire - barrages, fermes éoliennes, champs géothermiques avec 20%.

Le pétrole et le gaz (plateformes pétrolières offshore, terminaux gaziers, sites de dépôt offshore, pipelines) s'élèvent à 15%.

Les infrastructures tels que les ports, les ouvrages portuaires et les grands ouvrages d'art, représentent 10%.

Les constructions considérées comme stratégiques ou ayant une fonction particulière soit de sécurité civile, soit patrimoniale, telles que les aéroports, les nouveaux hôpitaux, les nouveaux musées, les nouveaux stades (Stade de Lille, par exemple, avec des problématiques particulières) atteignent 5%. ▷

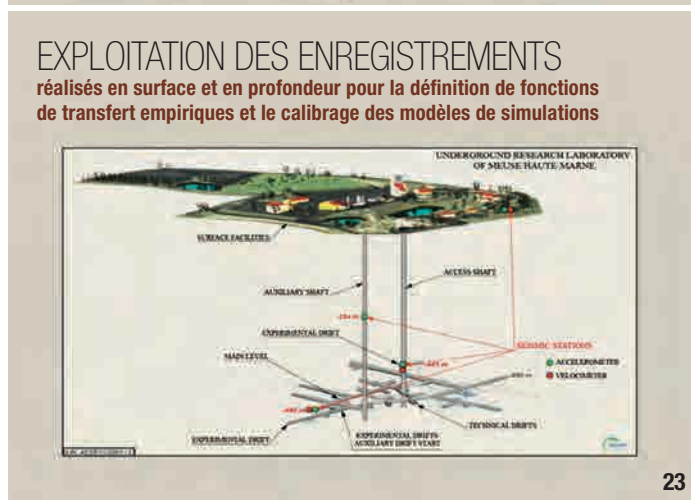
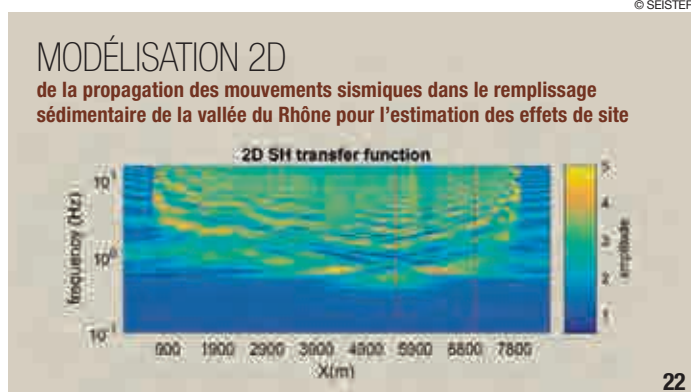
On peut souligner ici que l'évolution de la norme NF EN -1998 autorisera plus systématiquement à l'avenir le recours à des évaluations spécifiques d'aléa sismique.

Dans l'ensemble de ces domaines, Seister travaille avec tous les grands donneurs d'ordre nationaux ou privés en France (Andra, Arkema, Artelia, CEA, Compagnie Nationale du Rhône, EDF, EGIS, Eiffage, Orano, Suez, Solvay, TotalEnergies, Tractebel Engineering...), pour n'en citer que les plus importants, mais aussi à l'étranger (Fugro aux Pays-Bas, EUAS (Elektrik Üretim Anonim Şirketi) en Turquie, Geo ZS en Slovénie, Rio Tinto (groupe minier anglo-australien), etc.), ainsi que certaines start-up spécialisées dans les SMR (Small Modular Reactor) ou les micro- SMR.

« En France, nous travaillons avec pratiquement tous les opérateurs dans le domaine de l'énergie et de l'électricité ainsi qu'avec les grands groupes de l'industrie chimique, les compagnies hydro-électriques. Actuellement, pour le compte de la CNR, nous fournissons les mouvements sismiques pour les ouvrages qui ont été construits sur le Bas-Rhône et le Haut-Rhône dans les années 60 à 70 afin d'en vérifier le comportement dynamique sous sollicitation sismique. De telles actions sont réalisées également dans de nombreux pays à l'étranger. L'une des opportunités que nous avons eues à la création de Seister est d'avoir su garder la confiance de nombreux clients avec lesquels nous avons tissés des liens privilégiés à l'époque où nous étions chez Geoter, qui n'existe plus aujourd'hui. Cette marque de confiance se poursuit et est pour nous valorisante, traduisant la qualité des services que l'on fournit à nos clients. »

L'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), notamment, est un partenaire tout autant qu'un client. Elle soutient le développement de Seister et lui fait confiance car elle partage le même souci de faire progresser les connaissances et les pratiques pour l'évaluation de l'aléa sismique.

Seister participe ainsi à Cigéo, le projet français de l'Andra de stockage profond de déchets radioactifs, situé dans la partie Est du Bassin parisien, un environnement géologique très stable caractérisé par une très faible sismicité. Afin de quantifier l'aléa sismique à différentes périodes de retour et à plusieurs profondeurs, les données collectées aux stations



sismiques sur site sont traitées afin de calculer les fonctions de transfert empiriques.

Les données collectées et le profil du sol sont utilisés pour développer des facteurs d'ajustement spécifiques au site.

R & D : LA CLÉ DE LA PÉRENNITÉ

La Recherche & Développement représente 10 % de l'activité de Seister. Compte-tenu de ce qui vient d'être présenté, notamment à propos de l'évolution permanente des connaissances en matière de sismologie, elle s'avère

22- Modélisation 2D de la propagation des mouvements sismiques dans le remplissage sédimentaire de la vallée du Rhône pour l'estimation des effets de site.

23- Exploitation des enregistrements réalisés en surface et en profondeur pour la définition de fonctions de transfert empiriques et le calibrage des modèles de simulations.

essentielle tant pour la pérennité de l'entreprise que pour sa crédibilité. Elle se manifeste dans deux directions : en prestation directe pour ses clients, en auto-financement pour faire évoluer constamment les outils qu'elle a développés.

En effet, certains des clients de Seister font appel à elle pour traiter des sujets qui relèvent de la R & D afin d'améliorer les méthodes de quantification des mouvements ou interpréter les enregistrements issus de réseaux de capteurs.

« L'une des composantes importantes de l'entreprise, précise Christophe Martin, est qu'elle assure la maîtrise complète de ses outils de calcul. La plupart des logiciels "métier" sont développés en interne et sont vérifiés, validés et répondent aux critères de fiabilité exigés par les clients intervenant dans les domaines ultra-réglementés que sont en particulier le nucléaire, le chimique et l'Oil & Gas. »

L'appropriation de ses outils, au travers de leur développement, est presque l'unique manière de prendre en compte les évolutions techniques de la sismologie. Elle permet également à Seister de les affiner à l'extrême afin de permettre une implémentation fiable avec des temps de calcul optimisés. « Dans ce cadre, nous participons à un benchmark international entre praticiens organisé par l'AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique) sur l'évaluation de la probabilité de l'aléa "rupture de surface" au cours d'un séisme afin de consolider la pratique en la matière. »

Seister a été invitée pour intégrer ce groupe qui a pour objectif d'intercomparer les calculs avec différents outils et à challenger les méthodes mises en œuvre. Cela a permis d'améliorer significativement les pratiques sur des sujets assez complexes et, finalement,

SEISTER : CATALOGUE DES PRESTATIONS

- Évaluation probabiliste des mouvements sismiques (PSHA).
- Évaluation probabiliste de l'aléa rupture en surface (PFDHA).
- Évaluation déterministe de l'aléa sismique (DSHA).
- Conduite de programmes de recherche et développement.
- Investigation et caractérisation de site.
- Évaluation et cartographie des aléas naturels.
- Identification des sources sismiques et tsunamigéniques.
- Caractérisation de l'activité des failles actives ou capables.
- Constructions de modèles sismotectoniques.
- Caractérisation géologique des sites.
- Développement de catalogues de sismicité.
- Réponse dynamique des sols (méthodes empiriques, modélisation).
- Acquisition et traitement des enregistrements.
- Définition des mouvements sismiques de dimensionnement.
- Microzonages sismiques, Plans de Prévention des Risques.
- Surveillance sismique et accélérométrie.
- Sismicité induite et risques induits.
- Tierce-expertises et de revues techniques.
- Développement d'outils de calcul.

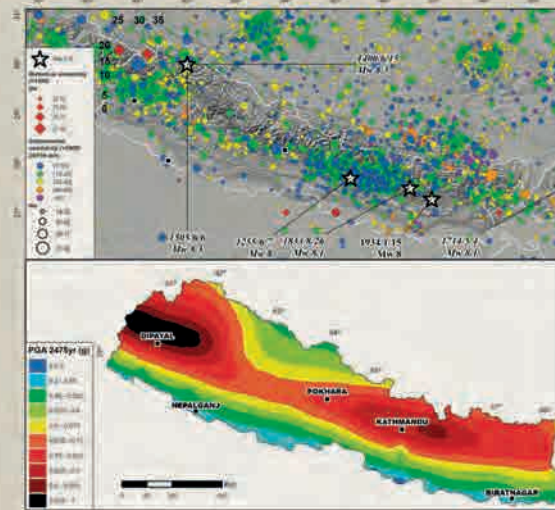
assez nouveaux. Cette participation a nécessité de notre part un investissement significatif. »

Le projet METIS (METHodologies and TOOLS' Innovation for Seismic safety assessment - 2020-2024) auquel participe Seister, a pour objectif l'amélioration des approches probabilistes sur les trois composantes du risque sismique : aléa, vulnérabilité et conséquences. L'aléa prédit des paramètres qui caractérisent les effets du séisme par rapport aux mouvements du sol tandis que le risque quantifie les probabilités d'observer les conséquences.

« La contribution de Seister dans le projet METIS, précise David Baumont, était d'essayer d'améliorer la prédiction du mouvement sismique au rocher en champ libre (surface) afin de définir des mouvements de référence. Ces mouvements de référence sont ensuite utilisés pour modéliser la réponse de la géologie de surface aux sollicitations sismiques, on parle alors d'effets de site. La caractérisation des mouvements de référence au rocher dur est une problématique délicate car les enregistrements dont on dispose sur de telles conditions sont très peu nombreux. L'essentiel des bases de données qui ont été constituées ne concernent pas des conditions de rocher dur. »

D'une manière générale, Seister est également impliqué dans différents groupes de travail mis en place par des organismes français et internationaux pour faire évoluer les réglementations ou recommandations techniques en lien avec l'état de l'art de la connaissance

NOUVEAU ZONAGE SISMIQUE DU NÉPAL RÉALISÉ PAR SEISTER EN 2023



24

© SEISTER

24- Nouveau zonage sismique du Népal réalisé par Seister en 2023, publié dans Géosciences (Maharjan et al., 2023). Carte des accélérations maximales du sol à 2475 ans de période de retour.
25- Expérience de Seister en France et à l'étranger.

scientifique : AFPS (Association Française du Génie Parasismique), AIEA, AFNOR (action sismique). Seister participe également à des panels d'experts internationaux en charge de faire des revues des études d'aléa (PPRP), ce qui lui confère une reconnaissance internationale. Seister participe ainsi actuellement au panel d'experts étudiant le premier projet d'énergie nucléaire en Arabie Saoudite, et à celui en charge de la révision et mise à jour sur les sites de production d'armes nucléaires au royaume uni.

LA FRANCE MAIS AUSSI LE GRAND EXPORT

Les sismologues de Seister interviennent sur l'ensemble du territoire français (e.g. métropole, Antilles françaises) partout où des installations industrielles sensibles ou les infrastructures essentielles peuvent être soumises à des aléas sismiques.

« En France, la zone axiale des Pyrénées occidentales a un taux d'activité sismique crustale supérieur à ce qu'il est aux Antilles. Même si cela concerne une zone relativement peu urbanisée, une ville telle que Lourdes, par exemple, est relativement exposée, plus, selon moi, que ne peut l'être Nice ou la Côte d'Azur, indique Christophe Martin. »

Leur action s'exerce également dans le monde dans les pays - et ils sont nombreux - où les risques sismiques sont connus. L'Afrique, le Moyen-Orient, l'Asie Pacifique, à l'exception du Japon constituent des terrains d'action privilégiés. Cette action s'exerce dans des contextes sismotectoniques et des environnements extrêmement différents.

« La Papouasie-Nouvelle Guinée, notamment, indique David Baumont, est l'un des endroits probablement parmi les plus complexes au monde en termes de géodynamique, ce qui implique de mettre en œuvre des outils, des méthodes, des connaissances qui sont très spécifiques. Certains endroits sont extrêmement actifs, d'autres le sont peu, ce qui nécessite d'ajuster pour chaque environnement les stratégies d'analyse et d'étude et les recommandations que l'on peut être amené à faire. »

Les fondateurs de Seister ont mené des projets qui se sont concrétisés en Allemagne, en Pologne, en Russie, en Iran, au Tadjikistan, en Amérique du Sud (Argentine, Colombie, Pérou).

Elle cumule une expérience unique mise au service de clients fidélisés car elle leur apporte conseil, expertise et études de haut niveau technologique dans l'ensemble des domaines liés à la quantification des aléas et des risques géologiques et sismiques pour le dimensionnement d'ouvrages nouveaux ou pour la vérification d'ouvrages existants.

Une collaboration étroite existe d'ailleurs entre Seister et ses partenaires nationaux et internationaux permettant de gérer tous les sujets transverses de la quantification et de la réduction des risques sismiques, dans le cadre de projets industriels, d'aménagements majeurs et de zonages sismiques territoriaux. □

EXPÉRIENCE DE SEISTER EN FRANCE ET À L'ÉTRANGER



© SEISTER

25



© CÉDRIC HESELY

PARKING SOUTERRAIN FOCH À SAINT-JEAN-DE-LUZ - LE TWINSOIL® S'ATTAQUE AU FLYSCH DE LA CÔTE BASQUE

AUTEURS : GUILLAUME BARROIS, INGÉNIEUR PROJET, SOLETANCHE BACHY FRANCE -
AXEL TERLAUD, RESPONSABLE D'ANTENNE, SOLETANCHE BACHY FRANCE

LE PARKING SOUTERRAIN DE L'ÎLOT FOCH, SITUÉ SUR LE PORT DE SAINT-JEAN-DE-LUZ, VA CRÉER 427 PLACES RÉPARTIES SUR 5 NIVEAUX. L'OBJECTIF EST D'AUGMENTER L'OFFRE DE STATIONNEMENT ET DE LAISSER PLACE LIBRE AUX AMÉNAGEMENTS DE SURFACE. SOLETANCHE BACHY FRANCE A PROPOSÉ ET MIS EN ŒUVRE DES SOLUTIONS TECHNIQUES ADAPTÉES AUX ENJEUX DU PROJET EN DÉPLOYANT NOTAMMENT SON NOUVEL OUTILLAGE TWINSOIL® POUR ANCRER LES FONDATIONS DANS LE FLYSCH, SUBSTRATUM ROCHEUX DE LA CÔTE BASQUE (ALTERNANCE DE BANCS DE GRÈS ET DE MARNES).



© CÉDRIC HELSLY

LE PROJET

Situé au centre de Saint-Jean-de-Luz, le parking souterrain Foch s'inscrit dans un programme global d'aménagement visant à réorganiser le secteur entre le boulevard Victor-Hugo, le port et la gare (figure 2). À terme, il sera totalement recouvert, laissant place à un espace piéton arboré. Sa construction va permettre de créer 427 places de stationnement réparties sur 5 niveaux.

1- Terrassement à l'intérieur de l'ouvrage.

2- Forage de la paroi moulée.

1- Earthworks inside the structure.

2- Drilling the diaphragm wall.

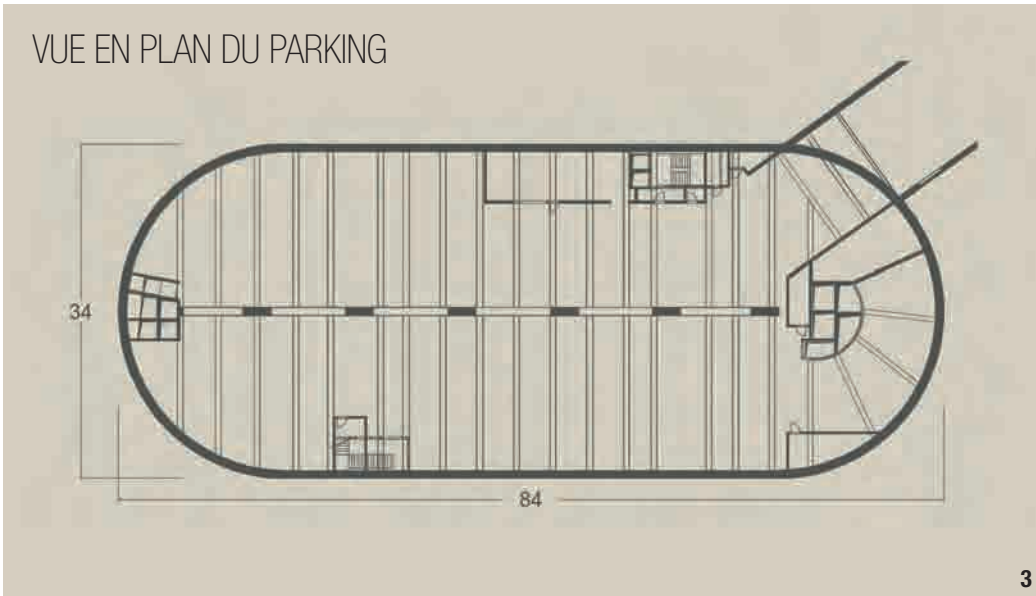
Soletanche Bachy France est en charge de la réalisation de la paroi périphérique, des barrettes de fondation de la file centrale et de la mise en œuvre des ouvrages de rabattement en phase provisoire de travaux.

Les dimensions du parking sont d'environ 34 m par 84 m (figure 3), allouant environ 2400 m² de plancher par niveau, pour une profondeur terrassée de 17 m.

LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

Le flysch (figure 4) qui constitue le substratum est largement visible le long des falaises de la côte basque. C'est une roche sédimentaire datant du Crétacé, composée d'une alternance de bancs de grès (roche dure de Rc = 100 à 150 Mpa) et de marnes. Le substratum, dont le toit est variable, ▷

VUE EN PLAN DU PARKING



3- Vue en plan du parking.
4- Flysch affleurant sur les falaises de la côte basque.
5- Terrassement dans les sables au moyen d'un trax.

3- Plan view of the car park.
4- Flysch outcropping on the cliffs of the Basque coast.
5- Earthworks in the sands using a shovel excavator.

est surmonté d'environ 30 m d'alluvions constituées par des sables à passages argileux et vasards, puis par des sables propres (figure 5) et des remblais en tête.

Le niveau de la nappe, qui fluctue avec la marée, se situe à environ -3 m/TN.

CONCEPTION

Soletanche Bachy France a mobilisé son ingénierie dès la phase de concep-

tion, afin de partager son expérience avec ses partenaires et proposer des optimisations. On notera en particulier :

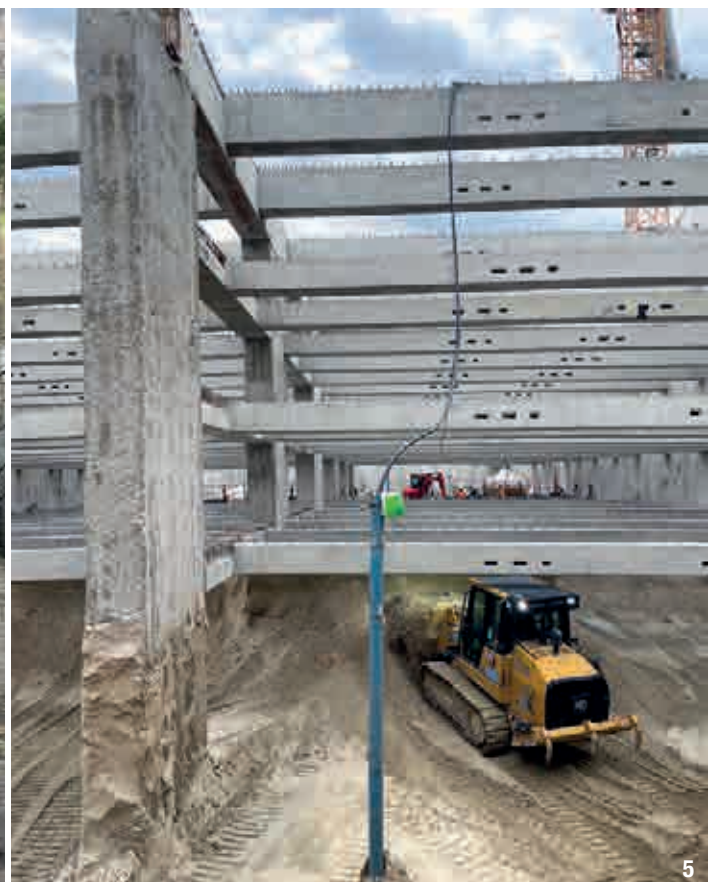
→ Adapter une forme de type "hippodrome" (figure 6) avec des extrémités circulaires pour bénéficier de l'effet voûte et notamment pour s'affranchir du butonnage provisoire dans ces zones. Ces zones d'extrémités exemptes d'ouvrage en phase provisoire améliorent l'organisation

du chantier et permettent notamment la réalisation du génie civil à ciel ouvert, ce qui est moins contraignant.

→ Intégrer des barrettes centrales de fondation dans l'ouvrage, permettant ainsi d'avoir des porteurs verticaux déjà réalisés avant les terrassements.

→ Construire les poutres de structure du parking en béton armé

au fur et à mesure des terrassements (figure 7), pour butonner les parois moulées et ainsi éliminer les phases de pose et de dépose de butons métalliques provisoires. Cette conception a également permis de supprimer les appuis intermédiaires entre places de stationnement (poteaux) offrant plus de confort lors de l'exploitation du parking.



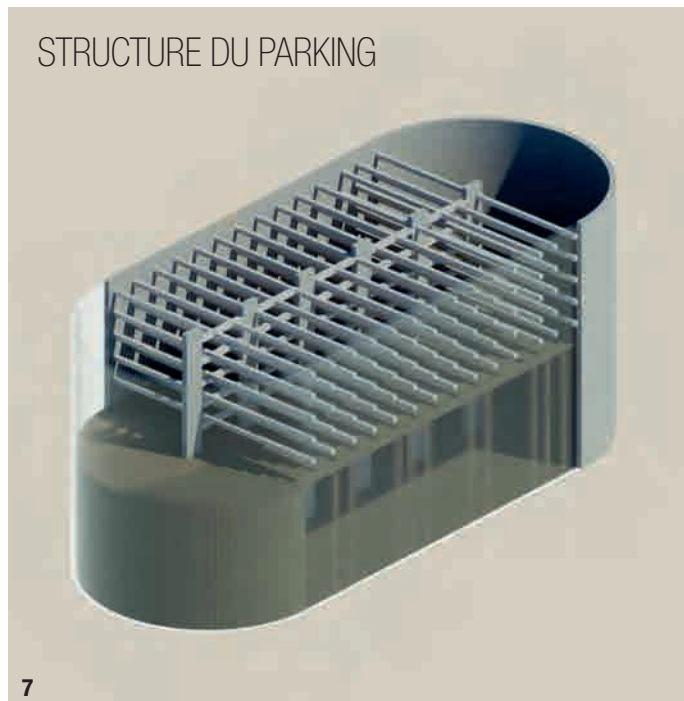


© CÉDRIC HELSLY
6

→ Retenir une solution de type radier drainant (figure 8), afin de s'affranchir des micropieux d'ancrage et d'une section béton armé plus importante. L'eau résiduelle d'exhaure est simplement collectée en sous-face du radier par un réseau de drains (Draintube Afiteixinov), puis relevée pour être renvoyée vers le réseau ; aucune sous-pression ne sollicite ainsi le radier (à l'image d'un dallage).

Cette dernière disposition technique nécessite toutefois de maîtriser l'ancrage de la paroi moulée dans le substratum calcaire (flysch) pour limiter les débits d'exhaure aux seuils de la réglementation (200 000 m³/an, soit environ 22,8 m³/h).

Les équipes de Soletanche Bachy ont été sollicitées dès la conception, permettant ainsi de développer, puis de mettre en œuvre sur le chantier des solutions techniques optimisées pour



7
© SOLETANCHE BACHY

STRUCTURE DU PARKING

6- Vue aérienne - forme en "hippodrome".

7- Structure du parking.

8- Préparation du radier drainant.

6- Aerial view - "racecourse" shape.

7- Structure of the car park.

8- Preparation of the draining foundation raft.

construire mieux avec moins, et ainsi participer activement à la réduction de notre empreinte carbone.

OUTILLAGE TWINSOIL® POUR RÉALISER L'ANCRAGE

Pour constituer une coupure hydraulique maîtrisée, les études hydrogéologiques ont conclu à la nécessité de réaliser un ancrage minimum de 1 m dans le substratum.

La variabilité du toit et les bonnes caractéristiques mécaniques du substratum ont conduit à déployer le nouvel outillage Twinsoil® développé par le service matériel de l'entreprise.

Le concept de ce nouveau procédé repose sur la capacité d'équiper sur une même grue deux outillages complémentaires et interchangeables rapidement sur le chantier, en fonction des terrains à traverser (figure 9) :

→ Une poche de benne hydraulique KS ;

→ Un outillage Twinsoil® disposant de moteurs d'Hydrofraise sur lesquels sont montés des tambours circulaires munis en périphérie de pics (figure 10) pour traverser les terrains indurés.



© CÉDRIC HELSLY
8

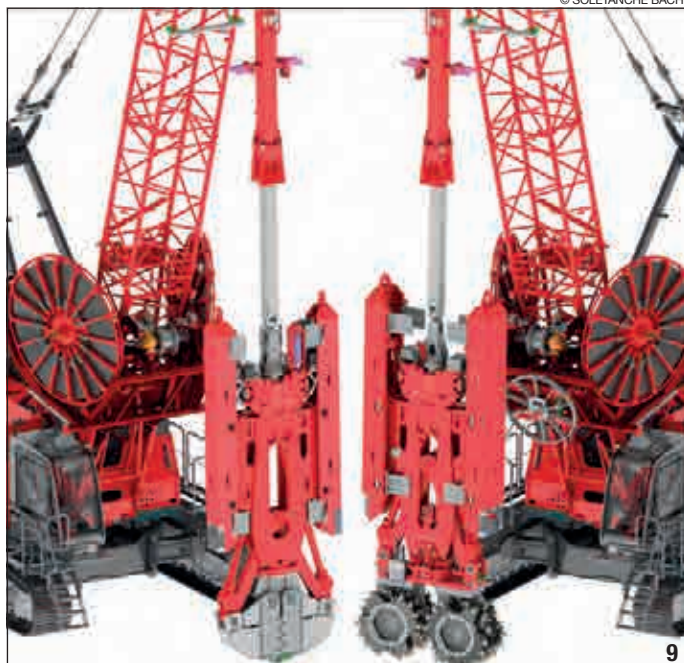
L'emploi de ce nouvel outillage permet de traverser sur de petites épaisseurs des bancs indurés ou blocs, mais aussi de créer un ancrage, sans pour autant mobiliser une Hydrofraise ni recourir à la solution de trépannage générant chocs et vibrations proscrits en contexte urbain.

**LES TRAVAUX
CAMPAGNE DE RECONNAISSANCES COMPLÉMENTAIRES**

Pour affiner la position du toit du substratum sur le tracé de la paroi moulée et caractériser avec précision en laboratoire les terrains alluvionnaires situés sous le fond de fouille, une campagne complémentaire de reconnaissance géotechnique, comprenant des essais pressiométriques et des sondages carottés, a été lancée dès janvier 2022.

**RÉALISATION
DE LA PAROI MOULÉE**

À partir de la plate-forme de travail du chantier, et une fois les purges des fondations et des réseaux existants exécutées, la paroi périmétrique a été réalisée (figure 11).
D'avril à juillet 2022, une benne hydraulique KS a été mobilisée en deux postes de production pour réaliser



9



10

les 28 panneaux et 6 barrettes du projet, soit environ 7000 m² (figure 12). La paroi moulée, d'une épaisseur de 80 cm, est descendue à 33 m de profondeur environ dans le substratum pour un fond de fouille à 17 m. Compte tenu des très bonnes caractéristiques mécaniques du terrain d'ancrage (flysch), l'ancrage d'environ 1 m a été réalisé avec l'outillage Twinsoil® ; à l'image de l'Hydrofraise, il est muni de deux moteurs qui entraînent les tambours dotés de pics servant à rogner le terrain (figure 13).

- 9- Outillages interchangeables benne KS et Twinsoil®.
- 10- Outillage Twinsoil® muni de pics.
- 11- Emprise de chantier.

- 9- KS bucket and Twinsoil® interchangeable tools.
- 10- Twinsoil® tool fitted with picks.
- 11- Area covered by the project.



11



12

© CÉDRIC HELSLY

Le forage des panneaux s'est déroulé comme suit :

- Forage à la benne hydraulique KS jusqu'au toit du substratum, jusqu'au refus pour extraire la frange altérée (figure 14) ;
- Remplacement de la benne par l'outil Twinsoil® (figure 15), pour le forage dans la roche jusqu'à atteindre la cote du fond de panneau ;

12- Benne hydraulique KS.
13- Outillage Twinsoil®.

12- KS hydraulic bucket.
13- Twinsoil® tool.

→ Les outils sont une nouvelle fois interchangeés pour extraire les cuttings et nettoyer le fond du panneau. En effet, contrairement à l'Hydrofraise, le Twinsoil® ne dispose pas de pompe d'aspiration au-dessus des tambours, qui permettrait de remonter les cuttings mélangés à la boue. L'Hydrofraise nécessite toutefois une centrale de traitement beaucoup plus importante. Le Twinsoil®, outillage complémentaire

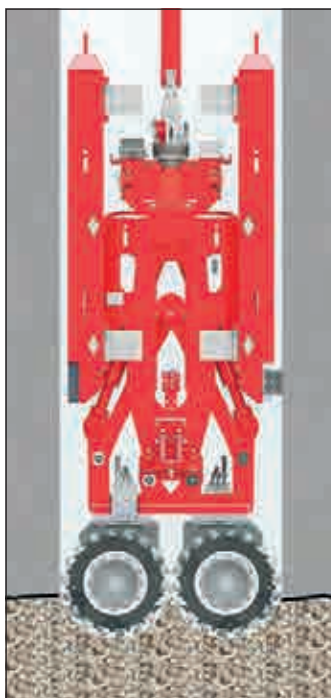
de la benne hydraulique, a permis de réaliser l'ancrage des 28 panneaux et des 6 barrettes, en douceur, sans recourir à la solution de trépannage. Au-delà de la diminution des nuisances que peut engendrer cette solution, le terrain est foré selon le gabarit de l'outil, limitant ainsi fortement les sur-excavations dues à l'arrachage de blocs. Les excroissances sont ainsi supprimées, diminuant fortement le risque de contournement du béton qui peut entraîner des difficultés de forage sur les panneaux secondaires.

Les panneaux sont ensuite équipés de leurs cages d'armatures et bétonnés. Au final, pas moins de 300 t d'acier et 5500 m³ de béton ont été nécessaires. Le chantier étant situé en plein centre-ville, des bâches acoustiques ont été installées sur la centrale de traitement des fluides de forage, afin de limiter au maximum les nuisances sonores.

Malgré les difficultés rencontrées pour l'approvisionnement des armatures, notamment liées au conflit en Ukraine, la démobilitation des équipes et le repliement se sont effectués avant la trêve estivale marquant la fin des travaux spéciaux.

RABATTEMENT DE LA NAPPE ET ESSAIS

La nappe se situant à environ 3 m/TN et le fond de fouille à environ 17 m/TN, un dispositif de rabattement est nécessaire pour mettre la fouille hors d'eau avant le démarrage des terrassements. ▢



13a Substratum rocheux

© SOLETANCHE BACHY



13b

© SOLETANCHE BACHY



© SOLETANCHE BACHY



© SOLETANCHE BACHY

14- Benne hydraulique KS et Twinsoil®.
15- Outillage Twinsoil®.
16- Barrette centrale et réseau de poutres butonnantes.

14- KS hydraulic bucket and Twinsoil®.
15- Twinsoil® tool.
16- Central barrette and staying beam system.

Il comporte 7 puits provisoires répartis sur la surface de la fouille et des piézomètres extérieurs pour suivre le niveau de la nappe. Ces ouvrages ont été forés depuis la plate-forme de travail avant le début des terrassements.

Au cours du mois d'août 2023, un essai de rabattement a été mené (objectif de rabattement fixé sous le niveau du fond de fouille). Cet essai a été concluant,

puisque le débit mesuré se situe autour de quelques m³/h (bien en-deçà des objectifs fixés) confortant ainsi le choix du mode constructif du radier.

LES TERRASSEMENTS

Les terrassements ont été lancés à partir du mois de septembre 2023. Les terrassements ont été réalisés par passes de 3 m environ, correspondant

à chaque niveau de poutres, et ainsi de suite jusqu'au fond de fouille.

Ces travaux ont été menés à l'aide d'une pelle caméléon positionnée dans les lobes circulaires (figure 1) pour remonter et évacuer les déblais rassemblés par un trax circulant dans la fouille sous le réseau des poutres. Au total, près de 40 000 m³ de matériaux ont été évacués, principalement des sables.

LA RÉALISATION DES POUTRES BUTONNANTES

Parallèlement à la réalisation des terrassements, les poutres butonnantes de la structure du parking ont été coulées en place, niveau par niveau, à l'aide d'un outil coffrant.

Ces poutres, essentielles à la bonne tenue des parois moulées, assurent une double fonction :



© SOLETANCHE BACHY



© CÉDRIC HELSLY



© SOLETANCHE BACHY
17

- Butonnage provisoire et définitif de la paroi moulée (complété par les planchers en phase définitive) ;
- Structure porteuse des niveaux de parking.

Elles ont été calepinées en collaboration avec le bureau d'études structure de l'entreprise de gros œuvre partenaire.

À chaque cage de paroi moulée correspond une poutre, permettant de s'affranchir d'une lierne périphérique en béton armé.

Le fond de fouille a été atteint en février 2023, après la réalisation des 140 poutres de 15,5 m environ.

Dans les extrémités circulaires de l'ouvrage, les parois moulées bénéficient de la rigidité cylindrique et sont donc autostables. Dans ces zones, les travaux se font à ciel ouvert en remontant depuis le fond de fouille.

INSTRUMENTATION DE LA PAROI MOULÉE ET SUIVI DU RABATTEMENT PROVISOIRE

Quatre inclinomètres ont été mis en place dans la paroi moulée avant les

17- Gros œuvre du niveau finalisé.

17- Fabric of the completed level.

terrassements pour suivre les déformations.

Le dispositif a été complété par la mise en place de cibles topographique positionnées sur la paroi moulée, au fur et à mesure des terrassements.

Le débit d'exhaure est également suivi pendant toute la durée des terrassements.

Les valeurs mesurées sont comparables à celles constatées lors de l'essai de rabattement (débit de l'ordre de quelques m³/h).

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROI MOULÉE ET BARRETTES : 7 000 m²
BÉTON PAROI MOULÉE : 5 500 m³
ACIER PAROI MOULÉE : 300 t
TERRASSEMENTS : 40 000 m³
POUTRE-BUTON EN BÉTON ARMÉ : 140 u

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Groupe Indigo
MAÎTRE D'ŒUVRE : Betem Ingénierie
BUREAU DE CONTRÔLE : Bureau Veritas
GÉOTECHNICIEN G4 : Ginger
ENTREPRISES : groupement Soletanche Bachy France / Eiffage Construction Sud Aquitaine (mandataire)
SOUS-TRAITANT GÉOTECHNICIEN : Geotec

TRAVAUX DE GROS ŒUVRE

Les terrassements achevés laissent apparaître le "squelette" de la structure porteuse du parking composé d'un réseau de poutres s'appuyant sur la paroi périphérique et la file de barrettes centrales (figure 16).

Les travaux de gros œuvre se sont poursuivis jusqu'au mois de juin 2023, avec la réalisation du radier drainant, des élévations (voiles de rampes et des cages) et des planchers sur prédalle (figure 17).

Les dalles ont ainsi été réalisées en remontant depuis le niveau de sous-sol 5 jusqu'à la réalisation de la dalle de couverture.

Les travaux se poursuivent jusqu'à la fin de l'année 2023 avec les corps d'état secondaires. □

ABSTRACT

FOCH UNDERGROUND CAR PARK AT SAINT-JEAN-DE-LUZ - TWINSOIL® TACKLES THE FLYSCH OF THE BASQUE COAST

GUILLAUME BARROIS, SOLETANCHE BACHY FRANCE - AXEL TERLAUD, SOLETANCHE BACHY FRANCE

Soletanche Bachy France executed the foundations of the Foch underground car park at Saint-Jean-de-Luz. The 84x34 m structure 17 metres deep has 427 parking spaces spread over five basement levels. The geological and hydrogeological environment required the construction of a peripheral diaphragm wall and foundation barrettes anchored in the rocky substratum formed of flysch, at a depth of more than 30 metres. To achieve this anchoring, essential for the creation of a cutoff, the new Twinsoil® tool was deployed in addition to the KS hydraulic bucket reserved for shallow ground drilling. This design simplifies construction and allows optimal operation. □

PARKING SUBTERRÁNEO FOCH EN SAN JUAN DE LUZ - EL TWINSOIL® PERFORA EL FLYSCH DE LA COSTA VASCA

GUILLAUME BARROIS, SOLETANCHE BACHY FRANCE - AXEL TERLAUD, SOLETANCHE BACHY FRANCE

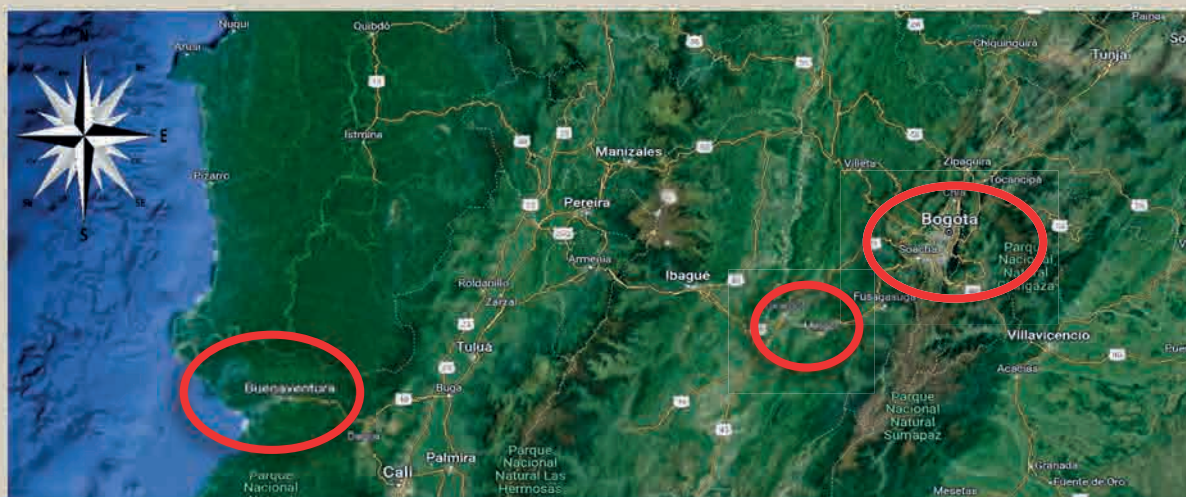
Soletanche Bachy France ha realizado los cimientos del parking subterráneo Foch en San Juan de Luz, una obra de 84x34 m y 17 m de profundidad que acoge 427 plazas de aparcamiento distribuidas en cinco niveles de subsuelo. El contexto geológico e hidrogeológico ha exigido la realización de una pantalla de hormigón periférica y pilotes de cimentación anclados en el substrato rocoso formado de flysch, a más de 30 m de profundidad. Para garantizar el anclaje, indispensable para crear un corte estanco, se ha utilizado la nueva herramienta Twinsoil® como complemento de la cuchara hidráulica KS, dedicada a la perforación de los terrenos superficiales. Este diseño simplifica la construcción y optimiza la explotación. □

RUTA 40 - BOGOTA GIRARDOT - COLOMBIE LA STABILISATION DES TALUS ROCHEUX DE MELGAR

AUTEURS : JÉRÔME VARILLON, DIRECTEUR GÉOTECHNIQUE, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT GRANDS PROJETS -
ABHISHEK SABHARWAL, DIRECTEUR DE TRAVAUX, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT GRANDS PROJETS

EN 2016 EST ATTRIBUÉ À UN GROUPEMENT D'ENTITÉS VINCI LE PROJET DE SÉCURISATION ET D'ÉLARGISSEMENT D'UNE AUTOROUTE RELIANT LES VILLES DE BOGOTA ET GIRARDOT, AU CŒUR DE LA CORDILLÈRE DES ANDES, ET SUR UN DÉNIVELÉ DE 2 300 M. IL S'AGIT DE LA ROUTE LA PLUS FRÉQUENTÉE DU PAYS, AVEC 15 MILLIONS DE VÉHICULES CHAQUE ANNÉE. CONSTRUITE IL Y A UNE CINQUANTAINE D'ANNÉES, ELLE EST SOUS CONCESSION DEPUIS 2005. LE PROJET COMPREND LA CONSTRUCTION D'UNE TROISIÈME VOIE DE 65 KM SUR L'AUTOROUTE EXISTANTE, ET CELLE DE TROIS TUNNELS BIDIRECTIONNELS D'UNE LONGUEUR TOTALE DE 2 KM.

SITUATION GÉOGRAPHIQUE GÉNÉRALE DU PROJET RUTA 40



1 5

INTRODUCTION - CONTEXTE

Un groupement d'entités de Vinci a été désigné en 2016 attributaire du marché de concession, conception, réalisation des travaux de sécurisation de sites instables et d'élargissement de la route existante Ruta 40 en Colombie. Ce projet routier, consistant à réhabiliter et à élargir, relie les villes de Bogota située à une altitude de 2640 m et Girardot située à une altitude de 326 mètres. Sur un linéaire de 150 km avec un dénivelé de 2300 m, le projet présente des contraintes topographiques, géologiques et géotechniques importantes avec de nombreux sites instables (glis-

sements de versants, éboulements) avec des talus rocheux de plusieurs dizaines de mètres de hauteur (80 à 100 m). L'importance stratégique pour le pays de cette voie de circulation (accès vers les ports du Pacifique, Buenaventura, figure 1) nécessite de réaliser les travaux de sécurisation des talus et d'élargissement tout en maintenant la circulation sur au moins 2 fois 1 voie. Pour la réalisation des travaux, le site a été subdivisé en 7 unités fonctionnelles (UF), comme illustré en figure 2 :

- **UF1** : réhabilitation des talus existants sans élargissement ;
- **UF2** : réhabilitation et élargissement

1- Situation géographique générale du projet Ruta 40.

1- General geographic location of the Ruta 40 project.

- avec voies nouvelles comprenant 3 tunnels ;
- **UF3** : réhabilitation des voies montantes (sens Girardot-Bogota) et élargissement des voies descendantes ;

- **UF4** : élargissement dans les deux sens de circulation et réhabilitation d'une voie urbaine reliant le projet à la ville de Fusagasugá ;
- **UF5, UF6 et UF7** : élargissement dans les deux sens de circulation.

Les travaux débutés en février 2021 sont prévus d'être achevés pour l'UF2 mi-2025. L'UF1 est la première unité fonctionnelle réceptionnée en avril 2023.

Ce projet présente une multitude de défis techniques : glissements de versants argileux sur UF5 et UF6, hauts talus rocheux gréseux sur UF7, talus

SITUATION DES UNITÉS FONCTIONNELLES DU PROJET RUTA 40



© VINCI CONSTRUCTION

2

verticaux atteignant 100 m de hauteur dans les formations fluvio-glaciaires de l'UF3, site instable de l'UF2 dont la route actuelle est contrainte entre le fleuve Sumapaz et un versant instable recouvert par 30 à 40 m de colluvions (figure 3).

On s'attachera à présenter dans cet article uniquement le traitement et les travaux réalisés sur les talus de Melgar situés sur l'unité fonctionnelle UF1.

2- Situation des unités fonctionnelles du projet Ruta 40.

3- Talus le long du tracé.

2- Location of functional units of the Ruta 40 project.

3- Embankment along the alignment.

PROBLÉMATIQUES DES TALUS DE MELGAR

L'UF1 est l'unité fonctionnelle la plus à l'ouest du projet Ruta 40.

Au contact de la fin de l'UF2 et au début de l'UF1 dans le sens Bogota-Girardot, le fleuve Sumapaz, au régime torrentiel, franchit un site topographique contraint dans le canyon de l'UF2 pour venir étaler sa puissance dans la plaine alluviale de Melgar. Le Sumapaz rencontre alors bruta-

lement une barrière topographique de direction Nord-Est/Sud-Ouest, ancienne terrasse alluviale en contrebas du massif montagneux de Cundinamarca (figure 4).

La route Ruta 40 passe à cet endroit-là avec des voies de circulation accolées au massif montagneux dont l'emprise sur le versant a donné naissance aux talus routiers de Melgar (cercle jaune sur la figure 4).

Cette situation topographique et hydrologique de la Ruta 40 apporte une première explication aux instabilités observées sur les talus de Melgar. En effet la création de la route historique a provoqué le déblaiement d'un recouvrement du versant par des colluvions mettant ainsi à nu les faciès géologiques en place. Il est probable que le déblaiement de cette ancienne butée de pied ait provoqué une libération de contraintes et réactivé l'évolution et la mise en mouvement des faciès rocheux (figure 5).

Le schéma en figure 6 permet de comprendre que la réalisation de la route ait pu remettre en cause une situation d'équilibre acquise aux temps géologiques en supprimant une importante butée de pied et mettant à nu des faciès géologiques rocheux évolutifs. Selon les informations locales, l'instabilité des talus de Melgar est apparue dans un délai très court (quelques mois) après la mise en circulation de la route en 2009.



© DR



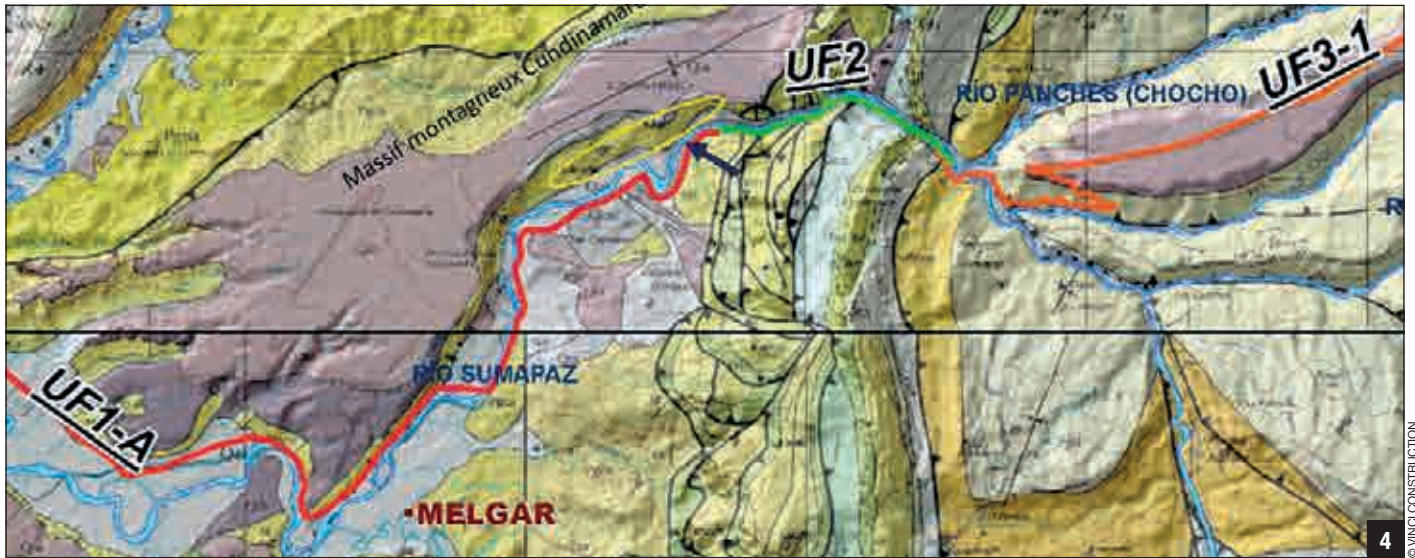
© DR



3b



3d



© VINCI CONSTRUCTION 4

Les talus de Melgar sont constitués, du haut vers le bas, d'une couverture colluviale et d'une ancienne terrasse alluviale, d'une succession stratigraphique de bancs gréseux et de conglomérats comportant, à la base du talus, une roche argileuse appelée "Lodolitas" (figure 7). La stratigraphie des roches sédimentaires (Lodolitas, grès et conglomérats) présente une succession des couches cohérente avec l'échelle géo-

logique et un pendage faible (5 à 6°) vers l'intérieur des talus (pendage stratigraphique favorable à la stabilité). En 2009 lors de la réalisation des talus de Melgar, l'ancien concessionnaire a considéré un design géotechnique de type talus rocheux (talus verticaux avec bermes intermédiaires) sans confortement systématique. Cette configuration a rapidement conduit à des instabilités pour les raisons suivantes :

- Les faciès rocheux grès et conglomérats sont rapidement évolutifs, se dégradant et se fragmentant, avec perte de cohésion et destruction de la roche en sables et graviers ;
- Le massif rocheux est affecté de fractures à pendage défavorable (60 à 65°) vers la route, fractures se répétant inlassablement tous les 1 à 2 m vers l'intérieur du massif.

L'existence entre les bancs gréseux de niveaux silteux ou argileux favorise la mise en surplomb des bancs gréseux. Il y a alors libération de la base des fractures favorisant ainsi les glissements plans ;
 → La base des talus de Melgar est constituée d'une roche argileuse, les Lodolitas, également très dégradable avec mise en surplomb des bancs gréseux (figure 8).

4- Contexte géologique, hydrographique et topographique des talus de Melgar.

5- Vue aérienne des talus de Melgar avant les travaux de Vinci et rivière Sumapaz.

6- Reconstitution du talus initial avant construction de la Ruta 40 et des talus de Melgar.



© DR 5

4- Geological, hydrographic and topographic environment of the Melgar embankments.

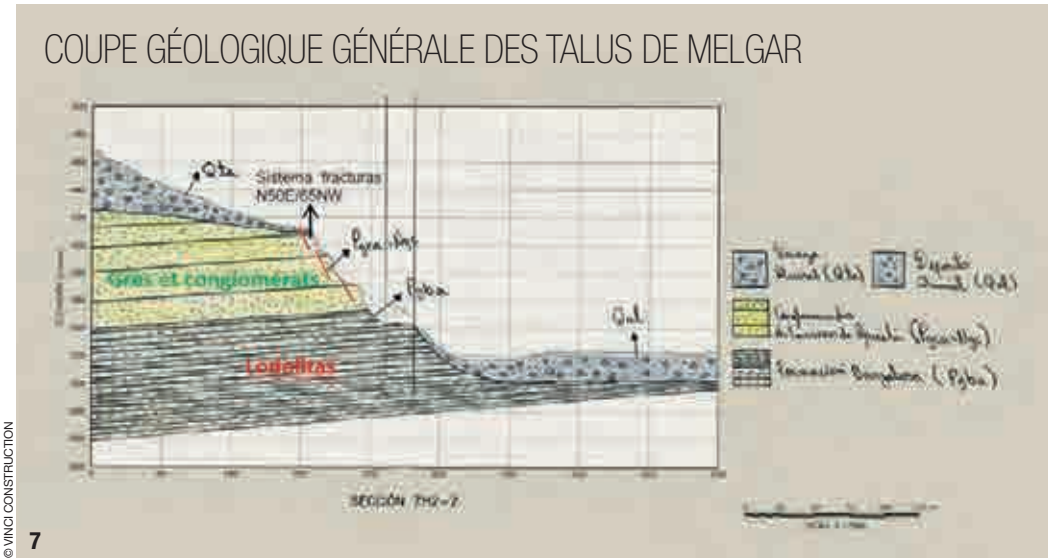
5- Aerial view of the Melgar embankments before the works by Vinci, and Sumapaz River.

6- Restoration of the original embankment before construction of Ruta 40 and the Melgar embankments.



© VINCI CONSTRUCTION 6

COUPE GÉOLOGIQUE GÉNÉRALE DES TALUS DE MELGAR



CONCEPTION DES TALUS DE MELGAR

La nouvelle conception géotechnique des talus de Melgar proposée a intégré les éléments suivants :

- 1- Sécurisation des faciès rocheux en mettant un dispositif de protection ou de confinement bloquant toute dégradation dans le temps (béton projeté) ;
- 2- Renforcement systématique des talus de Melgar afin de bloquer les glissements plans successifs (mise en place de clous passifs) ;
- 3- Prise en compte de caractéristiques dégradées dans les Lodolitas, considérant un risque de grand glissement (glissement mixte plan puis circulaire dans les roches argileuses).

Le modèle géologique et géotechnique du talus a été réalisé sur la base de :

- Un levé géologique des talus existants avec relevé structural. Les observations géologiques ont confirmé la grande fragilité des faciès rocheux (fragmentation aisée des grès et conglomérats avec un marteau, figure 9), le comportement entre roche et sol argileux des Lodolitas en pied de talus, la présence de remplissages limoneux à limono-argileux dans les fractures orientées à 60/65° vers la route existante confirmant un risque élevé de glissements plans ;



7- Coupe géologique générale des talus de Melgar.

8- Talus de Melgar avant travaux, bancs gréseux et base Lodolitas.

9- Vues de détail de la fragilité des Lodolitas (à gauche) et des grès/conglomérats (à droite).

7- General geological cross section of the Melgar embankments.

8- Melgar embankments before works, gravelly benches and Lodolitas base.

9- Detail views of the fragility of the Lodolitas (left) and the sandstones/conglomerates (right).

→ Quatre sondages carottés qui ont permis de reconstituer une coupe géologique du talus avec un sondage de 70 m de profondeur en tête du talus et trois sondages de 20 m en pied de talus. Ces sondages ont permis des essais de laboratoire pour définir des caractéristiques géotechniques avec essais d'argilosité, résistances en compression, classification des faciès rocheux selon codification propres à la mécanique des roches (RMR et GSI), figure 10.

Les caractéristiques géotechniques proposées (tableau A) ont volontairement été dégradées dans les Lodolitas et dans les discontinuités afin de reproduire les glissements plans observés dans les grès et conglomérats et une rupture rotationnelle dans les Lodolitas.

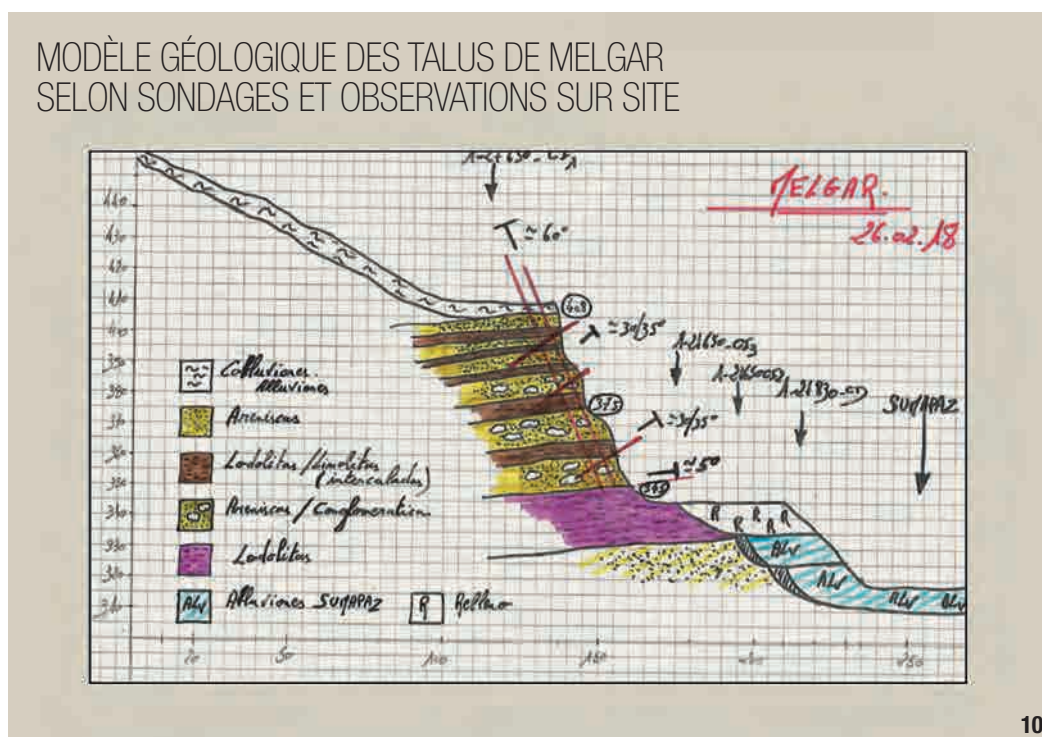
Le calage des hypothèses de calcul a nécessité de nombreuses simulations afin "de forcer les logiciels de calculs" à calculer les instabilités observées et prédites par la géologie. Cette méthode naturaliste et observationnelle tenant compte des relevés structuraux et de la dégradation des roches, a été jugée plus réaliste que l'approche strictement géotechnique et trop optimiste retenant une cohésion et un angle de frottement par formation homogène.

Nier les observations géologiques, le remplissage des fractures, la dégradation des faciès rocheux des talus de Melgar et se fier uniquement à un calcul de stabilité globale aurait irrémédiablement conduit à sous-estimer les risques réels d'instabilité.

Comme souvent dans la conception des talus rocheux, ce n'est pas la matrice rocheuse et ce ne sont pas des caractéristiques géotechniques homogènes qui dictent la stabilité d'un talus ; ce sont les hétérogénéités, les discontinuités, les dégradations de la matrice rocheuse ou "le détail" à l'intérieur d'une fracture mal orientée.

Pour ce projet, l'observation et la compréhension des instabilités se sont révélées plus pertinentes que l'accumulation de reconnaissances et essais géotechniques.

L'aboutissement du design et de la solution choisie pour conforter les talus de Melgar a été longue du fait d'un arrêt du projet en 2019 puis lors de la période Covid en 2020. Ce temps a été mis à profit pour faire évoluer les choix de design depuis la solution imaginée initialement jusqu'à celle finalement réalisée. Mais ce temps qui passait a aussi profondément modifié les condi-



10

© VINCI CONSTRUCTION

tions de stabilité des talus de Melgar. Les processus de dégradation, les ruptures successives ont transformé sans cesse la géométrie des talus. Les conditions pluviométriques, exceptionnelles pour la Colombie sur cette période et pendant les travaux, ont accéléré l'évolution des talus. C'est donc un design évolutif qu'il a fallu imaginer et mettre en place en suivant une méthode observationnelle tout en gardant un principe de confortement fixe.

10- Modèle géologique des talus de Melgar selon sondages et observations sur site.

10- Geological model of Melgar embankments based on surveys and observations on site.

Pour les plus grands talus de Melgar (secteur 2 et 3) avec des hauteurs atteignant 80 m le choix de design a été (figures 11 et 12) :

- 1- Réduire la pente de talus en partie supérieure (30 à 40 m) avec des talus 4H/5V espacés tous les 10 m par des bermes de 3 m de largeur sur le secteur 2 et avec un talus unique 3H/2V sur le secteur 3 ;
- 2- Protéger systématiquement ces talus supérieurs par un béton projeté de protection (1 treillis, 10 cm

TABLEAU A : CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES RETENUES POUR LES CALCULS DE STABILITÉ

	γ (KN/m ³)	Cohésion c' (kPa) selon GSI	Cohésion c' (kPa) selon essais laboratoires	Φ' (°) selon GSI	Φ' (°) selon essais laboratoire	C'/Φ' retenu
Colluviones/Aluviones	20	-	15	-	31	5 kPa/31°
Areniscas (Carmen de Apicala) (mi=16)	23	175	27	37	37	150 kPa/37°
Areniscas conglomeraticas (Carmen de Apicala) (mi=22)	23	84	27	37	37	55 kPa/37°
Roca desolidada discontinuidades	20	-	-	-	-	5 kPa/32°
Limolitas intercaladas (mi=5)	22	40	24	21	32	35 kPa/25°
Lodolitas de Fusagasuga non alteradas (mi=5)	22	40	35	22	28	35 kPa/28°
Aluviones SUMAPAZ	20	-	-	-	-	0 kPa/35°
Relleno	20	-	-	-	-	5 kPa/32°

© VINCI CONSTRUCTION

d'épaisseur de béton) et drains horizontaux de 10 m de longueur espacés tous les 2,5 m sur le secteur 2 ;

3- Terminer les 30 m inférieurs avec 3 parois clouées de 10 m de hauteur espacées par des bermes de 3 m. Les parois clouées sont constituées de clous 32 mm de 15 à 21 m de longueur espacés tous les 2,5 m et un parement en béton de 25 cm d'épaisseur renforcé par deux nappes de treillis. Des drains

11- Renforcement type des talus de Melgar secteur 2.

12- Renforcement type des talus de Melgar secteur 3.

11- Typical consolidation of Melgar embankments, sector 2.

12- Typical consolidation of Melgar embankments, sector 3.

horizontaux de 10 m de longueur étaient également prévus ;

4- Apporter une butée de pied en partie basse des parois clouées avec un merlon traité au ciment de 5 m de hauteur.

Tous ces principes de design avaient pour objet de contrer les causes de glissements observées sur les talus de Melgar :

→ Réduire les pentes de talus en partie supérieure afin de diminuer les

efforts moteurs en tête. Les pentes 4H/5V ou 3H/2V inférieures aux glissements plans de 60 à 65° garantissaient une stabilité globale de la partie supérieure des talus ;

→ Protéger systématiquement les talus avec du béton projeté afin de bloquer les risques d'évolution et de dégradation rapide des faciès rocheux ;

→ Réaliser des parois clouées avec des clous longs et une butée de pied afin de renforcer la partie inférieure des talus et apporter des efforts résistants en pied s'opposant aux glissements plans successifs et à une potentielle instabilité profonde.

La justification du design a été apportée classiquement avec des logiciels de calculs type Talren (logiciel Terrasol) avec recherche d'un coefficient de stabilité supérieur à 1,3 pour les situations provisoires et 1,5 (ou proche de 1,5) pour les situations définitives. En conditions sismiques le coefficient de stabilité recherché devait être supérieur à 1,1. Selon les normes colombiennes, les calculs géotechniques sont réalisés par la méthode traditionnelle (coefficient de sécurité globale recherché sans affectation de facteurs partiels sur les paramètres géotechniques). Les calculs ont modélisé des instabilités planes en partie supérieure (dans les grès et conglomérats) puis une rupture mixte plane et circulaire dans les Lodo-litas en partie inférieure.

TRAVAUX - " S'ADAPTER AUX CHANGEMENTS "

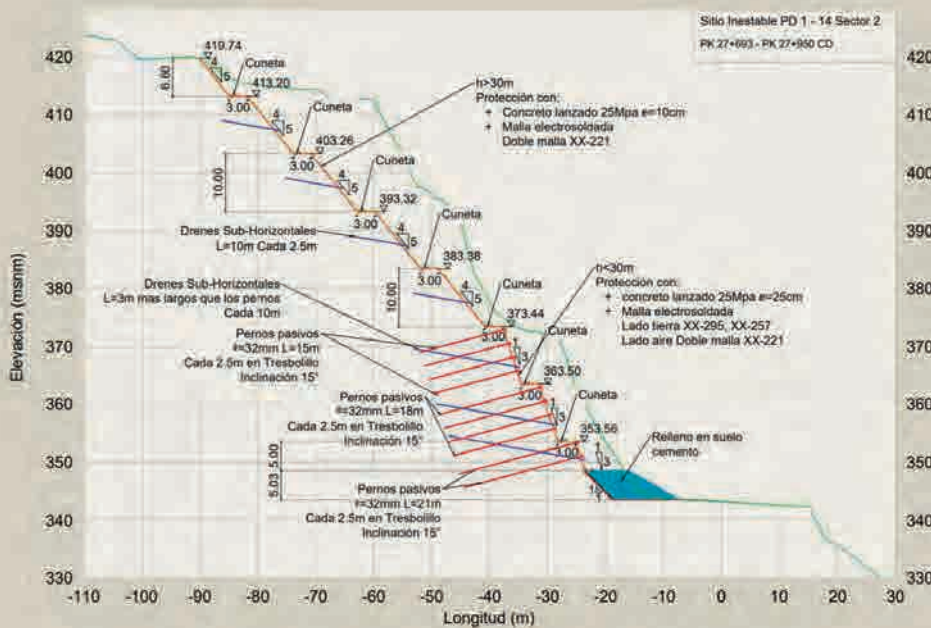
Les premiers travaux sur les talus de Melgar ont débuté en 2021. Le groupement Vinci a fait le choix de réaliser les travaux en propre avec des équipes colombiennes réalisant les terrassements et les confortements de ces méga-talus.

Les travaux ont été réalisés sous circulation en condamnant 2 voies de circulation et en protégeant les voies circulées par un merlon en terre.

Dès le démarrage des travaux, avant même le premier coup de pelle, la situation des talus de Melgar est apparue trop dangereuse. Les talus avaient poursuivi leur évolution et une rupture majeure risquait de se produire (figure 13).

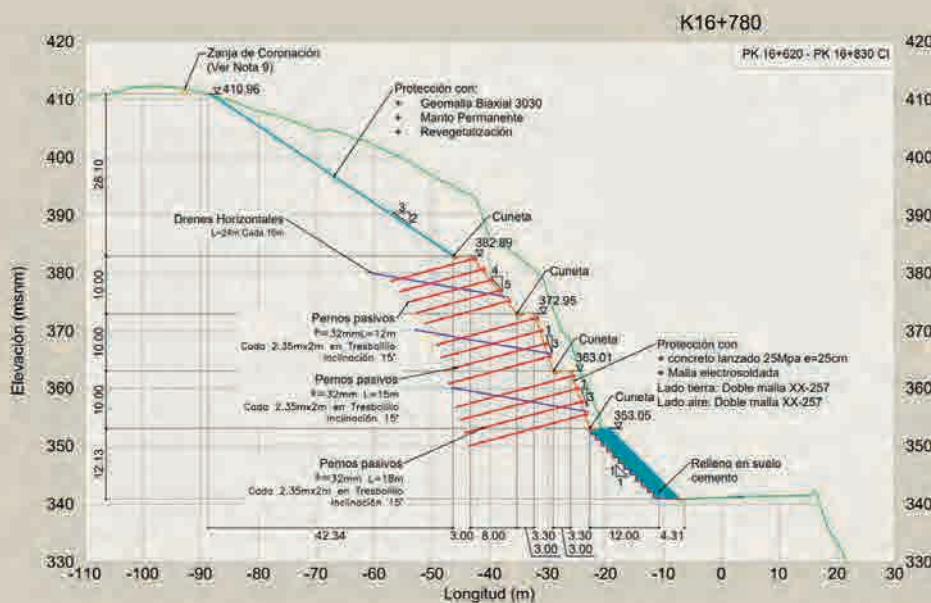
La première adaptation au site a donc consisté à reculer toutes les entrées en terre vers l'intérieur du massif afin de sécuriser le travail des machines et des hommes perchés au-dessus de la circulation à 80 m de hauteur (figure 14). ▷

RENFORCEMENT TYPE DES TALUS DE MELGAR SECTEUR 2



11

RENFORCEMENT TYPE DES TALUS DE MELGAR SECTEUR 3



12

© VINCI CONSTRUCTION

© VINCI CONSTRUCTION

Cette adaptation a généré des déblais supplémentaires.

En juin 2021, un glissement est apparu sur les talus supérieurs du secteur 2 (figure 15). La nature étant toujours plus complexe que les modèles prédictifs, il est apparu que des arrivées d'eau et des matériaux plus argileux pouvaient exister dans les alluvions en tête de talus. Ce glissement a nécessité de dimensionner en urgence un renforcement avec clous passifs.

Les talus ont pu être terminés dans les délais, en avril 2023 avec remise en circulation de la 2 fois 2 voies (figures 16 et 17).

Ces 2 méga-talus sur 460 m de longueur, ne constituent finalement qu'un faible linéaire de l'ensemble des talus de Melgar s'étendant sur 4 km (15 talus à sécuriser). Mais ces talus sont aussi les plus hauts et les plus proches de la route existante. Pour les autres talus, des solutions différenciées ont été

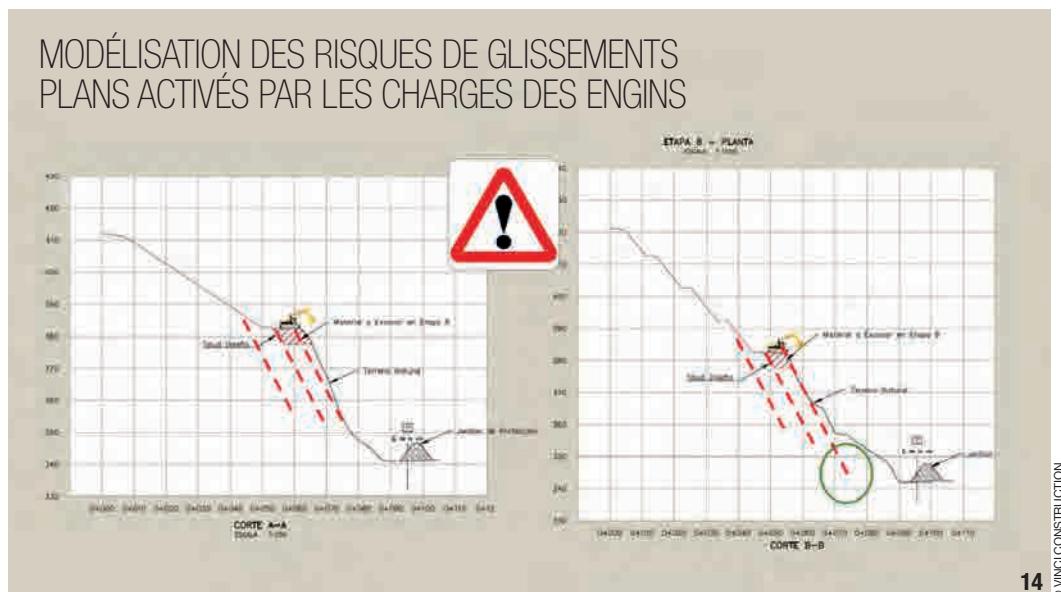


13 © D.F.

13- Glissement de talus apparu en mars 2021 avant le démarrage des principaux travaux et signe d'un nouveau glissement à venir (cercle rouge).

14- Modélisation des risques de glissements plans activés par les charges des engins.

15- Vues du glissement apparu en tête des talus secteur 2 - juin 2021.



14 © VINCI CONSTRUCTION

13- Embankment landslide that occurred in March 2021 before the start of the main works, and sign of a further landslide to come (red circle).

14- Modelling of the risks of translational landslides activated by the machinery loads.

15- Views of the landslide that occurred at the top of the embankments, sector 2 - June 2021.



15a



15b



16

© DR



17

© VINCI CONSTRUCTION

16 & 17- Vue de talus de Melgar terminé avec remise en circulation 2 fois 2 voies.

16 & 17- View of completed Melgar embankment with restoration of two-lane dual-carriageway traffic.

appliqués avec protection des talus par grillage et béton projeté, renforcement ponctuel, mise en place de barrières dynamiques en protection des voies de circulation. L'ensemble des talus de Melgar a nécessité :

- 740 000 m³ de déblais dont 395 000 m³ pour les seuls talus secteur 2 et secteur 3 ;
- 133 494 m de clous passifs en renforcement :
 - 54 842 m de clous 32 mm pour les talus secteur 2 et 3,

PRINCIPALES QUANTITÉS

- DÉBLAIS : 4 317 900 m³**
- BÉTON PROJETÉ : 27 810 m³**
- CLOUS D'ANCRAGE : 301 040 m**
- GRILLAGE DE PROTECTION (triple torsion) : 337 590 m²**
- PONTS : 29 u**
- PONTS PIÉTONS : 35 u**
- ENROBÉS : 1 127 000 t**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- CLIENT : Agencia Nacional de Infraestructura**
- CONCESSIONAIRE : Via 40 Express**
 - Vinci Highways
 - Conconcreto
- EXPLOITATION-MAINTENANCE : Via 40 Express**
 - Vinci Highways
 - Conconcreto
- CONCEPTEUR-CONSTRUCTEUR (EPC) : Consorcio Ruta 40**
 - Vinci Construction Grands Projets
 - Vinci Construction Terrassement Grands Projets

- 65 834 m de clous Ø 25 mm pour des renforcements ponctuels sur les autres secteurs,
- 14 818 m de clous spécifiques pour un grillage plaqué sur le secteur 6 ;
- 18 403 m³ de béton projeté ;
- 47 915 m de drains horizontaux dont 28 000 m pour les seuls talus secteur 2 et secteur 3 ;
- 115 945 m² de treillis soudés ;
- 96 335 m² de grillages de renforcement ;
- 9 000 m² de manteau (géotextile pour végétalisation) et 11 000 m² de végétalisation.

Il restera maintenant à surveiller de près la vie de ces talus, ouvrages exceptionnels. Une instrumentation topographique et des sondages inclinométriques ont été mis en place à cette fin. Un plan de maintenance, essentiel au maintien de la qualité des renforcements et du drainage, est désormais opérationnel. □

ABSTRACT

RUTA 40 - BOGOTÁ GIRARDOT - COLOMBIA - STABILISATION OF THE MELGAR ROCK EMBANKMENTS

JÉRÔME VARILLON, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT GRANDS PROJETS - ABHISHEK SABHARWAL, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT GRANDS PROJETS

The Ruta 40 project in Colombia required the consolidation of 80-metre-high embankments to prevent frequent instabilities endangering traffic. *These embankments near the town of Melgar have a complex geotechnical environment due to a combination of evolving rock facies, frequent translational landslides and a risk of deep landslide due to a clayey bedrock with "soil/rock" behaviour. Engineering design was a complex process and the works were subjected to hostile weather conditions, having to adapt constantly to changing stability conditions. Despite the many unforeseen events, changes, and the major decision to perform the works in-house, the Vinci Construction consortium was able to complete the works on schedule, and traffic was restored on Ruta 40 in April 2023. These exceptional embankments, real earth structures, will receive careful maintenance like any other exceptional engineering structure. □*

RUTA 40 - BOGOTÁ GIRARDOT - COLOMBIA - LA ESTABILIZACIÓN DE LOS TALUDES ROCOSOS DE MELGAR

JÉRÔME VARILLON, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT GRANDS PROJETS - ABHISHEK SABHARWAL, VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT GRANDS PROJETS

El proyecto Ruta 40 en Colombia ha precisado un refuerzo de los taludes de 80 m de altura para bloquear las frecuentes instabilidades que ponen en riesgo la circulación. *Estos taludes próximos a la localidad de Melgar presentan un complejo contexto geotécnico que combina facies rocosas evolutivas, frecuentes deslizamientos planos y un riesgo de deslizamiento profundo debido a un lecho de roca arcilloso con un comportamiento "entre suelo y roca". El proceso de diseño ha sido complejo, las obras se han realizado en condiciones meteorológicas difíciles y han tenido que adaptarse constantemente a la evolución de las condiciones de estabilidad. Pese a los numerosos imprevistos y modificaciones, y a la decisión clave de efectuar las obras sin recurrir a subcontratistas, el consorcio Vinci Construction ha logrado finalizar las obras dentro de los plazos, con una reanudación del tráfico de la Ruta 40 en abril de 2023. Estos taludes excepcionales, que constituyen auténticos terraplenes, serán objeto de un meticuloso mantenimiento, como cualquier otra estructura de ingeniería excepcional. □*



1
© SCAU

COMPLEXE SPORTIF HUNEBELLE À CLAMART (92) - UN PUZZLE 3D INTÉGRÉ DANS LA COLLINE

AUTEURS : STÉPHANE GILBERT, INGÉNIEUR TRAVAUX, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS -
KHEIR-EDDINE BENKAHOUL, RESPONSABLE ÉTUDES PRINCIPAL, NGE FONDATIONS -
LORIIS-OLIVIER ESSOH, RESPONSABLE PROJET, BUILDERS&PARTNERS

SUR CE PROJET, LA PRÉSENCE DE LA NAPPE PHRÉATIQUE DES SABLES DE FONTAINEBLEAU NÉCESSITE D'ADAPTER LES PROCÉDÉS DE RÉALISATION AFIN DE LIVRER UNE FOUILLE DE 17 500 M² À FLANC DE COLLINE. EN PARTICULIER, LES TIRANTS D'ANCRAGE DÉFINITIFS REQUIÈRENT 3 MÉTHODOLOGIES DIFFÉRENTES ET UN SYSTÈME DE POMPAGE COMPLEXE DOIT ÊTRE MIS EN ŒUVRE EN PHASE PROVISOIRE COMME EN PHASE DÉFINITIVE. POUR DES RAISONS ENVIRONNEMENTALES, LA RÉUTILISATION DES TERRES DU SITE EST PRIVILÉGIÉE.

DESCRIPTION DU PROJET

Situé à proximité du centre de la ville de Clamart, le centre sportif Jules Hunebelle, projet réalisé par l'agence Scau architecture, est en pleine restructuration. Il se composera à l'horizon 2025 d'une salle d'athlétisme intérieure, d'un gymnase omnisport, d'une salle de boxe, d'un terrain de rugby avec tribunes pour 500 personnes, de 5 nouveaux courts de tennis, d'un bowling, d'un restaurant panoramique et d'un parking de 169 places. Afin d'insérer ces nouveaux équipements en très proche lisière de la forêt de Meudon, le complexe sera en grande partie enterré et les parties émergentes seront végétalisées (figure 1).

Le maître d'ouvrage, la Mairie de Clamart, a attribué le marché du lot fondations spéciales et terrassement au groupement d'entreprises composé

de Spie Batignolles Fondations (mandataire), Nge Fondations, Tersen et Capocci.

Les travaux de ce macro-lot s'articulent principalement autour :

→ D'une enceinte périphérique de longueur 620 m réalisée en parois moulées. Les dimensions des parois moulées varient entre 12 m à 25 m de profondeur selon la géométrie pentée du site, pour des épaisseurs comprises entre 520 mm et 820 mm. La surface totale de l'excavation est de 11 000 m². Ces travaux de forage ont nécessité l'utilisation de deux ateliers benne à câble, entre novembre 2022 et février 2023 ;

→ De tirants d'ancrage disposés sur différents niveaux, dont 240 tirants sont définitifs. Ces tirants ont été réalisés à l'aide de trois méthodo-

1- Vue d'architecte.

1- Architect's view.

- logies de forage différentes, entre février 2023 et juillet 2023 ;
- Du terrassement de la fouille sur une profondeur de 6 m à 15 m, ce qui représente un volume d'excavation de 200 000 m³ de déblais. Deux ateliers de terrassement ont été nécessaires entre janvier 2023 et juillet 2023. Une partie des déblais est réutilisée sur le projet afin de réaliser les enduits du bâtiment ;
 - De l'épuisement des eaux de la nappe emprisonnée dans la fouille et du déchargement d'une nappe captive.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROLOGIQUE

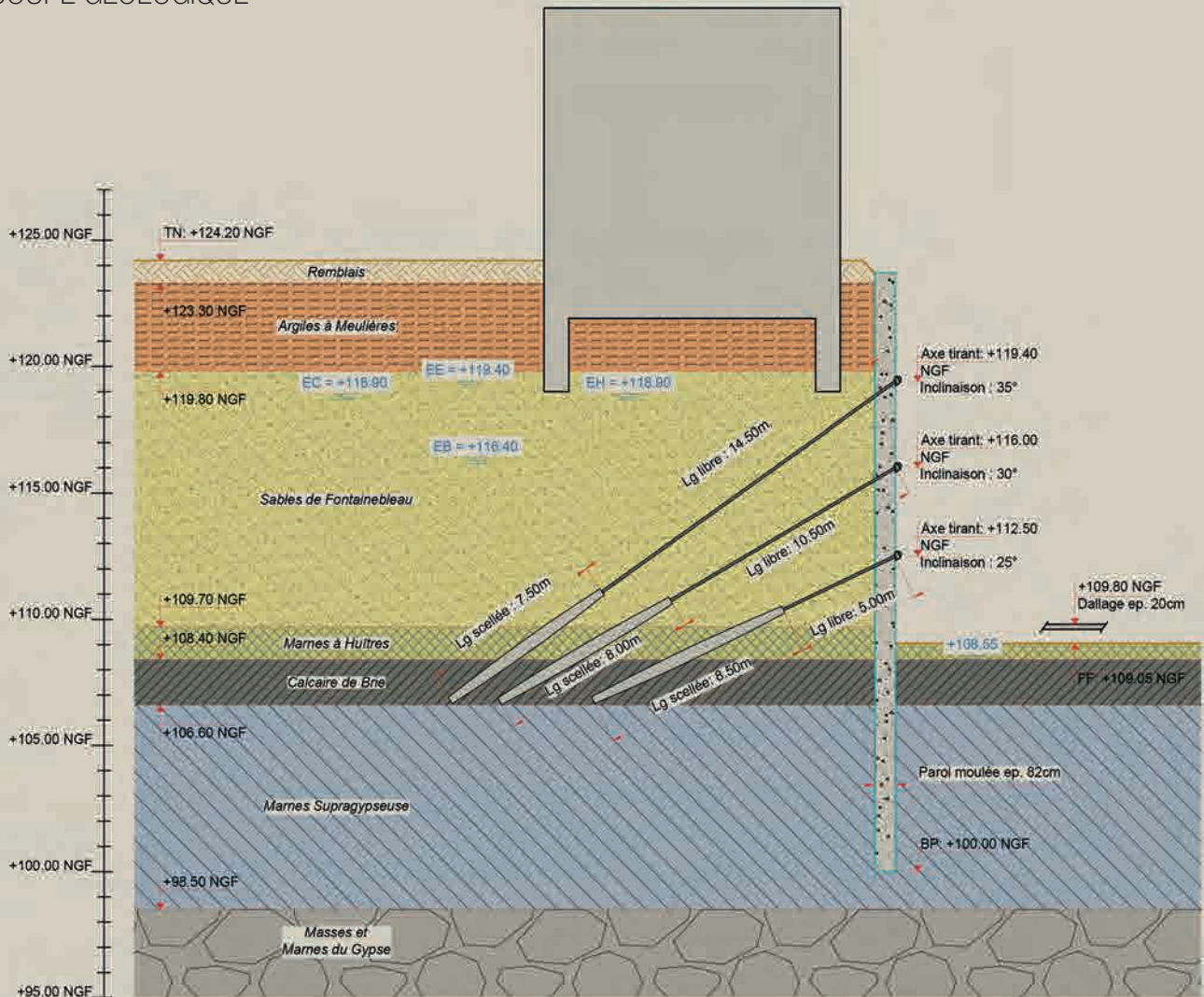
Le terrain présente un dénivelé général de 8 m environ entre la zone amont et la zone aval. Les horizons identifiés au droit du projet sont ceux du sud du Bassin Parisien (figure 2).

Les études hydrogéologiques réalisées sur le projet mettent en évidence la présence de deux aquifères :

- Un premier aquifère au sein des Sables de Fontainebleau limité à sa base par les Marnes à Huîtres (perméabilité 10⁻⁷ m/s) ;
- Un second au sein des formations du Calcaire de Brie avec une charge hydraulique supérieure au toit de cette formation.

On notera également un phénomène d'écoulement qui se produit du sud vers le nord (de la zone amont vers la zone aval).

COUPE GÉOLOGIQUE



© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS & NGE FONDATIONS

2

2- Coupe géologique.
3- Réalisation des parois moulées.

2- Geological cross section.
3- Execution of diaphragm walls.

La structure est prévue entièrement enterrée avec des parois périmétriques soutenant 6 à 15 m de hauteur de terre et 3 à 10 m de hauteur d'eau.

La solution technique retenue est la mise en œuvre d'écrans de soutènement étanches en paroi moulée (figure 3) ancrés dans l'horizon imperméable des Marnes Supragypseuses (perméabilité 10^{-8} m/s) afin de limiter



3
© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS & NGE FONDATIONS

les arrivées d'eau en phase chantier comme en phase définitive.

Le seul appui butonnant du soutènement est le dallage. Ainsi, la réalisation de tirants d'ancrage est prévue pour assurer la stabilité des parois tant pour les phases provisoires de travaux que pour la phase de service. Horizons dans lesquels sont ancrés les tirants :

Les investigations géotechniques menées sur ce projet ont permis d'identifier un comportement fluant des Marnes Supragypseuses selon les indices de plasticité mesurés ($I_p > 40$). Le scellement des tirants d'ancrage définitifs dans cet horizon de puissance plurimétrique s'est donc vu écarté. Les horizons sus-jacents, à savoir les Sables de Fontainebleau, les Marnes à Huîtres et le Calcaire de Brie ont donc été retenus pour ancrer les tirants. ▷

Au droit de la future salle d'athlétisme, où les hauteurs vues sont les plus importantes (15 m), trois niveaux de tirants sont nécessaires pour satisfaire les critères de déformation, avec une inclinaison de 25° par rapport à l'horizontale afin d'éviter l'ancrage dans l'horizon fluant des Marnes Supragypseuse (figure 2).

Une partie du soutènement est réalisée à moins d'un mètre d'un gymnase en service. Les calculs ont ainsi été rendus complexes en raison :

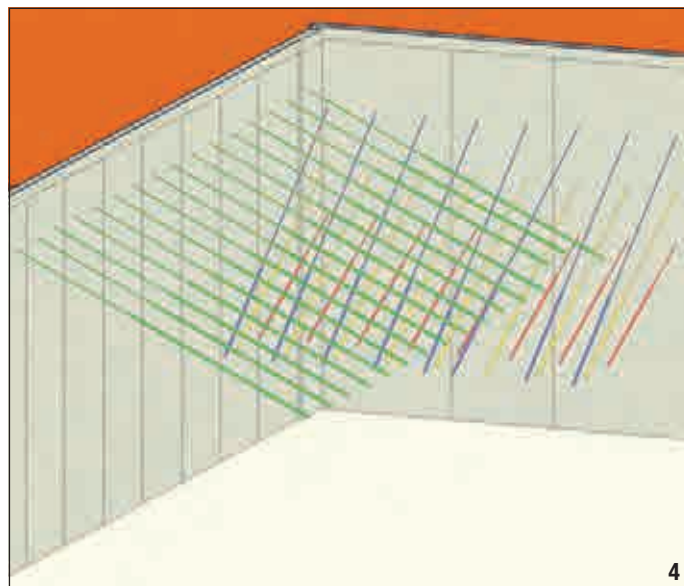
- D'un critère de tassement admissible de 10 mm fixé pour limiter les désordres sur l'ouvrage existant ;
- De l'implantation des parois moulées qui forment un angle droit entrant dans la fouille, impliquant un croisement des tirants.

Une modélisation 3D a permis d'avoir une visualisation de l'ensemble et ainsi d'adapter ponctuellement les inclinaisons et azimuts des tirants afin d'éviter toute interaction (figure 4), ainsi que l'ajout d'un niveau de bracon pour la phase provisoire.

TIRANTS DÉFINITIFS

Le projet comporte 273 tirants définitifs. Les parois situées à l'amont du site sont terrassées sur une profondeur de 15 m, ce qui nécessite de réaliser 3 lits de tirants. Le niveau de la nappe des Sables de Fontainebleau est situé environ 1 m au-dessus du niveau des tirants du lit 2.

Le premier lit de tirant est foré au tricot diamètre 180 mm, sous boue. Le forage fait ensuite l'objet d'une substitution par un coulis de gaine, puis il est équipé d'un tube métallique à manchettes TMD de diamètre 3". Le tube à manchettes permet de réaliser successivement les injections IRS



© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS & NGE FONDATIONS

(Injections Répétitives et Sélectives) tous les 50 cm. Les critères d'arrêt sont définis par un volume de 100 litres par manchette de 50 cm et par une pression d'injection égale à la pression limite du terrain. L'injection est poursuivie jusqu'à l'atteinte de la pression d'arrêt sur l'ensemble des manchettes. Pour réaliser le second lit de tirant, un tube prolongateur est prédisposé au droit du forage. Ce tube permet de surélever le niveau de forage par rapport au niveau de la nappe, et donc de maintenir un équilibre du niveau d'eau dans le forage et d'éviter ainsi les éboulements de terrain durant l'opération mais aussi le délavement du coulis et les venues d'eau à l'intérieur de la fouille. Les dispositions de forage et d'injections sont les mêmes que pour le lit 1.

En raison de la différence de niveau importante entre le tirant et le niveau piézométrique (environ 5 m), le troi-

4- Modélisation 3D de l'interaction des tirants.

5- Tirants sous sas.

6- Sas.

4- 3D modelling of tie anchor interaction.

5- Tie anchors under mantrap.

6- Mantrap.

sième lit est réalisé avec utilisation d'un sas (figure 5). Ce dispositif, vissé sur les réservations disposées dans les parois moulées (figure 6), a pour rôle d'assurer l'étanchéité lors de la réalisation du tirant et d'équilibrer les pressions hydrostatiques lors de la phase de forage. Le forage est réalisé sous tubage à l'aide d'un taillant

perdu de diamètre 150 mm. Le tube TMD est mis en œuvre à l'intérieur du tubage et le coulis de gaine est injecté sous pression en remontant le tubage. La phase d'injection est inchangée. Les paramètres de forage et d'injection de chaque tirant ont été enregistrés. Préalablement aux travaux de réalisation des tirants, des essais de conformité ont été réalisés en partie Nord du projet à partir de massifs de réaction totalement indépendants de la paroi moulée (figure 7) ; il a été réalisé 6 tirants d'essai dont 2 ont été scellés dans les sables de Fontainebleau dont la pression limite moyenne avait été fixée à 1,0 MPa ; les 4 autres tirants d'essais avaient été scellés à la fois dans les Marnes à Huîtres et le Calcaire de Brie dont les pressions limites au droit du site sont respectivement de 1,4 MPa et 2,4 MPa. Parmi ces 4 essais, 2 ont été réalisés à partir d'un tubage provisoire avec outil perdu. Ces essais ont été localisés à l'intérieur de la future excavation.

Les résultats obtenus à l'issue des essais ont permis de confirmer les valeurs de prédimensionnement déterminées selon les recommandations du TA2020 pour l'ensemble des 3 couches de sols intéressés.

Pour les tirants du premier lit et conformément au TA2020, les pressions d'injection maximales avaient été fixées à la pression limite des terrains traversés associées à un volume seuil de 100 litres par manchette (valeurs supérieures aux recommandations). Préalablement aux travaux de forage, un ensemble de cibles de suivi topographique a été installé sur les avoisinants les plus proches et une procédure d'auscultation a été mise en place. Lors des premières injec-

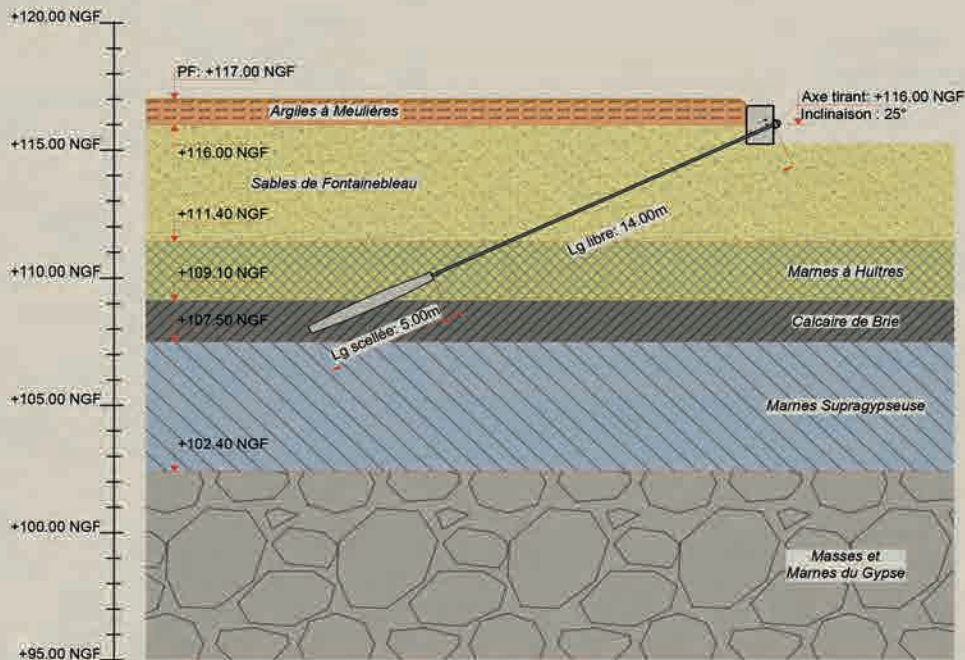


© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS & NGE FONDATIONS



© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS & NGE FONDATIONS

COUPE TIRANTS D'ESSAI



7- Coupe tirants d'essai.

8- Instrumentation lors de l'injection.

9- Coupe puits et pointes filtrantes.

7- Cross section of test tie anchors.

8- Instrumentation during grouting.

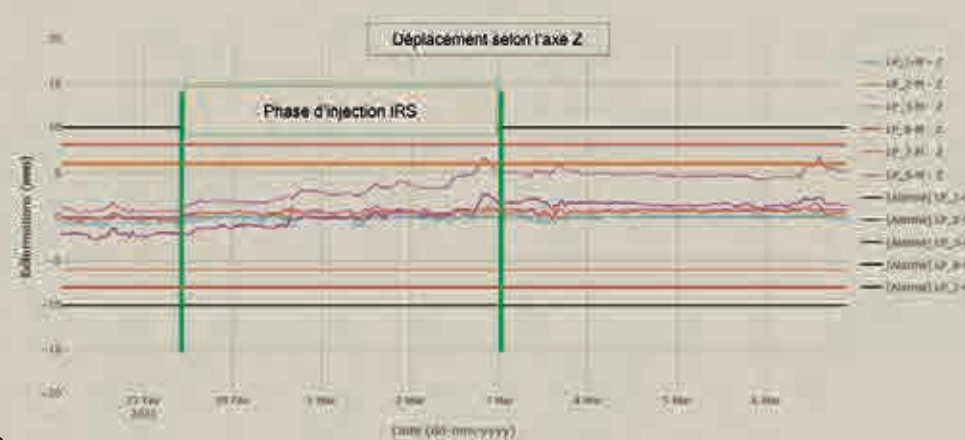
9- Cross section of shafts and well points.

tions, une amorce de soulèvement est constatée à l'arrière de la paroi moulée (figure 8). Le suivi topographique mené en continu a permis de montrer la forte corrélation entre injection des tirants et soulèvement. Bien que les bulbes de scellements des tirants se situent à plus de 14 m de profondeur, des soulèvements de plus de 5 mm ont été mesurés. Sur certains tirants, les volumes de coulis mis en œuvre ont dépassé 5 m³ pour un linéaire de bulbe de scellement de 13,0 m, soit une absorption quatre fois supérieure aux prévisions.

Les tirants de l'angle ont dû conduire à un cumul des effets des pressions d'injection associés à de probables claquages des terrains. Les pressions d'injection proches des pressions limites du terrain ont conduit localement à une rupture du terrain et ainsi à des écoulements de coulis préférentiels ascendants.

Devant ce constat et en concertation avec la MOE, le géotechnicien et le bureau de contrôle, des tirants d'essais complémentaires ont dû être réalisés avec des pressions d'injection inférieures aux pressions limites mesurées. Ceci n'a pas entraîné une remise en cause de la tenue des scellements.

INSTRUMENTATION LORS DE L'INJECTION

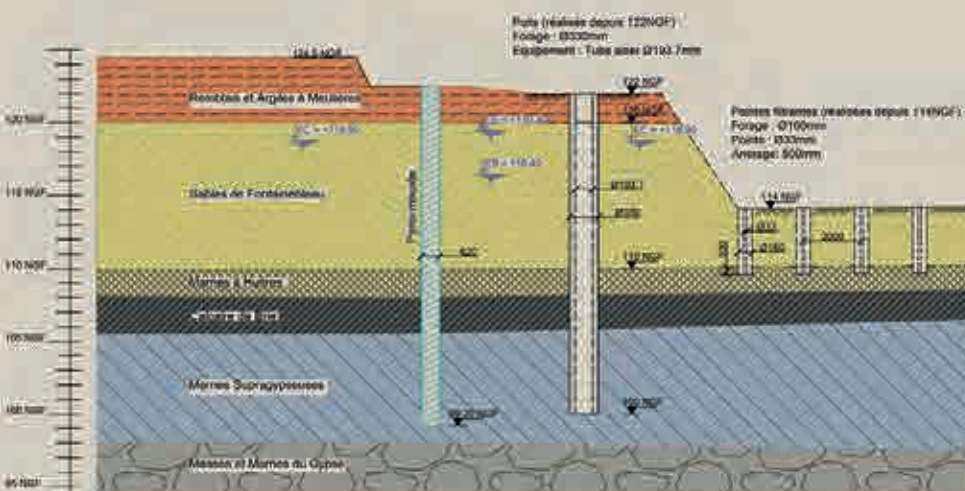


ÉPUISEMENT DE LA FOUILLE

Afin de permettre le terrassement de la fouille, un système d'épuisement des eaux de la nappe des Sables de Fontainebleau est mis en œuvre. Ce système de pompage intègre également le déchargement de la nappe du Marno-Calcaire de Brie afin de traiter la problématique de soulèvement de l'horizon des Marnes à Huîtres.

Les dimensions importantes de la fouille (17 500 m²), les hauteurs à rabattre (13 à 17 m) et les caractéristiques de perméabilités des Sables de Fontainebleau ($k_v = 3.10^{-5}$ m/s) ont conduit à réaliser, via une simulation numérique, 13 puits profonds répartis sur l'ensemble la fouille.

COUPE PUITS ET POINTES FILTRANTES





10

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS & NGE FONDATIONS



11

© CAPOCCI

Ces puits, de diamètre 330 mm, sont composés de crépines à fentes horizontales d'ouverture 1 mm et d'un massif drainant de granulométrie 1,1/1,6 mm. Ils sont ancrés dans l'horizon "étanche" des Marnes Supragypseuses et sont connectés à un dessableur.

La cinétique d'épuisement de la nappe des Sables de Fontainebleau s'est rapidement avérée faible (environ 4 mm/jour) par rapport aux prévisions. Dans un premier temps, quelques fossés drainants et puisards sont venus compléter le dispositif, permettant un abaissement général de cette nappe sur une hauteur de 2 m. Après avoir atteint un niveau de terrassement sub-affleurant au niveau piézométrique, 3 lignes de pointes filtrantes ont alors été mises en œuvre.

Ces pointes filtrantes ont été positionnées dans la zone située à l'amont géographique du projet où se concentraient les difficultés d'épuisement. La première ligne de pointes filtrantes a été implantée à 15 m de la paroi moulée, faisant office de plot d'essai grandeur nature. Chaque ligne se composait de 40 pointes ancrées dans les Marnes à Huîtres, espacées de 2 m. En raison de la granulométrie faible des Sables de Fontainebleau, les crépines utilisées étaient pré-enrobées d'un sable fin 0,6/1 mm et complétées par un massif drainant de type sable 0/4 mm.

L'utilisation de ce dispositif de pointes filtrantes a permis d'atteindre l'épuisement attendu dans un délai inférieur à 1 semaine après sa mise en service, soit une cinétique d'épuisement de la nappe supérieure à 30 cm/jour (figure 9).

Lors de la phase d'exploitation de l'ouvrage, un débit d'exhaure de 1,1 m³/h est calculé. Ce débit correspond à la réalimentation de la nappe des Marno-

Calcaires de Brie par les Marnes Supragypseuses, et par un débit de fuite résiduel percolant au travers des parois moulées. Par sécurité vis-à-vis de l'étanchéité de l'ouvrage et de la reprise des sous-pressions, un débit de 15 m³/h est pris en compte pour le dimensionnement.

Ces réalimentations en eau résiduelle sont récupérées par un tapis drainant situé sous les dallages et radiers.

Ce tapis est composé d'un géocomposite de filtration (nappe drainante + mini-drains de 20 mm espacé de 0,5 m avec une direction orthogonale). Les eaux sont ensuite captées par un réseau de drains collecteurs distants de

10- Sablon lors du terrassement pleine masse.

11- Criblage du sablon.

12- Vue d'ensemble.

10- Fine sand during mass earthworks.

11- Fine sand screening.

12- General view.

30 m maximum pour être relevées vers un bassin de récupération.

Ces eaux seront alors utilisées pour l'arrosage du terrain de rugby et des toitures végétalisées, ainsi que par les services propreté et espaces verts de la ville. Le surplus sera réinjecté par un ouvrage de réinfiltration.

RÉEMPLOI DU SABLON

L'enjeu environnemental d'un projet d'une telle envergure est intégré dès la phase de la conception de l'ouvrage et pour toute sa durée de vie. Le projet reçoit ainsi la certification Effinature qui vise à promouvoir la biodiversité dans les projets de construction. L'utilisation



12

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS & NGE FONDATIONS



© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS & NGE FONDATIONS

13

13- Vue d'ensemble.

13- General view.

d'un cahier des prescriptions de chantier à faible impact et la protection des arbres présents sur site sont quelques exemples des mesures déployées lors des travaux. La réutilisation des eaux d'exhaure et l'implantation d'arbres solaires sont d'autres dispositifs prévus en phase service.

Une autre mesure favorable à l'environnement consiste à trier et à réemployer les matériaux issus des chantiers. Sur le projet Hunabelle, la réutilisation d'une partie des matériaux se fait même in situ. En effet, une partie des Sables

PRINCIPALES QUANTITÉS

SURFACE PAROIS MOULÉES : 10 500 m²
NOMBRE DE TIRANTS DÉFINITIFS : 275 u
LONGUEUR DES TIRANTS : 5 200 m
VOLUME D'EAU POMPÉ EN 5 MOIS : 10 000 m³
VOLUME DE TERRASSEMENT : 200 000 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Mairie de Clamart
MAÎTRE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉ : Vallée Sud Aménagement
ARCHITECTE : Scau
MAÎTRISE D'ŒUVRE D'EXÉCUTION : Builders&Partners
MAÎTRISE D'ŒUVRE STRUCTURE : Incet
GÉOTECHNICIEN : Geotec
CONSTRUCTEURS FONDATIONS ET TERRASSEMENTS : Spie Batignolles Fondations / Nge Fondations / Capocci / Tersen

de Fontainebleau est utilisée dans la formulation des enduits de façade et des cheminements extérieurs. Le projet architectural a retenu deux franges de sable possédant des teintes singulières d'après les carottes prélevées lors des études géotechniques de conception : l'ocre toscane et le jaune vert. Lors de la phase de terrassement, plusieurs sondages à la pelle mécanique permettent de valider les franges de sable à conserver (figure 10). Après validation des caractéristiques techniques et colorimétriques, les matériaux sont triés sur site. Lorsque la quantité est suffisante, un cribleur mobile est mobilisé afin d'atteindre une granulométrie inférieure à 4 mm (figure 11). Le sable est enfin stocké en big bag sur le chantier dans l'attente de son utilisation ultérieure. □

ABSTRACT

HUNEBELLE SPORTS CENTRE IN CLAMART (92) - A 3D JIGSAW PUZZLE INTEGRATED INTO THE HILL

STÉPHANE GILBERT, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - KHEIR-EDDINE BENKAHOUL, NGE FONDATIONS - LORIIS-OLIVIER ESSOH, BUILDERS&PARTNERS

A new sports centre is under construction in Clamart, on steeply sloping ground. The diaphragm wall retaining structure intercepts two aquifers and is anchored in a watertight horizon. In the interim phase, excavation pumping is performed by a combined method with deep shafts and well points. In the permanent phase, this system is replaced by a draining foundation raft. Three layers of permanent tie anchors are needed to ensure the structure's stability. Two layers are executed under a hydraulic head ranging between 1 and 5 metres. The observation of a displacement on a neighbouring structure makes it necessary to adapt the tie anchor execution technique. □

COMPLEJO DEPORTIVO HUNEBELLE EN CLAMART (92) - UN PUZZLE EN 3D INTEGRADO EN LA COLINA

STÉPHANE GILBERT, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - KHEIR-EDDINE BENKAHOUL, NGE FONDATIONS - LORIIS-OLIVIER ESSOH, BUILDERS&PARTNERS

Se está construyendo un nuevo centro deportivo en la localidad francesa de Clamart, en un terreno que presenta un fuerte desnivel. La obra de contención mediante pantallas de hormigón intercepta dos capas freáticas y se ancla en un horizonte estanco. En fase provisional, el bombeo de la fosa se realiza por un método mixto de pozos profundos y puntas filtrantes. En fase definitiva, este sistema se sustituye por una losa de cimentación drenante. Se han precisado tres lechos de tirantes de anclaje definitivos para garantizar la estabilidad de la construcción. Dos lechos se realizan bajo una carga hidráulica comprendida entre 1 y 5 m. La observación de un desplazamiento en una construcción vecina exige una adaptación del modo de realización de los tirantes. □



1

© ARCADIS

LE LYCÉE FÉNELON À PARIS VI^e - LE BTP AU SERVICE DES DÉSORDRES DES BÂTIMENTS PATRIMONIAUX

AUTEURS : YOUSSEF JARADEH, DIRECTEUR TECHNIQUE, ARCADIS - ZOHRA ZERFA, RESPONSABLE ÉTUDES GÉOTECHNIQUES, ARCADIS

LES BÂTIMENTS DU LYCÉE FÉNELON SITUÉ AU CŒUR DE LA CAPITALE, DATANT DE 1830, CONSIDÉRÉS COMME BIENS PATRIMONIAUX, SUBISSENT UN EFFET D'ÉROSION DU SOL ET UNE FRAGILISATION DE LA STRUCTURE. POUR LES CONSERVER, LA RÉGION ÎLE-DE-FRANCE A ENTREPRIS DES TRAVAUX DE RENFORCEMENT DES FONDATIONS PAR MICROPIEUX, DE LA STRUCTURE PAR INJECTION ET LA RÉNOVATION DES RÉSEAUX. AU TOTAL, LA RÉGION A INVESTI 12,4 M€ POUR PRÉSERVER CET ÉDIFICE.

DESCRIPTION ET HISTOIRE DE L'ÉDIFICE

L'hôtel particulier Villayer II (datant du XVIII^e siècle), avec son escalier et ses boiseries de l'époque Louis XV, est devenu après son acquisition par l'État en 1833, le premier lycée de filles. Des travaux de transformation et de surélévation du bâtiment se sont succédé dans sa partie la plus ancienne au sud de la cour d'Honneur. Ils ont été suivis de la construction des autres parties autour de la cour d'Honneur pour terminer par la création, en 1993, d'un gymnase enterré de 8 m

de hauteur nette environ sous la cour Jardinier, réalisé au moyen de parois moulées et comprenant un radier drainant.

La figure 2 montre l'évolution de la construction et les plans de l'ouvrage actuel.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DU SITE

Les reconnaissances géotechniques réalisées ont mis en évidence la stratigraphie suivante à partir du terrain naturel :
→ Remblais de 3,20 m d'épaisseur

1- Cour d'Honneur du Lycée après remise en état à la fin des travaux.

1- Courtyard ("Cour d'Honneur") of the Lycée after site restoration on completion of the works.

avec de faibles caractéristiques mécaniques ;

- Alluvions modernes entre 3,20 et 7,20 m de profondeur avec des caractéristiques mécaniques médiocres à moyennes ;
- Alluvions anciennes entre 7,20 et 12,30 m de profondeur avec de bonnes caractéristiques mécaniques ;
- Formations du Lutétien (Marnes et Caillasses ensuite Calcaire Grossier) au-delà de 12,30 m de profondeur, présentant de bonnes caractéristiques mécaniques.

2- Historique de construction du Lycée Fénélon.

3- État des fondations, des soubassements et des réseaux fuyards.

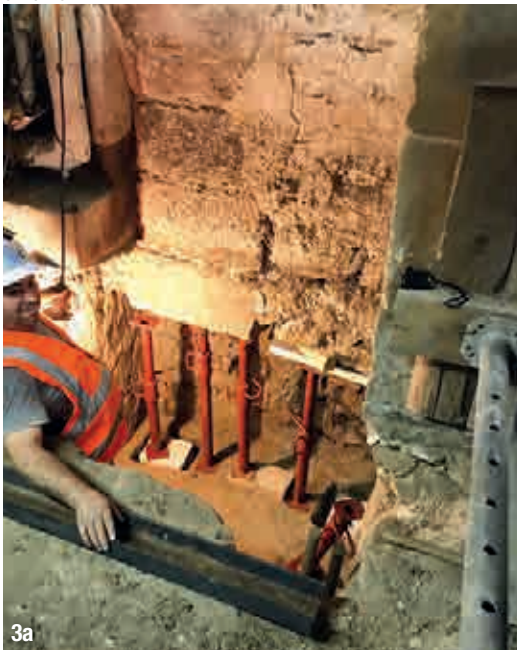
2- History of the construction of Lycée Fénélon.

3- State of the foundations, basements and leaky networks.



© GOOGLE
2

© ARCADIS



3a

© ARCADIS



3b



3c

© ARCADIS



3d

© ARCADIS

Du point de vue hydrogéologique, le bâtiment situé à proximité de la Seine (200 m environ) a subi la fluctuation du niveau de la nappe pendant près de 200 ans.

Ces fluctuations sont devenues plus stables depuis la construction de l'écluse d'Alfortville vers 1902 et montrent des niveaux d'eau se situant entre 26,5 m et 27 m NGF dans la zone du lycée, avec un écoulement dirigé vers la Seine.

DÉSORDRES OBSERVÉS

L'apparition de nombreuses fissures, visibles notamment sur les façades intérieures donnant sur la cour d'Honneur et sur la cour Jardinnet ainsi que dans les voûtes et certains murs des sous-sols a conduit à implanter une série de jauges.

De façon générale, ces dernières ont montré la progression de ces fissures hormis certaines, moins nombreuses et moins ouvertes, localisées sur les façades de la rue de l'Eperon et de la rue Saint-André-des-Arts. Certains éléments structurels présentaient une menace de chute, notamment l'escalier monumental. Ces désordres ont conduit la Région Île-de-France à mener une opération de renforcement et de consolidation du lycée.

ORIGINE DES DÉSORDRES

Par manque de données suffisamment précises disponibles, des investigations complémentaires ont été menées concernant :

- 1- La profondeur et le type de fondations des bâtiments, la composition des soubassements, leur géométrie et leur état, grâce à une campagne de fouilles blindées et de géophysique ;
- 2- L'origine des tassements et leur rapport avec les réseaux fuyards ;
- 3- La composition structurale de l'escalier monumental et de ses supports ;
- 4- La composition des planchers et les éléments porteurs pour la descente des charges ;
- 5- Les réseaux de fluides du lycée (état général, fuites, débit, ...).

Cette campagne a permis de préciser l'origine des désordres et les hiérarchiser comme suit :

- 1- Présence de sols de faible portance sur les 5 premiers mètres environ ;
- 2- Des fuites de réseaux sous les trottoirs proches des soubassements ont produit un lessivage des particules fines du sol provoquant une perte de portance et des tassements ;

- 3- Un niveau d'assise des fondations variable et un mode de construction des soubassements variable (fondations superficielles et probablement des puits de fondation dégradés qui n'ont pas pu être reconnus par les sondages) ;
- 4- La composition de l'escalier constitué de marches en pierres appuyées sur les murs et sur le limon en pierre, fissuré par endroits ;
- 5- Fissure des murs et voûtes des sous-sols et des murs du RDC et des étages.

MÉTHODES DE RENFORCEMENT DES FONDATIONS

Deux principaux types de renforcement ont été mis au point en accord avec les conditions d'accès, l'état dégradé des soubassements et les délais très courts accordés à la réalisation des travaux (février à août 2023) :

- 1- Le renforcement du sol par jet grouting s'est avéré, après examen des accès, trop contraignant pour évacuer les scories et alimenter le chantier en quantité de ciment à injecter. Cette méthode,

en plus du risque de soulèvement, est apparue incompatible avec les délais convenus et n'a pas été retenue ;

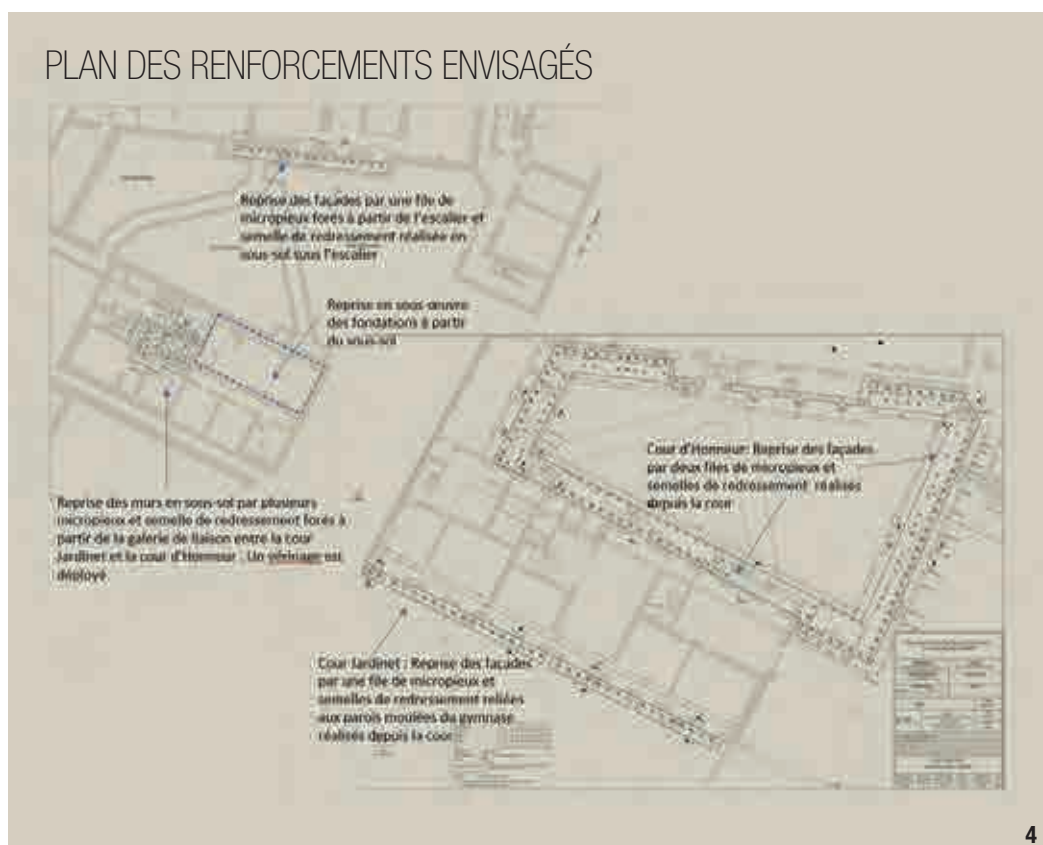
- 2- La reprise par micropieux s'est avérée plus adaptée sans toutefois convenir à toutes les conditions d'accès aux sous-sols, qui sont inaccessibles même aux petites machines de micropieux déployés dans les cours.

Le plan de principe de la figure 4 illustre les types de renforcements retenus par zone.

RENFORCEMENT DES FONDATIONS À PARTIR DES COURS

Compte tenu de l'accessibilité quasi-impossible par l'intérieur occupé par le mobilier parfois classé et des délais très courts, la reprise en sous-cœvre s'est réalisée à partir des faces extérieures accessibles depuis les cours.

La présence des auvents (hauteur libre de 2,6 à 2,8 m sous auvent) et des poteaux qui les soutiennent ont limité le choix des machines de forage.

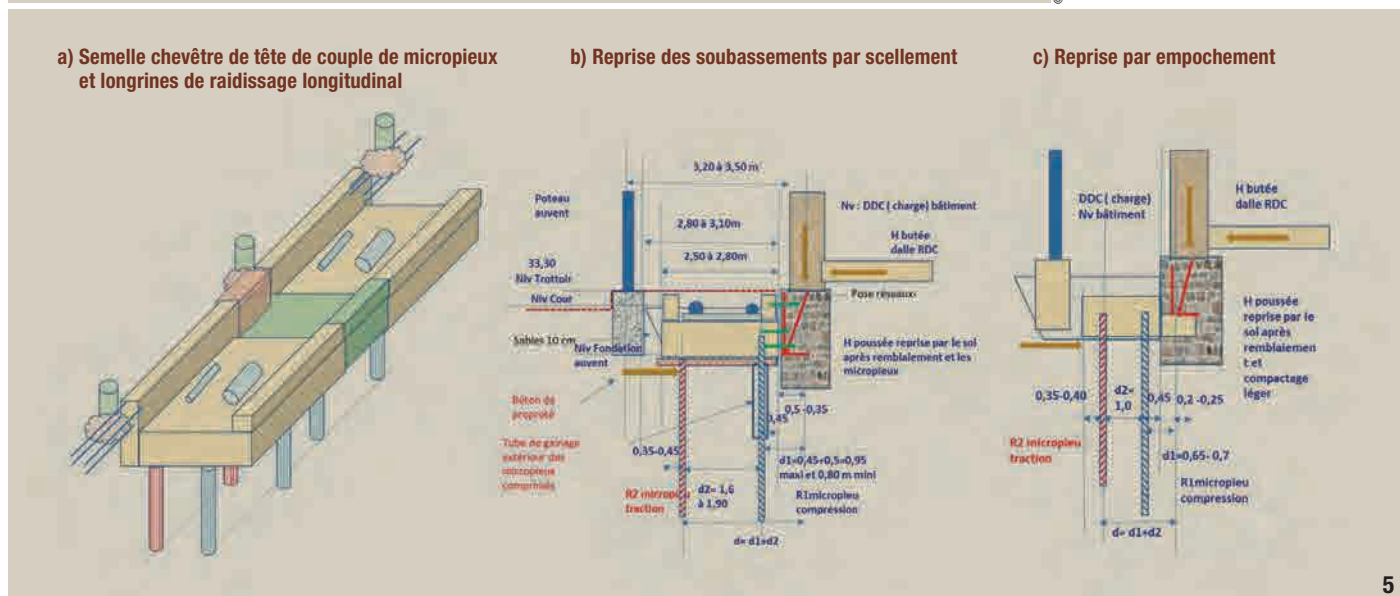


4- Plan des renforcements envisagés.

- 5- a) Semelle chevêtre de tête de couple de micropieux et longrines de raidissage longitudinal
- b) Reprise des soubassements par scellement
- c) Reprise par empochement.

4- Planned consolidation works.

- 5- a) Pier cap footing of a pair of micropiles and longitudinal stiffening members
- b) Underpinning of the basements by embedding
- c) Underpinning by pocketing.



© ARCADIS



6

© ARCADIS



7



8



9

Afin de reprendre l'excentricité de la charge par rapport aux micropieux, un système en double file de micropieux reliés par une semelle chevêtre fonctionnant comme un portique dans le sens perpendiculaire aux façades est envisagé.

Des longrines renforçant la semelle dans le sens longitudinal permettent d'homogénéiser les efforts sur les micropieux chargés parfois différemment afin d'atténuer les tassements différentiels. Ce principe est décrit sur la figure 5.

Afin de valider cette conception, 20 essais d'arrachement répartis le long des soubassements concernés par des

tractions ont été effectués. Des barres ont été scellées sur 60 cm de longueur dans les pierres accessibles à l'intérieur des sous-sols en phase conception. Une série de cisaillements par vérinage est réalisée sur des barres scellées sur la face extérieure des soubassements après les excavations blindées en phase travaux.

Les travaux des micropieux ont nécessité la réalisation de fouilles blindées (figure 6) servant pour le dévoiement du réseau de drainage des eaux pluviales et des eaux provenant du radier drainant du gymnase et pour la réalisation de la semelle chevêtre reliant les deux files de micropieux (figure 7).

Dans la zone de l'escalier du côté du bâtiment longeant la rue Saint-André-des-Arts, les micropieux ont été réalisés à partir de la cour d'Honneur à travers les marches d'escalier.

REPRISE EN SOUS ŒUVRE À PARTIR DU SOUS-SOL

Deux types de reprise en sous-œuvre ont été retenus pour les travaux à partir du sous-sol :

- 1- La zone accessible où des petites machines ont été utilisées pour réaliser des micropieux vérinés ;
- 2- La zone de la partie la plus ancienne du bâtiment ne pouvant pas être renforcée par micropieux, il a été

6- Fouille blindée dans la cour d'Honneur.

7- Ferrailage des semelles de micropieux ancrées dans la maçonnerie.

8- Puits blindé dans les sous-sols pour réalisation de nouveaux massifs de fondation.

9- Arcs avec tirant pour le renforcement des voûtes du sous-sol.

6- Lined excavation in the courtyard.

7- Reinforcement of the micropile footings anchored in the masonry.

8- Reinforced shaft in the basements for the execution of new foundation blocks.

9- Arches with tie anchor for reinforcement of the basement roofs.

préconisé de réaliser des reprises par massifs descendus à la couche de sol de bonne portance par des puits blindés réalisés par passes alternées. Ces puits en béton armé forment une prolongation des murs fissurés et sont reliés ensemble grâce au ferrailage continu. Ces nouveaux soubassements constituent des voiles épais qui homogénéisent les tassements différentiels grâce à la continuité de leur ferrailage. L'épaisseur des voiles prend en compte les contraintes admissibles du sol. Les grands volumes de déblais, de béton coulé et de remblais ont été maîtrisés dans les délais grâce à un système de convoyeurs de taille adaptée aux dimensions des soupoux situés en partie haute du sous-sol (figure 8).

RENFORCEMENT DES DÉSORDRES DE STRUCTURE EN SOUS-SOLS

Les voûtes fissurées ont été renforcées par la réalisation d'arcs avec tirant pour encaisser les charges en cas de petits mouvement après chargement du bâtiment et injection des fissures. ▷

10- a) escalier à renforcer, b) jauge Saunier pour mesurer les fissures, c) mur mixte bois et pierres, d) mise en place des poutres métalliques sous les volées endommagées.

10- a) Stairway to be strengthened, b) Saunier gauge to measure cracks, c) Composite wood/stone wall, d) Putting steel girders in place under the damaged stairs.



© ARCADIS

10a



© ARCADIS

10b



10c

© ARCADIS



10d

© ARCADIS

PRINCIPALES QUANTITÉS

REPRISE PAR MICROPIEUX :

- Nombre des micropieux : 227 pieux de 25 cm de diamètre du type IV armés par des tubes en acier

MICROPIEUX :

- Longueur totale des pieux : 2 760 m
- Armatures des pieux : tubes de Ø 60,3 mm ép. 10 mm à Ø 101,6 mm ép. 12,5 mm

VOLUME DU BÉTON :

- Coulis gravitaire : 143 m³
- Coulis IRS : 58 m³

LONGRINE TÊTES DES MICROPIEUX :

- Volume du béton : 270 m³
- Armatures : 35 000 kg
- Puits blindés : 108 m³ et 36 m
- Résine de mortier injectée sur 150 m environ

TRAVAUX DE TERRASSEMENT :

- Déblais : 550 m³

RENFORCEMENT DE L'ESCALIER MONUMENTAL

La reprise des marches étagées est réalisée au moyen d'une poutre métallique type IPE qui reprend le limon et qui est fixée entre le poteau existant créé lors d'un premier renforcement et le mur porteur en matériaux mixtes

(bois et pierres de remplissage reliées par un liant en ciment de plâtre).

Pour renforcer l'appui des marches au-dessus de la porte en bois, il a été mis en œuvre une poutre métallique type UPN fixée sur le mur, fonctionnant comme une poutre entre le limon fissuré et les murs ayant subi les tassements. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Région Île-de-France Pôle Lycées

MAÎTRE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉ :

Région Île-de-France Pôle Lycées Construction Durable

MAÎTRE D'ŒUVRE : Arcadis - Mfi-Architectes - Omega

BUREAU DE CONTRÔLE : Véritas

GÉOTECHNIQUE : Géotechnique Appliquée Île-de-France

CONSEILS DIAGNOSTICS GÉOTECHNIQUES : Cstb

ENTREPRISES PAROIS, FONDATIONS ET TERRASSEMENTS :

Spirale, Chanin BTP

ENTREPRISE VRD ET TCE : Balas

ABSTRACT

LYCEE FENELON IN PARIS - CONSTRUCTION WORK TO REPAIR DAMAGE TO LEGACY BUILDINGS

YOUSSEF JARADEH, ARCADIS - ZOHRA ZERFA, ARCADIS

Lycée Fénelon high school is located in the heart of the French capital (6th arrondissement). Its buildings, dating from 1830, are considered a cultural heritage, but are affected by soil erosion and structural weakening. To conserve the building, the Ile-de-France Region undertook works to consolidate the foundations with micropiles and the structure with cement grouting, and to renovate the utility networks. The difficulties involved in execution of the consolidation works are mainly due to the cramped basement space, the variable state of the foundations, difficulties of access and the tight schedule. It was necessary to first consolidate the leaky network adjoining the facades and install a network for temporary drainage of waters from the gymnasium's drainage foundation raft. □

EL LYCÉE FENELON EN PARIS - EL BTP AL SERVICIO DE LAS PATOLOGÍAS DE LOS EDIFICIOS PATRIMONIALES

YOUSSEF JARADEH, ARCADIS - ZOHRA ZERFA, ARCADIS

Situado en pleno centro de la capital francesa, los edificios del Lycée Fénelon, erigidos en 1830 y considerados patrimonio histórico, sufren un efecto de erosión del suelo y una fragilización de la estructura. Para la conservación del edificio, la región de Île-de-France ha iniciado obras de refuerzo de los cimientos por micropilotes y de la estructura por inyección, así como la renovación de las redes. Las dificultades relacionadas con la realización de los refuerzos proceden básicamente de la exigüidad de los subsuelos, el estado variable de los cimientos, las dificultades de acceso y una ajustada planificación. Fue preciso reparar previamente el bajante que discurre entre las fachadas, que presentaba fugas, e instalar una red de evacuación provisional de las aguas de la losa drenante del gimnasio. □



BTP BANQUE

GRUPE CREDIT COOPERATIF

C'est le métier qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

www.btp-banque.fr



1
© CÉDRIC HELSLY

RC² : RÉGÉNÉRATION CATÉNAIRE DU RER C - RÉALISATION DE MINIPIEUX DE FONDATION DES FUTURS POTEAUX CATÉNAIRES

AUTEURS : MATHILDE BONNET, RESPONSABLE TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES -
YOUSSEF QADIRI, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

LE RER C NÉCESSITE UNE RÉNOVATION COMPLÈTE DE LA CATÉNAIRE SUR SA PARTIE SUD. L'ENJEU MAJEUR DU PROJET EST DE RÉALISER DES FONDATIONS AU MILIEU DES NOMBREUX RÉSEAUX ET POTEAUX EXISTANTS, À TRAVERS DES TERRAINS PARSEMÉS D'OBSTACLES VARIÉS, LE LONG DES VOIES SNCF ET SANS INTERROMPRE LA CIRCULATION DU RER. SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES A REMPORTÉ CE MARCHÉ DE FONDATIONS SUR LA BASE D'UNE SOLUTION INNOVANTE NÉCESSITANT LE DÉVELOPPEMENT ET LA CONSTRUCTION EN INTERNE DE DEUX TRAINS TRAVAUX QUI SATISFONT AUX MULTIPLES ET COMPLEXES SUJÉTIONS SPÉCIFIQUES À CE PROJET.

La fréquentation du RER C peut atteindre 540 000 voyageurs par jour. Des 5 lignes de RER, c'est celle qui transporte le plus de touristes en Île-de-France (15 % de sa fréquentation).

La constante augmentation de sa fréquentation, combinée au vieillissement des infrastructures (datant de 1925

pour certaines), est à l'origine du projet de modernisation du réseau Sud parisien du RER C, sur le Bloc Nord, entre Bibliothèque-François-Mitterrand (exclu) et Athis-Mons (inclus).

Il s'agit de renouveler la caténaire actuelle par une nouvelle caténaire haute performance CSRR (Caténaire Simplifiée Renforcée Régularisée).

1- Forage en cours avec le TTX fondation.

1- Drilling in progress with the foundation work train.

Les critères de modernité imposent des portées plus courtes de caténaire et par conséquent un nouveau piquetage des poteaux. Ces poteaux reposeront sur des minipieux, réalisés depuis un train travaux, s'insérant entre les poteaux existants et forés lors de fenêtres de travail de faible trafic, de jour comme de nuit.

SITUATION GÉOGRAPHIQUE DU PROJET

DE 2018 À 2022...

La volonté de modernisation du réseau date de 2016. Ce plan global de renouvellement de la ligne 570000 s'étend de la gare Paris Austerlitz à celle de Brétigny-sur-Orge, soit l'équivalent de plus de 180 km en développé, incluant 14 gares (figure 1). L'enjeu majeur du projet est de positionner des fondations à travers les nombreux réseaux et poteaux existants, le long des voies SNCF, sans interrompre la circulation du RER.

Le consortium privé RC2, composé de TSO Caténaire/Etf/Cegelec Mobility/Setec Ferroviaire, a gagné le marché en 2017, en conception réalisation. Il a attribué le marché des fondations à Soletanche Bachy Fondations Spéciales en 2018. La capacité à traverser de multiples matériaux (bois, dalles renforcées, ...) sans pollution du ballast a été décisive dans l'obtention du marché des fondations.

PRÈS DE DEUX ANNÉES DE CONCEPTION

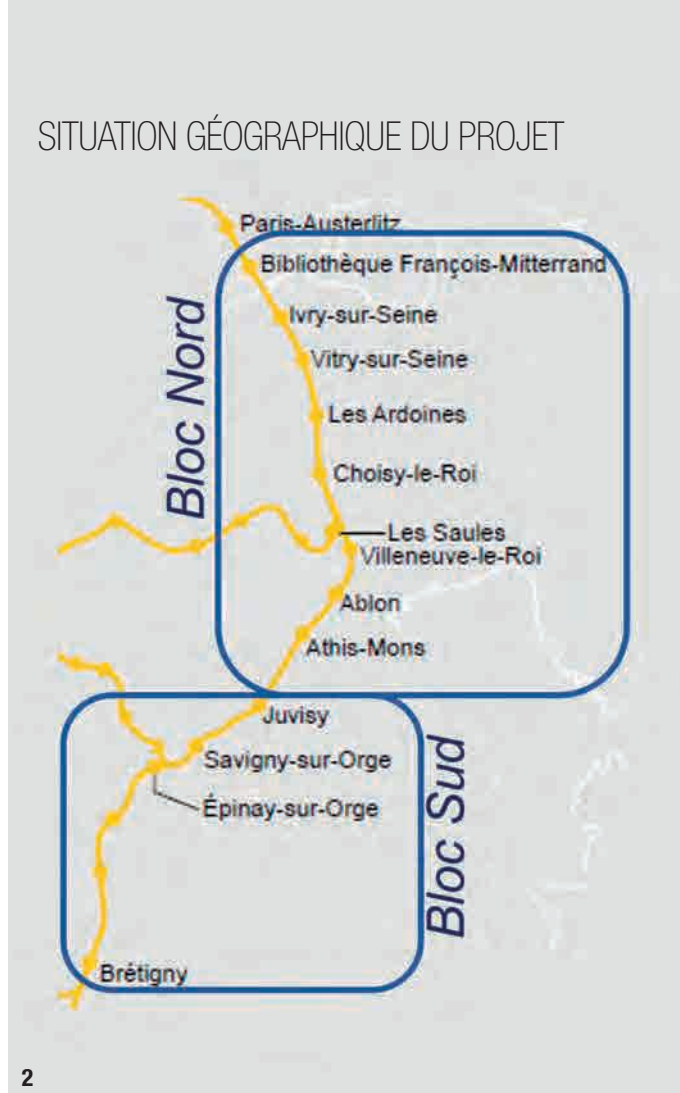
LE MINIPIEU

Les fondations sont dimensionnées selon le type de support qu'elles accueillent. Ces supports sont de plusieurs types :

- Portiques pour 4 voies ;
- C2V/C1V (consoles pour une ou deux voies) ;
- Des ancrages pour les haubans.

Identité de la fondation (figure 3) :

- Profondeur de 3,24 à 16,80 m ;
- Épaisseur variable du tube du minipieu (de 10 à 40 mm) ;
- Tube déballasteur de protection ;
- Outils perdus différents selon la géologie et la profondeur ;



2

© LE BLOG DU RER C

2- Situation géographique du projet.

3- Minipieu réalisé.

4- Chevêtre préfabriqué double.

2- Geographic location of the project.

3- Completed minipile.

4- Precast double pier cap.

→ Poids de l'armature totale du minipieu variant de 99 kg à 6 t.

La fondation retenue et validée dans le catalogue SNCF est un minipieu de diamètre 336 mm mis en œuvre par la technique autoforée. L'IG 90033, qui définit les règles de conception, réalisation et contrôle à proximité des ouvrages ferroviaires, impose un blindage en tête du forage, afin de ne pas déconsolider les voies où les trains circulent jusqu'à 140 km/h.

De ce fait, le minipieu a été équipé d'un tubage en tête fiché de 2 m minimum dans le terrain permettant de réaliser

des forages jusqu'à une proximité de 1,55 m par rapport aux voies.

Ce tubage, nommé tube déballasteur, a plusieurs fonctions :

- Blindage du forage en tête ;
- Autorisation de forer sans Limitation Temporaire de Vitesse (LTV) avant, pendant et après l'intervention ;
- Élément de récupération des cuttings, permettant de ne pas polluer le ballast.

L'INTERFACE FONDATION/POTEAUX

Le principe initial de conception de la liaison entre la fondation et le poteau reposait sur une platine vissée directement sur le tube central du minipieu. C'est au cours d'essais de conformité réalisés durant les années 2018 et 2019 que la platine a été abandonnée au profit d'un chevêtre en béton armé préfabriqué. En effet, la platine ne permettait pas de reprendre les différentes composantes des torseurs d'efforts transmis au minipieu par le poteau caténaire, et notamment les efforts de moments de basculement perpendiculaires et parallèles aux voies. En outre, l'apparition d'un moment horizontal autour de l'axe du poteau (torsion) a également impacté le dimensionnement même de la fondation en donnant lieu à un dédoublement des minipieux sur certains types de supports. Cette disposition imprévue aboutit à l'augmentation d'environ 18% du nombre de minipieux prévus sur la première zone d'intervention.

En complément des calculs statiques de conception, le dimensionnement a été complété d'essais de résistance à la fatigue. ▷

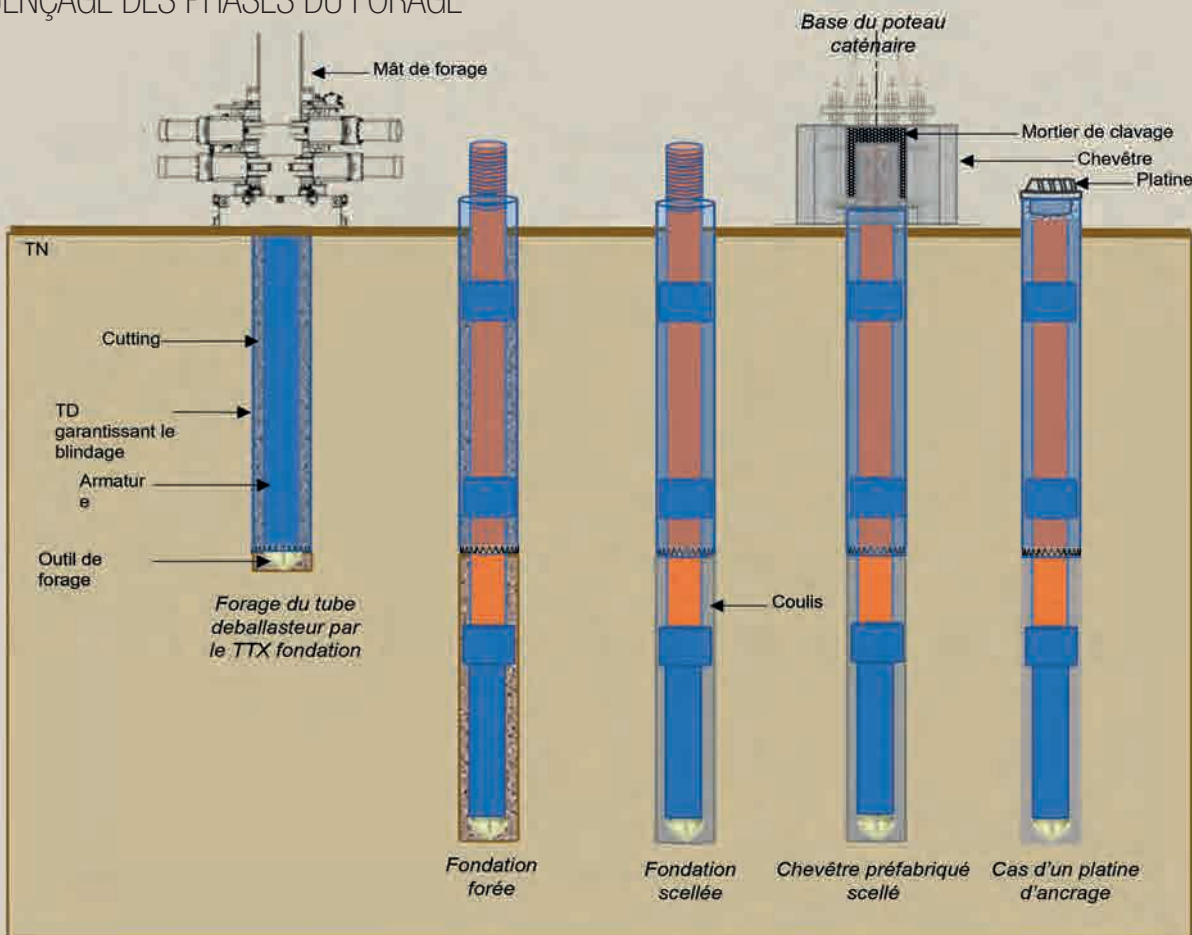


© SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES



© SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

SÉQUENÇAGE DES PHASES DU FORAGE



5

© SOLETA/NOÛVE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

Plusieurs milliers de cycles de sollicitations ont ainsi été menés au sein du laboratoire du CSTB sur des éléments de fondation réalisés à l'échelle 1, jusqu'à atteindre un début de rupture, permettant ainsi d'appréhender par l'expérience les coefficients de sécurité réels du dimensionnement.

Identité du chevêtre (figure 4) :

Deux modèles préfabriqués :

→ Chevêtre simple : 1,3 t ;

→ Chevêtre double : 2,7 t.

La fondation innovante est adaptée selon le support qu'elle accueillera.

La figure 5 décrit les étapes de forage de la pose du tube déballesteur jusqu'au type d'interface adapté au support :

→ Ancrage normal avec une platine ;

→ Portique et ancrage surélevé avec un chevêtre simple ;

→ C2V avec un chevêtre double.

LES CONTRAINTES DU PROJET

Les fondations présentes sur le réseau actuellement sont de type massif parallélépipédique.

Elles consistent en un terrassement avec blindage à l'avancement (selon la proximité avec les voies), et mise en place du béton pleine fouille pour sceller le poteau caténaire. Dans certains cas, une Limitation Temporaire de Vitesse (LTV) est appliquée.

Cette Limitation Temporaire de Vitesse impacte le trafic commercial en allongeant les temps de trajet des usagers. Le réseau ferroviaire devant rester disponible pour le trafic pendant toute la

5- Séquencage des phases du forage.

6- Environnement du projet.

5- Sequencing of drilling phases.

6- Project environment.

durée du projet, il était nécessaire de proposer une solution moins invasive, tant dans l'acheminement du matériel que sur l'emprise de la future fondation. L'environnement (figure 6) ne se limite pas seulement aux poteaux existants, desquels les futures implantations peuvent s'approcher jusqu'à 1 m, mais aussi :

→ Aux caniveaux (HT, BT, drainage, ...) ;

→ À la hauteur de la caténaire variant entre 4,60 et 6 m ;

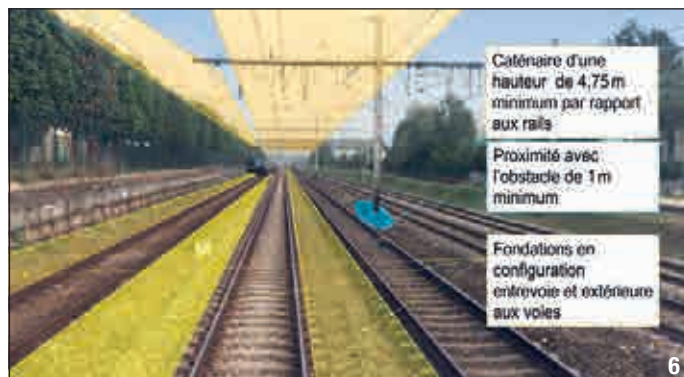
→ Aux talus positifs ou négatifs ;

→ À la coactivité des travaux sur la même voie.

Par ailleurs, il est fondamental de maintenir en exploitation les voies contiguës lors du travail de jour.

Les horaires de travail imposés doivent se situer hors période de pointe : intervention possible de jour, de 10h30 à 14h30, et de nuit, de 23h30 à 04h00.

Le travail se fait sous Interruption Temporaire de Circulation (ITC) et il est également interdit de laisser une fondation en cours de forage non scellée pendant plus de 24h.



6

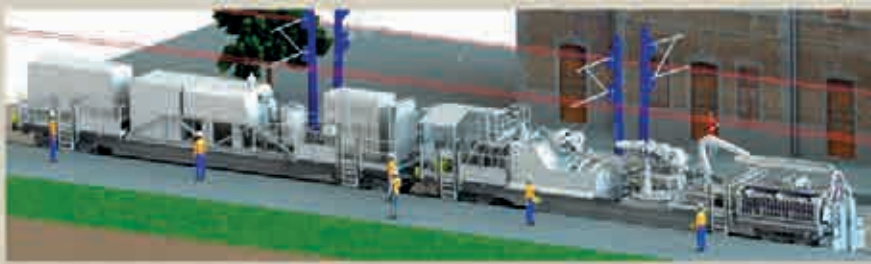
© IMAJNET



7

© CÉDRIC HELSLY

DESIGN DU TRAIN AVANT FABRICATION



8

© SOLETANCHE BACHY FRANCE

Le tableau A présente les intérêts à privilégier la fondation innovante.

CONSTRUCTION DES TRAINS TRAVAUX

La compétence du service matériel de Soletanche Bachy a permis de conserver en interne la conception sur mesure des trains de fondation (figure 8). Un appui externe du service matériel

7- TTX fondation actuel.

8- Design du train avant fabrication.

7- Current foundation work train.

8- Train design before manufacturing.

de Tso était cependant nécessaire dans l'accompagnement réglementaire propre au domaine ferroviaire et le montage des dossiers techniques pour l'obtention des agréments de circulation et de travail.

Après plus d'un an de travail, les deux trains de fondation étaient aptes au service (figure 7). Ces deux trains sont composés respectivement d'un wagon

de forage et d'un wagon d'alimentation permettant d'être autonome pour plus de 20 m de forage.

Le procédé Hi'Drill, breveté par Soletanche Bachy et embarqué sur chaque rame, a été mis en œuvre sur ce chantier pour sécuriser le forage dans tout type de terrain.

Le système de récupération des déblais de forage en tête de forage, permettant de ne pas polluer le ballast et de travailler en circuit fermé a, quant à lui, été développé et mis au point par Soletanche Bachy Fondations Spéciales durant l'année 2018.

En 2022, le train de clavage a été construit pour répondre à l'activité de liaisonnement entre le massif préfabriqué et le micropieu.

Au total, 3 trains travaux sont actuellement actifs sur le projet, l'ensemble faisant l'objet d'un brevet déposé par Soletanche Bachy en 2018.

DE L'IMPLANTATION AU POTEAU CATÉNAIRE EN AMONT

Des tournées, dites de fiabilisation, sur tout le linéaire du projet, sont organisées entre le groupement et les équipes forage de manière à valider conjointement l'implantation de la fondation selon les contraintes de chacun. Cette phase est nécessaire pour définir les travaux préparatoires obligatoires (un simple nivellement, une retenue de ballast ou la création d'une niche préfabriquée dans un talus) avant l'intervention du train travaux de fondation.

L'implantation est confirmée à la suite d'un sondage exploratoire (1,20 m de profondeur) et si nécessaire du sondage pyrotechnique. L'implantation est dite sécurisée, lorsque ces sondages sont valides.

TABLEAU A : COMPARAISON D'UNE FONDATION TRADITIONNELLE (PARALLÉLÉPIPÉDIQUE) AVEC LA FONDATION INNOVANTE

	Massif parallélépipédique	Fondation innovante
Blindage à proximité des voies	Selon la distance aux voies	Tube déballasteur intégré au forage
LTV	Selon le type de fouille	Jamais
Encombrement (surface)	1,20 x 2,10 m mini	ø 336 mm
Positionnement entre plusieurs caniveaux	Impossible sans dévoiement des réseaux et démantèlement	Nécessité du diamètre du blindage (< 360 mm) + tolérances d'exécution
Temps d'exécution	1 à 3 ITC selon le volume	1 ITC
Moyens matériels	1 pelle + 1 toupie béton	1 train travaux autonome en forage et scellement
Moyens humains	6 opérateurs	6 opérateurs



© SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

9



© SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

10

LES ÉTUDES

Le bureau d'études va exécuter jusqu'à 9 itérations de calculs pour que la fondation soit réalisable. En effet, différentes configurations sont testées pour limiter le nombre d'ancrages du support. Une optimisation sur certains coefficients peut être ajoutée et, en cas d'impossibilité, un dédoublement de la fondation est proposé.

Le dimensionnement doit respecter différents critères, notamment vis-à-vis de la durabilité centennale requise pour l'ouvrage.

Ceci induit des spécificités sur la corrosion admissible au calcul, le déplacement en tête de la fondation, la galvanisation des pièces métalliques hors sol, etc.

LA PRODUCTION

La production est dictée par le temps de travail effectif à la suite des protocoles de consignation de la caténaire et de la voie.

Chaque fondation est associée à un temps de production, afin de gérer

au mieux le temps restant de l'ITC. En fin d'ITC, les trains travaux retournent en base arrière, afin d'être déchargés des déblais de forage, nettoyés et rechargés en eau, ciment et armatures.

Dans un second temps, une deuxième équipe intervient pour poser le chevêtre sur le micropieu à l'aide d'une draine (engin ferroviaire équipé d'un bras de grue) et réalise le clavage entre le chevêtre et le micropieu.

28 jours après la réalisation de la fondation, le poteau est mâté (figure 9).

UN CONTRÔLE QUALITÉ NUMÉRIQUE

Une interface numérique a été créée afin d'envoyer un programme de chargement incluant le détail du calepinage des fondations (figure 10).

Lors du chargement, les armatures sont scannées par le biais d'un QRCode (figure 11) pour générer une fiche

9- Poteau caténaire mâté sur un chevêtre simple.

10- Zoom sur les multiples armatures chargées sur le TTX.

11- Exemple de QRcode sur armature.

12- Frise chronologique des événement du projet.



© SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

11

9- Catenary mast on a single pier cap.

10- Close-up view of the numerous rebars loaded on the foundation work train.

11- Example of QR code on rebar.

12- Timeline of project events.

FRISE CHRONOLOGIQUE DES ÉVÉNEMENT DU PROJET





© CÉDRIC HELSINX

13

13- Forage en cours.

13- Drilling in progress.

de forage avec le numéro de coulée associée à chaque armature, ainsi que les contraintes environnementales par fondation.

La mise en place de ce système de gestion qualité a permis de :

- Faciliter le système de suivi qualité en évitant les erreurs de saisie ;
- Faciliter la communication entre les différentes parties (Programmation/ Base arrière/RCE forage) ;
- Gagner de temps de manière conséquente grâce à la centralisation des informations ;
- Faciliter le suivi de la production ;

PRINCIPALES QUANTITÉS

- Plus de 1 400 minipieux, à l'aide de 2 trains travaux fondation
- Plus de 10 km de micropieux forés
- 2 ½ ans de production en continu
- Profondeur de fondation jusqu'à 16,90 m
- 3h de temps de travail sous ITC de jour ou de nuit
- 4 ateliers (2 de forage, 1 de nettoyage, 1 de clavage)
- 28 personnes mobilisées en continu
- Durée de moyenne de réalisation d'une fondation : 100 minutes

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : SNCF Réseau, DG IDF

CONCEPTION RÉALISATION : Groupement RC² composé de Tso Caténaire / Etf / Cegelec Mobility / Setec Ferroviaire

TITULAIRE DU MARCHÉ DE FONDATIONS INNOVANTES : Soletanche Bachy Fondations

→ Respecter les exigences qualité du client sur la traçabilité des armatures par fondation.

RÉTROSPECTIVE DU PROJET

Suite à une suspension du projet de plus de deux ans, la reprise s'est effectuée en octobre 2022 avec une division du projet en deux temps.

Le travail se concentre actuellement sur le bloc Nord.

Les neuf premiers mois de production ont permis de réaliser sur la première sous-zone :

- 75% des minipieux ;
- 60% des chevêtres ;
- 10% de travail de nuit ;
- 90% de travail de jour.

Les deux prochaines années se dérouleront majoritairement de jour, à quelques exceptions près pour les voies de service. □

ABSTRACT

RC²: RENOVATION OF THE CATENARY SYSTEM OF RER C - EXECUTION OF FOUNDATION MINIPILES FOR THE FUTURE POLES

MATHILDE BONNET, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES -
YOUSSEF QADIRI, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

The RER C rapid transit line can carry as many as 540,000 passengers per day. The increased number of passengers, combined with ageing of the network, means that a complete renovation is required on the southern part of the line. After the RC² consortium acquired the Design and Build contract, Soletanche Bachy Fondations Spéciales obtained the contract for the foundations. The major challenge facing the project is to position foundations among the numerous existing networks and poles along the railway tracks, without disrupting the RER traffic. SBFS had to adapt its drilling techniques to the rail transport sector, by developing and building in-house, for the very first time, work trains having an autonomy of more than 20 metres of drilling. The work trains therefore work on the network in short time slots (about 3 hours); after their passage they leave a foundation only 336 mm in diameter visible on the edge of the tracks. □

RC²: REGENERACIÓN DE LA CATENARIA DEL RER C - REALIZACIÓN DE MINIPILOTES DE CIMENTACIÓN DE LOS FUTUROS POSTES

MATHILDE BONNET, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES -
YOUSSEF QADIRI, SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPÉCIALES

La línea de tren regional francesa RER C puede llegar a transportar 540 000 viajeros al día. El aumento de la frecuentación, combinada con el envejecimiento de la red, requiere una renovación completa del sur de la línea. Tras la obtención del contrato de diseño-realización por el consorcio RC², Soletanche Bachy Fondations Spéciales ha logrado el contrato de los cimientos. El principal reto del proyecto es posicionar los cimientos a través de las numerosas redes y postes existentes a lo largo de las vías SNCF sin interrumpir la circulación del RER. Para ello, SBFS ha tenido que adaptar sus técnicas de perforación al ámbito ferroviario, desarrollando y construyendo internamente, por primera vez en su historia, trenes de obra con una autonomía de más de 20 m de perforación. Los trenes de obra se insertan en la red en franjas horarias de corta duración (unas 3h), y tras su paso tan solo dejan una franja de cimentación de 336 mm de diámetro visible al borde de las vías. □



LIGNE 18 GRAND PARIS EXPRESS - GARE MASSY-PALaiseAU - LE CHANTIER AU MILIEU DU FAISCEAU FERROVIAIRE

AUTEURS : CÉLINE CADET, CHEF DE PROJET, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - THOMAS RICHEZ, ASSOCIÉ, CABINET RICHEZ ASSOCIÉS - JULIEN GAUTHERIE, DIRECTEUR DE PROJET, ARTELIA - YVAN GRAVÉ, DIRECTEUR TRAVAUX, VINCI CONSTRUCTION (DODIN CAMPENON BERNARD) - PASCALE LOUVEL, INGÉNIEURE ÉTUDES, SPIE FONDATIONS

ANCRÉ ENTRE DEUX PASSERELLES, AU MILIEU DE DEUX SITES FERROVIAIRES EN EXPLOITATION, L'OUVRAGE DE LA FUTURE GARE DE MASSY-PALaiseAU EST UN DÉFI CONCEPTUEL ET ARCHITECTURAL SUBISSANT DE MULTIPLES CONTRAINTES DE CONSTRUCTION.



PRÉSENTATION DU PROJET

La gare Massy-Palaiseau sera sur la future Ligne 18 qui s'inscrit dans le projet du Grand Paris Express. Il s'agit de la création de 4 nouvelles lignes (15, 16, 17 et 18) et le prolongement de la Ligne 14 de Saint-Denis-Pleyel à Orly : 200 km de ligne, 68 nouvelles gares. Démarré en 2015, le projet est prévu s'achever en 2030. À cette échéance, ce sont près de 3 millions de voyageurs par jour qui sont attendus. Ce nouveau métro reliera les principaux lieux de vie et d'activité de la métro-

1- Ateliers de forage de paroi moulée proche de l'écran de protection des voies SNCF.

2- Tracé de la Ligne 18.

1- Diaphragm wall drilling rigs near the rail track protective barrier.
2- Line 18 alignment.

pole du Grand Paris (la Défense, les 3 grands aéroports franciliens, le marché de Rungis ou encore les principaux pôles universitaires). Il proposera un maillage efficace du territoire francilien : 80% des nouvelles gares offriront des correspondances avec les RER, métros et tramways. Les temps de trajet de banlieue à banlieue seront considérablement réduits puisqu'il ne sera plus nécessaire de passer par Paris pour se déplacer en Île-de-France. Traversant un territoire stratégique du Grand Paris, la Ligne 18 assurera

la mise en relation des grands pôles économiques situés à Orly, Antony, Massy, Saint-Quentin-en-Yvelines et Versailles. Elle desservira également l'un des premiers pôles de recherche et développement du monde, Paris-Saclay.

Ce pôle représente 30 000 étudiants, 13% de la recherche nationale publique (CEA Saclay, Université Paris Saclay, Polytechnique, Agroparistech...) et privée, et de nombreuses entreprises de pointe (Thales, EDF, Danone, Renault...) (figure 2).



3

© RICHEZ ASSOCIÉS

La gare Massy-Palaiseau s'inscrit dans un pôle multimodal déjà riche en offre de transports : RER C, T12, RER B, Gare Massy TGV et 2 gares routières. Positionnée au centre du faisceau ferroviaire et donc du pôle, sa position lui permettra de réaliser la connexion la plus efficace avec l'ensemble des transports en présence. En contrepartie de cet emplacement optimal pour l'intermodalité, des travaux d'ampleur sont à mener à proximité directe des voies ferrées et d'ouvrages d'art existants qui enjambent ces mêmes voies, un véritable défi technique pour les équipes

de maîtrise d'œuvre et les entreprises, qui ont dû composer avec ces ouvrages sensibles.

Pour permettre la réalisation de ces travaux d'ampleur, un vaste programme d'auscultation sur l'ensemble des voies ferrées RATP et SNCF ainsi que des passerelles a été mis en place. Un confortement préalable à la réalisation des parois moulées, des excavations et du tunnel a également été nécessaire au niveau d'une pile d'une passerelle piétonne appartenant conjointement à la SNCF et la RATP. L'ensemble de ces opérations n'aurait

3- Perspective gare L18 Massy-Palaiseau.

4- Hall gare L18 Massy-Palaiseau.

3- Artist's view of L18 Massy-Palaiseau station.

4- L18 Massy-Palaiseau station hall.

pu être mené à bien si un dialogue étroit n'avait pas été instauré avec la commune de Massy mais aussi avec la SNCF et la RATP.

CHOIX DU CONCEPT ARCHITECTURAL

En termes d'implantation, le site de Massy-Palaiseau est un étonnant plateau de voies ferrées, comportant 4 gares et 2 pôles bus, surplombé par 2 longues passerelles parallèles, qui assurent les correspondances tous modes et relient les quartiers Atlantis et Vilmorin.



4

© RICHEZ ASSOCIÉS

5- Implantation de la gare / domaine SNCF.

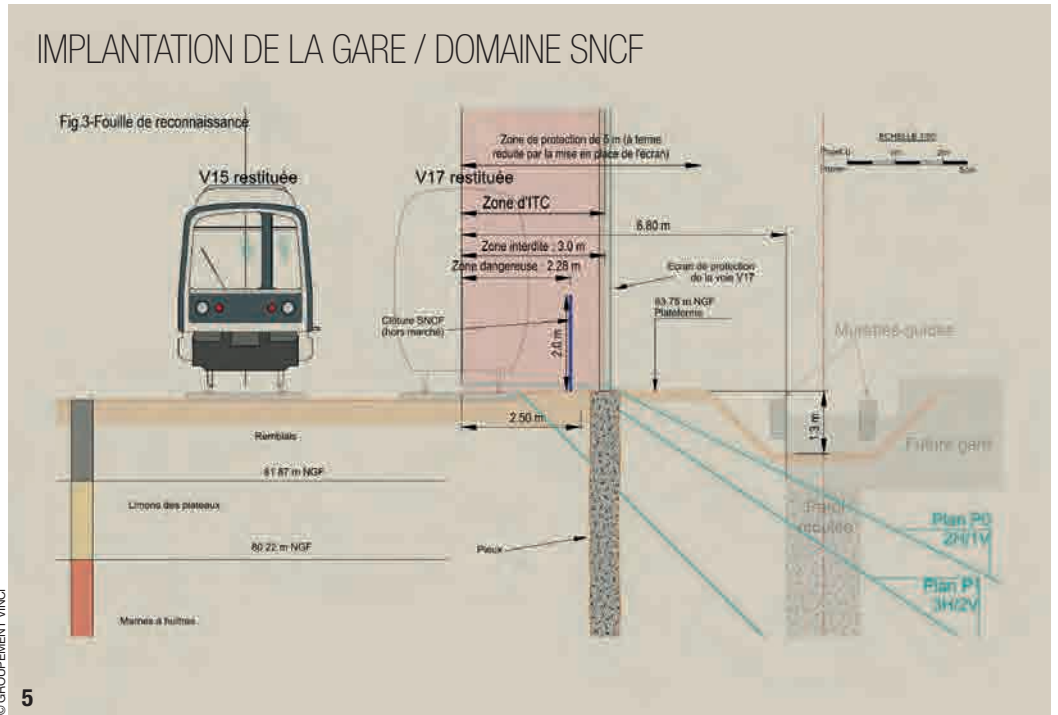
6- Forage d'une barrette à proximité de l'appui existant de la passerelle historique.

7- Mise en tension des aciers pour assemblage des chevêtres avant sciage.

5- Location of the station/SNCF domain.

6- Drilling a barrette near the existing supporting structure of the old foot bridge.

7- Rebar tensioning for assembly of the pier caps before sawing.



© GROUPEMENT VINCI 5

Comme un iceberg au milieu d'une mer de fer, la gare de la Ligne 18 émerge au milieu de ce plateau, et connecte le monde du dessous, celui du génie civil souterrain, avec le monde du dessus, celui des longs parcours plein ciel dans les vastes horizons du site (figure 3). La gare prend ainsi la forme de deux longs volumes obliques de béton blanc

et de verre sérigraphié. Ils identifient le bâtiment dans le lieu, et accompagnent les voyageurs, des passerelles aériennes aux quais, et des quais aux passerelles. En biais entre les deux volumes, un parcours extérieur les relie : il abrite sous une fine nappe de sheds les longues poutres-échelles qui portent les toitures du bâtiment.

À l'intérieur, le voyageur émerge, en trois volées d'escalier mécanique, d'un monde massif de béton apparent, mat et enveloppant, vers la légèreté du métal baigné de lumière naturelle.

D'amples et chaleureux plafonds de lames de chêne l'accompagnent dans un parcours très fluide. Ils le guident

dans des volumes clairs, lisibles, qui mettent en scène l'apparition des vues vers les quais des autres lignes et vers l'horizon (figure 4).

Le campus des gares de Massy-Palaiseau s'enrichit ainsi d'un nouveau bâtiment conçu très naturellement autour de sa pratique et à partir de sa situation très spécifique. ▶



6 © ARTELIA



7 © ARTELIA

CHOIX TECHNIQUE DE CONSTRUCTION/CONTRAINTES

Ce positionnement de la future gare en plein milieu des faisceaux ferroviaires RATP et SNCF et au milieu des deux passerelles d'accès aux futurs quais a imposé de nombreuses contraintes techniques en termes de conception.

Les méthodologies de réalisation ont été guidées par :

- Le respect des différents référentiels ingénierie (IG) SNCF et leurs équivalents RATP ;
- Les préconisations spécifiques en termes de tassements sur les voies et ouvrages avoisinants, imposées par la Mission de Sécurité Ferroviaire (MSF) et le département RATP Gestionnaire d'Infrastructure Relations Extérieures (GIRE) ;
- La prise en compte de la proximité des caténaires des voies électrifiées proches du chantier.

L'ensemble de ces contraintes, combinées au contexte de la géologie du plateau d'Orly, ont conduit à retenir la technique de la paroi moulée.

La limite imposée en termes de tassements sur les voies ferrées les plus proches (situées à une dizaine de mètres) était de 15 mm en tête de paroi et de 20 mm en travée, et de 5 mm sur les ouvrages d'art. À cela s'ajoute l'ensemble des préconisations de tassements relatifs sur les voies circulées (gauche, dévers...). Ces contraintes ont également nécessité la mise en œuvre d'un écran de protection pour matérialiser la zone dangereuse autour des voies ferrées électrifiées (figure 5). Ces données d'entrée ont influencé le phasage de la gare en privilégiant un phasage en top down afin de pouvoir profiter de l'inertie de la dalle de couverture réalisée avant les terrassements et limiter les déplacements en tête des parois.

Pour porter la dalle de couverture sur la largeur de la gare, des poteaux pré-fondés sont apparus nécessaires et ont été intégrés à la conception de la gare notamment au niveau des quais en s'intégrant aux espaces voyageurs. Ceci a conduit à un élargissement de la largeur de la gare initiale la portant à 29 m. Ces poteaux ont été conçus en panneau de paroi isolé appelé barrette, réalisé en arase basse jusqu'au niveau du radier et dans lequel sont insérés des profilés aciers type HEM jusqu'au niveau de la dalle de couverture (environ 24 m).

Cette conception s'inscrit également dans un contexte pyrotechnique hérité



8

© GÉRARD ROLLANDO - SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

de la seconde guerre mondiale et des nombreux bombardements que la gare a subis. Tout ceci a été documenté grâce à l'élaboration d'une étude historique de pollution pyrotechnique menée en phase conception et a abouti à près de 300 sondages destructifs de reconnaissance pyrotechnique allant jusqu'à 6 m de profondeur, correspondant à la limite de la couche géologique pouvant contenir des munitions encore intactes. Une étroite collaboration avec les services de la préfecture de l'Essonne a

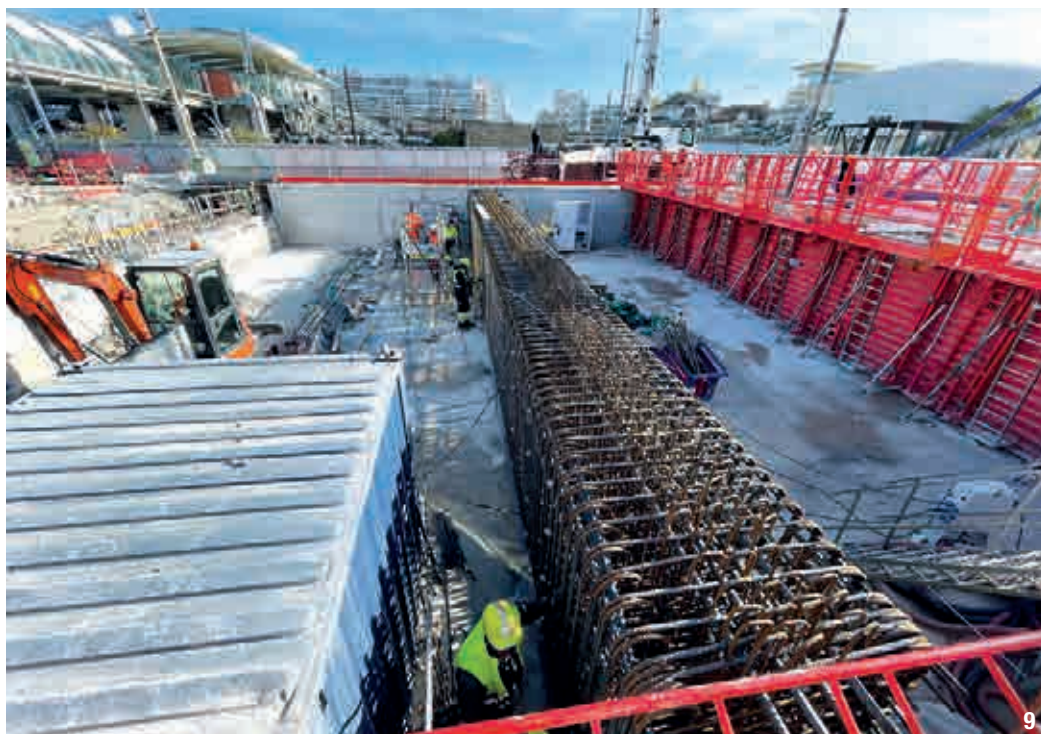
8- Boîte infrastructure et passerelle historique.

9- Ferrailage des poutres de la dalle de couverture.

8- Infrastructure box and old foot bridge.

9- Reinforcement of the cover-slab beams.

été nécessaire pour mettre en œuvre un dispositif d'évacuation efficace des objets pyrotechniques. Aucun objet pyrotechnique n'a finalement été découvert lors de la réalisation des travaux. Dans ce site exigu, la passerelle appelée "historique" a ajouté une contrainte technique supplémentaire. Cette passerelle datant de 1936, réalisée en béton avec travées de type bow string est très proche de la boîte gare avec un appui se trouvant à 10 m de la jupe du tunnelier.



9

© ARTELIA



10
© GROUPEMENT VINCI



11
© ARTELIA

La proximité de cet ouvrage, la méconnaissance de la profondeur de ses fondations et son âge avancé ont nécessité des travaux de reprise de l'appui en sous-cœvre.

Compte tenu de l'état de la passerelle et de l'incertitude quant à son principe de fondations, le groupement de maîtrise d'œuvre, en concertation avec le MOA et le Cerema, a conçu une solution avec un nouvel appui fondé à plus de 30 m de profondeur, de sorte qu'elle ne subisse aucun mouvement préjudiciable lors de la réalisation des travaux de la gare et au passage du tunnelier.

10- Ensemble lierne et butons côté tympan.

11- Ferrailage du radier.

12- Entrée du tunnelier Céline dans la boîte gare.

10- Set of lierne ribs and stays on the front-wall side.

11- Reinforcement of the invert.

12- Céline TBM entry in the station box structure.

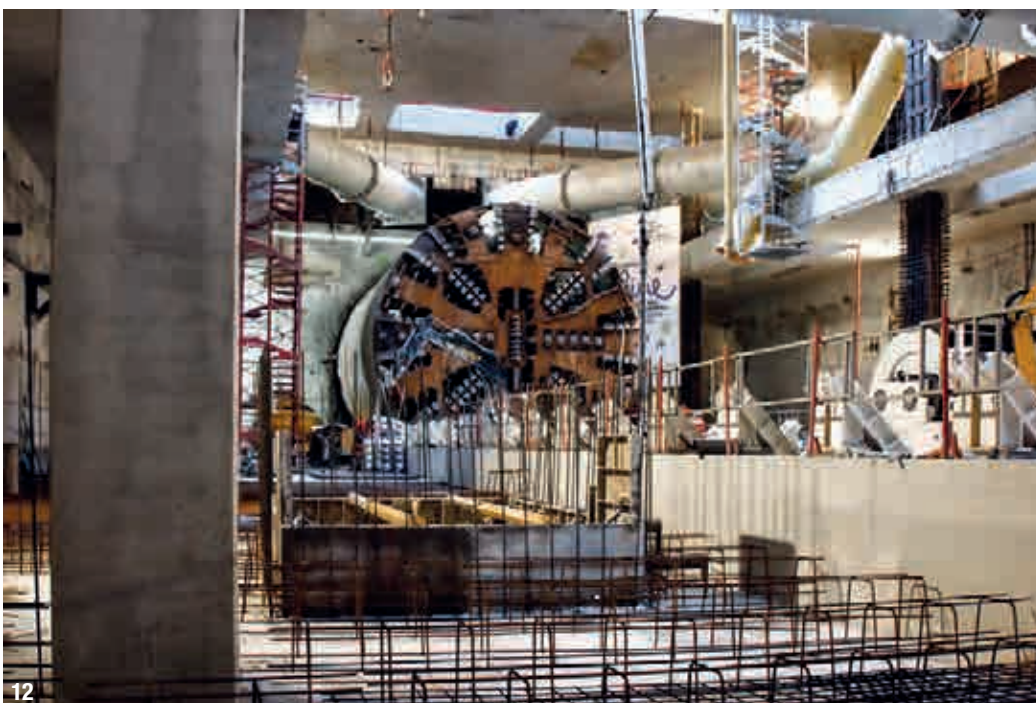
Celui-ci est composé de 2 barrettes de fondation de part et d'autre de la pile existante (figure 6), et d'une structure semelles-poteaux-chevêtres-appui venant bréler au niveau du chevêtre existant. Une fois la réalisation de ce nouvel appui terminée, l'appui existant a été scié, afin que la passerelle ne repose plus que sur son nouvel appui (figure 7).

Ce nouvel appui intègre ensuite un dispositif provisoire de compensation des tassements par vérinage. Ces tassements ont été maîtrisés tout au long de la réalisation de la gare et limités à 4 mm à la fin des travaux.

La consolidation finale et le retrait du dispositif de compensation ont eu lieu une fois stabilisés les tassements liés aux creusements de la gare et au passage du tunnelier, en concertation avec les services de la RATP et de la SNCF.

RÉALISATION DE L'OUVRAGE ENTERRÉ

La gare de Massy-Palaiseau est construite selon la méthode top-down qui consiste à réaliser d'abord la dalle de couverture au niveau du terrain naturel, et ensuite l'ensemble du génie civil intérieur en sous-cœvre grâce à la trémie principale des accès par escaliers permettant de rejoindre les niveaux de sous-sol. Cette méthode permet de limiter les contraintes sur les avoisinants et de se servir des dalles intermédiaires comme butée aux parois moulées afin de limiter leur déformation (figure 8). La construction de cette gare a débuté en janvier 2021 avec les premiers panneaux de parois moulées de la gare, de 1,54 m d'épaisseur et de 43 m de profondeur, puis du bassin de rétention attenant. Ces panneaux, pour respecter les référentiels SNCF et RATP, ont été tous ouverts et coulés la même semaine. En effet aucun forage ouvert n'était toléré le week-end. Dans le respect des référentiels, le pan de paroi moulée situé à proximité et parallèlement aux voies ferrées a été découpé en panneaux dits monopasse, avec une largeur de 3,07 m au lieu d'une largeur de 7 m dans le cas courant (figure 1). Cela a contraint le phasage des panneaux de paroi moulée de l'ensemble de la gare dès la phase de dimensionnement.



12
© GROUPEMENT VINCI



13

© SPIE FONDATIONS

Ce panneautage particulier, combiné aux contraintes liées à la présence des poteaux profondés (support des dalles de l'infrastructure) et des zones à dégager pour les trémies d'accès, a conduit à la mise en œuvre de liernes périmétriques de forte section permettant une modularité de la position des butons en plan. Par ailleurs, l'alternance des horizons géologiques, typique du bassin sud-parisien, et l'impossibilité d'utiliser le trépan à proximité du faisceau ferroviaire, ont conduit à forer les parois moulées à l'aide d'un atelier Rotoforeuse et deux ateliers de bennes à câbles. Compte tenu de la dimension des engins utilisés et dans le respect des référentiels, au vu des caractéristiques géotechniques faibles des limons des plateaux, une dalle provisoire en béton armé de 35 cm d'épaisseur a été nécessaire pour permettre l'évolution de ces engins.

Le génie civil a ensuite pris le relais en juillet 2021 pour la construction de la dalle de couverture composée d'un système poutre dalle très ferrailé du fait de son rôle de buton en tête des parois (figure 9).

Puis ont été réalisés la dalle S01 en janvier 2022 et, à la suite, les butons et liernes provisoires dans le gabarit nécessaire au passage du tunnelier (figure 10).

Enfin, on a terminé par le radier, 25 m sous le terrain naturel, au mois d'août 2022 (figure 11). Ce radier a été réalisé sur vide sanitaire d'une hauteur de 50 cm pour tenir compte des gonflements d'argile en fond de fouille.

Le tunnelier Céline est apparu sur le tympan de la gare le 14 novembre 2022, pour un redémarrage à la fin de la même année en direction d'Orly (figure 12). À compter du redémarrage du tunnelier, les 3/4 de la surface ont été libérés pour permettre les travaux en superstructure du bâtiment émergent qui fera la connexion avec les

deux passerelles piétonnes. Cette libération a notamment impliqué le démontage de la grue à tour et le passage en grue mobile dans une emprise réduite. Le génie civil s'est poursuivi avec une contrainte forte : réaliser l'intérieur de la gare en sous-œuvre et avec une seule trémie d'approvisionnement. L'ensemble des structures intérieures de la gare, qui étaient jusqu'alors en conflit avec le gabarit du tunnelier, a été réalisé dans ces conditions d'exécution contraintes et en coactivité avec la superstructure. C'est ainsi qu'au premier trimestre 2023 ont été réalisés la dalle S02, l'ensemble des escaliers publics et de secours, ainsi que le génie civil des poteaux profondés (figure 13), pour ensuite laisser place aux aménagements de la gare dès le 7 août 2023, après 24 mois de travaux de génie civil. Les escaliers monumentaux ont été l'un

13- Poteaux profondés en profilés métalliques.

14- Butons précontraints.

13- Plunge columns formed of steel sections.

14- Prestressed stays.

des défis de la gare, avec notamment une structure mixte mise en place pour répondre aux exigences de l'architecte en termes d'élançement des pièces. La qualité de parement de la préfabrication a ainsi été associée aux soudures in-situ de la structure métallique noyée. Le levage de la pièce de 43 t

s'est fait à l'aide d'une grue mobile de 350 t, le tout dans une emprise réduite, bornée par le bâtiment émergent et la passerelle historique.

Le génie civil des poteaux profondés a également été un enjeu pour la gare, puisque celui-ci s'est déroulé en sous-œuvre et sans moyens de levage. Un outil roulant permettant de coffrer ces poteaux et pouvant se déplacer à la main a été fabriqué sur mesure afin d'atteindre une cadence de 2 poteaux par jour au plus fort de l'activité.

Les contraintes du site et la maîtrise des tassements des avoisinants ont été un véritable enjeu tout au long des travaux de gros œuvre. C'est ainsi que plusieurs milliers de prismes sont venus équiper les voies SNCF et RATP ainsi que les passerelles piétonnes de part et d'autre de la gare. Ces mêmes contraintes ont également conduit à



14

© GÉRARD ROLLANDO - SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS



15

© SPIE FONDATIONS



16

© GROUPEMENT VINCI

15- Sabot métallique.

16- Poutres en T préfabriquées.

15- Steel shoe.

16- Precast T-beams.

mettre en place près de 2000 t de butons, lesquels ont été préchargés à l'aide de vérins chargés à 2500 t pour les plus contraints (figure 14). La mise en œuvre de cette précharge sur des butons d'angle, dont le diamètre de certains tubes avoisinait 1,80 m, a conduit à la réalisation de sabots métalliques de dimension plurimétrique (figure 15).

La mise en place de ces butons en sous-cœvre, dont chaque élément

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROI MOULÉE : 56 panneaux, 12 barrettes avec profondés, 15 500 m³, 1 350 t d'armatures

BÉTON GARE : 10 000 m³, 2 350 t d'armatures

ACIER POUR BUTONS : 1 950 t

BUTONS PRÉCONTRAIN : 43 u

DÉBLAI : 50 000 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris

ARCHITECTE : Cabinet Richez Associés

GROUPEMENT DE MAÎTRISE D'ŒUVRE COMPOSÉ DE : Ingérop / Artelia / Arcadis

GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Vinci Construction Grands Projets, Dodin Campenon Bernard, Vinci Construction France, Botte Fondations, Spie Batignolles Génie Civil, Spie Batignolles Fondations

PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS :

Sendin (armatures), Vinci Isc (études d'exécution)

pèse un peu plus de 10 t, a nécessité une anticipation méthodologique, avec l'intégration de centaines d'inserts dans les dalles réalisées à la descente, un an avant leur pose. Ces mêmes inserts ont eu un double emploi tout au long des travaux, d'abord la pose, ensuite la dépose de ces butons.

Enfin, la maîtrise de la prévention lors des travaux de réalisation de la dalle S02 en sous-cœvre et au-dessus des servitudes du tunnelier a conduit le groupement d'entreprises à innover en termes de méthode. Dans les faits, cette dalle a donc été assemblée à l'aide de 38 poutres en Té préfabriquées, de 14 t chacune, et posées à l'aide d'un pont roulant (figure 16).

Ces opérations ont permis de tenir le planning et de supprimer les risques liés à la manipulation d'étais lourds en passe charretière dans des milieux confinés et exigus. □

ABSTRACT

LINE 18 OF THE 'GRAND PARIS EXPRESS' PROJECT - MASSY-PALaiseau STATION - CONSTRUCTION SITE IN THE MIDST OF THE RAILWAY TRACKS

CÉLINE CADET, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - THOMAS RICHEZ, CABINET RICHEZ ASSOCIÉS - JULIEN GAUTHERIE, ARTELIA - YVAN GRAVÉ, VINCI CONSTRUCTION (DODIN CAMPENON BERNARD) - PASCALE LOUVEL, SPIE FONDATIONS

Massy-Palaiseau station forms part of a multimodal hub, and is located in the centre of the railway tracks. Its position will enable it to achieve efficient connections with all the transport systems involved. The flipside of this optimal location for intermodal transport is that major works have to be carried out very close to the railway tracks in service and to existing bridge structures crossing these same tracks. This is a real technical challenge for the project management teams and contractors which had to come to terms with these sensitive structures and with the relevant recommendations, in particular by complying with the various engineering (IG) guidelines of SNCF (French Rail) and their equivalents at Paris public transport operator RATP. □

LÍNEA 18 DEL GRAND PARIS EXPRESS - ESTACIÓN DE MASSY-PALaiseau - LA OBRA EN MEDIO DE HAZ FERROVIARIO

CÉLINE CADET, SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS - THOMAS RICHEZ, CABINET RICHEZ ASSOCIÉS - JULIEN GAUTHERIE, ARTELIA - YVAN GRAVÉ, VINCI CONSTRUCTION (DODIN CAMPENON BERNARD) - PASCALE LOUVEL, SPIE FONDATIONS

La estación de Massy-Palaiseau se inscribe en un eje multimodal. Está situada en el centro del haz ferroviario, una ubicación óptima en términos de conexión con el conjunto de transportes presentes, pero que exige realizar obras importantes en proximidad directa de las vías operativas y de estructuras existentes que franquean dichas vías. Ello supone un importante desafío técnico para los equipos de dirección de obra y las empresas, que han tenido que amoldarse a esas construcciones sensibles y a las recomendaciones conexas, en particular el respeto de las distintas normas de ingeniería (IG) de SNCF y sus equivalentes de la autoridad de transportes de París (RATP). □



PERTES DE TENSION DANS LES TIRANTS - SUD EST DU BRÉSIL

AUTEURS : PHILIPPE BENO, DIRECTEUR GÉRANT, AGENCE RINCENT BTP BRASIL SERVIÇOS DE ENGENHEIRA - JEAN-JACQUES RINCENT, PRÉSIDENT DIRECTEUR GÉNÉRAL, RINCENT BTP SERVICES

DE 2019 À 2021 LES AGENCES RINCENT BTP SERVICES DE RECIFE ET DE SÃO PAULO AU BRÉSIL ONT EFFECTUÉ 2 000 ESSAIS SUR DES TIRANTS, ESSAIS STATIQUES ET ESSAIS DYNAMIQUES POUR DÉTERMINER LA TENSION EXISTANTE DANS DES TIRANTS DE 30 ET 40 ANS D'ÂGE. CE RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR L'ÉVOLUTION DE LA TENSION DANS LES TIRANTS PERMET DE QUANTIFIER LE PHÉNOMÈNE ET DE L'ANALYSER DANS LE DÉTAIL.

- 1- Destruction des protections en béton.
- 2- Essai non destructif.
- 3- Admittance en fonction de la fréquence.

- 1- Destruction of concrete protective devices.
- 2- Non-destructive testing.
- 3- Admittance as a function of frequency.



© RINCENT BTP - RECIFE
2

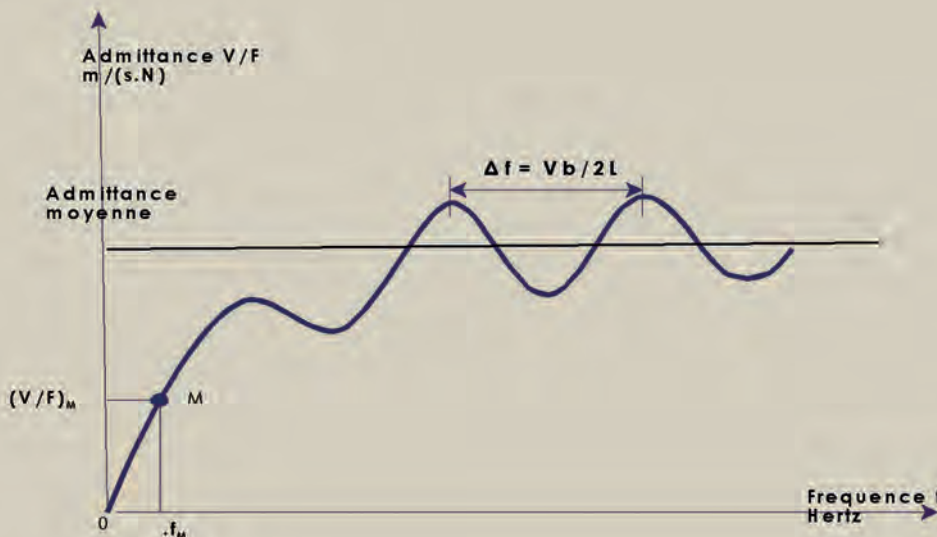
Au Brésil, la protection de la tête des tirants est faite en béton (figure 1). Les essais statiques et dynamiques à réaliser nécessitent d'accéder à la tête du tirant. La première phase des prestations commence donc par la destruction de cette protection en béton.

Dans les opérations préalables à réaliser, l'accès au pied du mur est une opération indispensable et non négligeable en temps passé. C'est le moyen d'accès des personnels et des équipements pour réaliser les essais. La partie supérieure du mur est, dans notre cas, une voie de circulation soit des véhicules, soit des convois ferroviaires. Outre le nettoyage des têtes de tirant, l'opération nécessaire est leur numérotation et la réalisation d'un document de travail qui existe rarement pour des ouvrages datant de plusieurs décennies.

La première caractéristique mesurée sur les tirants est le diamètre des torons, des barres et les dimensions de la plaque de répartition des efforts. Il convient de noter l'inclinaison de la plaque d'appui puis d'ajouter des descriptions, par exemple venues d'eau et corrosion. Les photographies sont indispensables.

La première investigation concerne 7 talus routiers comportant au total 759 tirants dont les armatures sont du type barres. Le nombre d'essais statiques d'étalonnage des essais dynamiques a été de 20. Les essais dynamiques ont été effectués sur la totalité des tirants. La méthode d'essai non destructive a été exposée dans les documents techniques du brevet EP 1 761 750 B1.

ADMITTANCE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE



© DR
3

Les essais non destructifs d'analyse vibratoire des tirants existent depuis l'année 2000 et la méthode a été brevetée en 2005. La méthode consiste à créer un impact mécanique appliqué dans l'axe de l'élément testé au moyen d'un marteau équipé d'un capteur piézoélectrique pour mesurer la force de l'impact (figure 2). À cette mesure de la force est associée la mesure de la vitesse de déplacement de la tête du tirant. Les acquisitions sont faites en mode temporel et sont analysées en mode fréquentiel.

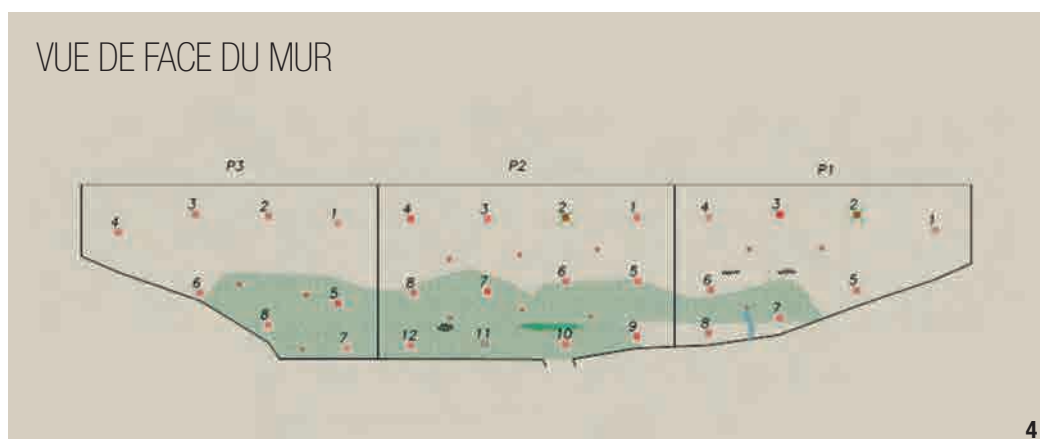
La courbe résultante est du type Vitesse/Force en fonction de la fréquence (figure 3).

Le premier paramètre calculé est la longueur L du tirant, le calcul est effectué à partir de la valeur Δf qui correspond à la distance entre deux pics :

$$L = V_b / 2\Delta f$$

L : longueur en mètre, V_b : Vitesse des ondes dans le tirant en m/s.

L'exemple choisi concerne un des murs de soutènement constitué de 3 panneaux avec 28 tirants répertoriés (figure 4) mais où certains n'ont pu être testés car détériorés.



4

© RINCENT BTP - RECIFE

Sur chaque tirant 8 essais non destructifs sont réalisés. L'exemple des figures 5 et 6 concerne le tirant 2 du panneau 1, test C.

Ces deux courbes identiques comportent deux réponses vibratoires, l'une permettant de calculer la longueur totale du tirant 18,1 m et l'autre la longueur du tirant traversant les premiers mètres de sols de qualité médiocre, qu'il est possible d'assimiler à la longueur libre.

4- Vue de face du mur.

5- Longueur totale 18,1 m.

6- Longueur libre 10 m.

4- Front view of the wall.

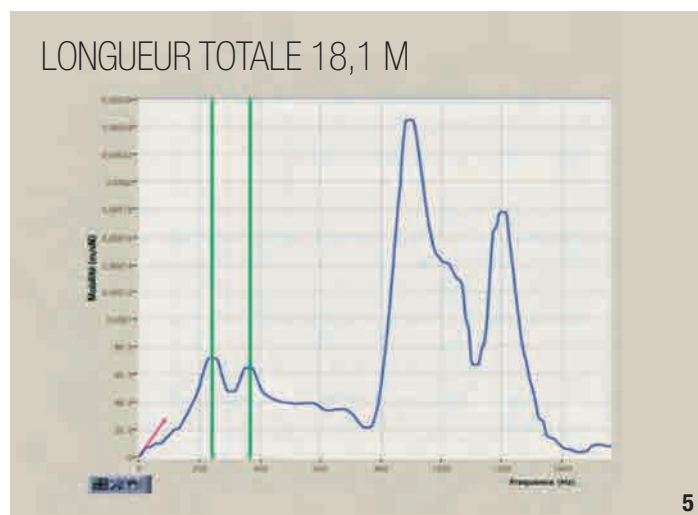
5- Total length 18.1 m.

6- Free length 10 m.

L'analyse des courbes réponses permet d'établir le tableau A de résultats où sont reportées les longueurs libres des tirants et les longueurs scellées (figure 7).

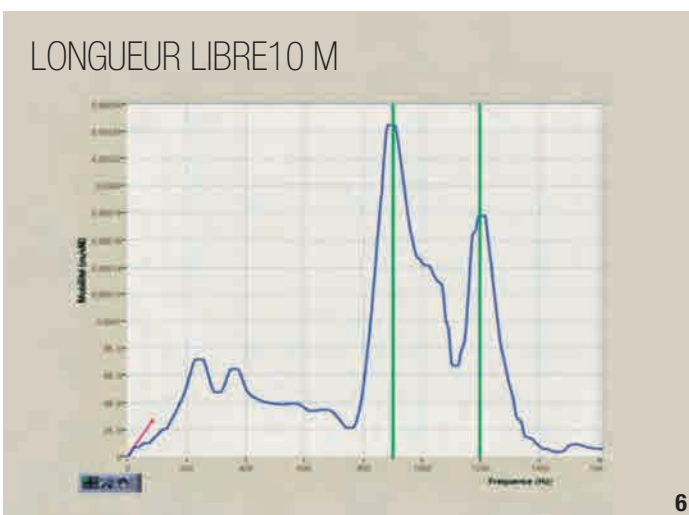
Ces résultats correspondent aux dimensions reportées sur le plan d'exécution du tableau A.

Il est nécessaire d'attirer l'attention sur le fait que la vitesse de propagation des ondes dans le tirant est souvent supérieure à 4000 m/s et que ces



5

© DR



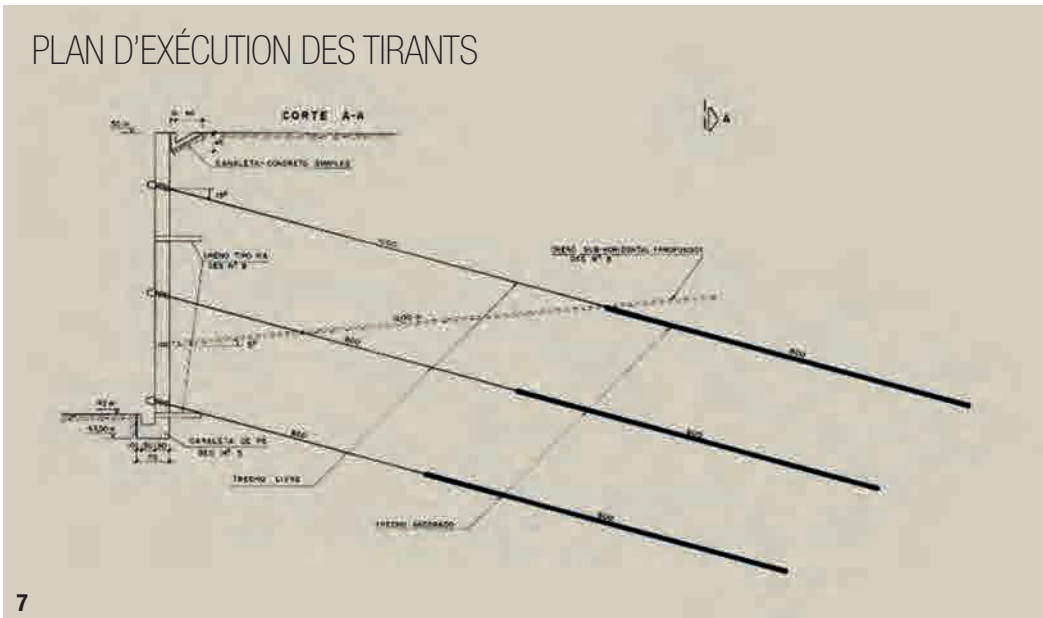
6

© DR

TABLEAU A : LONGUEUR LIBRE - LONGUEUR SCÉLÉE

											Valeur moyenne	Projet valeur	
Ligne 1	Longueur totale	18,2	18,2	17,9		19		20,1	19,4	19,1	18,1		
	Longueur libre	11,3	10,6	11,5		10,4		10,2	10,6	10,6	10	10,7 m	10 m
	Longueur scellée	6,9	7,6	6,4		8,6		9,9	8,8	8,5	8,1	8,1 m	8 m
Ligne 2	Longueur totale	18,6	14,7	15,6	16,1	17	16,7	16,8	16,3	14,7	19,3		
	Longueur libre	10,8	5,6	8,8	8,5	8,8	8,5	9,6	8,9	6,3	10,8	8,66 m	8 m
	Longueur scellée	7,8	9,1	6,8	7,6	8,2	8,2	7,2	7,4	8,4	8,5	7,92 m	8 m
Ligne 3	Longueur totale		15,6	15,1	15,6	14,6	15,3	15,4	14,2				
	Longueur libre		6,4	6,2	6	5,9	6,7	6,5	6,7			6,34 m	6 m
	Longueur scellée		9,2	8,9	9,6	8,7	8,6	8,9	7,5			8,77 m	8 m

PLAN D'EXÉCUTION DES TIRANTS

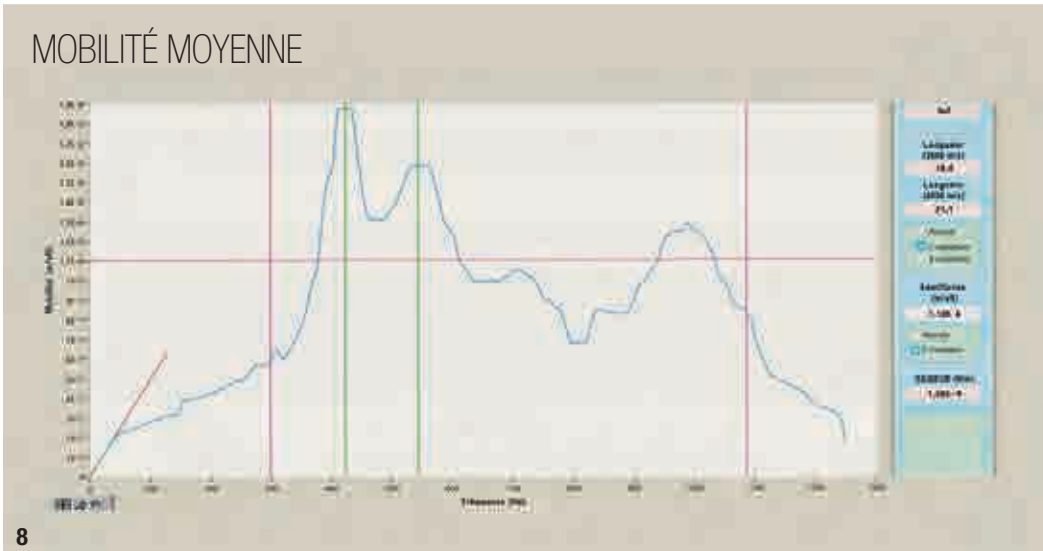


© DR 7

- 7- Plan d'exécution des tirants.
- 8- Mobilité moyenne.
- 9- Calcul de la section droite du tirant.
- 10- Essais statiques et dynamiques simultanés.

- 7- Tie-anchor working drawing.
- 8- Average mobility.
- 9- Calculation of the straight section of the tie anchor.
- 10- Simultaneous static and dynamic tests.

MOBILITÉ MOYENNE



© DR 8

vitesses peuvent atteindre des valeurs supérieures à 5 000 m/s. Pour redimensionner un tirant existant, la connaissance de la longueur totale et de la longueur scellée sont des informations auxquelles il faut adjoindre le calcul du diamètre du tirant avec son coulis.

Le calcul se fait à partir de la valeur de la mobilité moyenne (figure 8) avec la formule suivante :

$$V/F = 1/\rho_b V_b A$$

Masse volumique du béton ρ_b en kg/m^3 , V_b : Vitesse des ondes dans le tirant, A : Section transversale du tirant en m^2 (figure 9).



© DR 9



© DR 10

Ici la mobilité est de $1,5 \cdot 10^{-6}$ m/sN, avec une masse volumique moyenne du tirant de 2500 kg/m^3 , le diamètre calculé est de $0,27 \text{ m}$ qui correspond au tirant de la figure 9.

Ces mêmes types de calculs peuvent être fait pour des clous ou des renforcements de falaise.

Vient ensuite le calcul de la raideur dynamique liée à la force de tension interne du tirant.

La raideur dynamique est calculée à partir de la pente à l'origine de la courbe réponse en fréquence (figure 3) et est égale à :

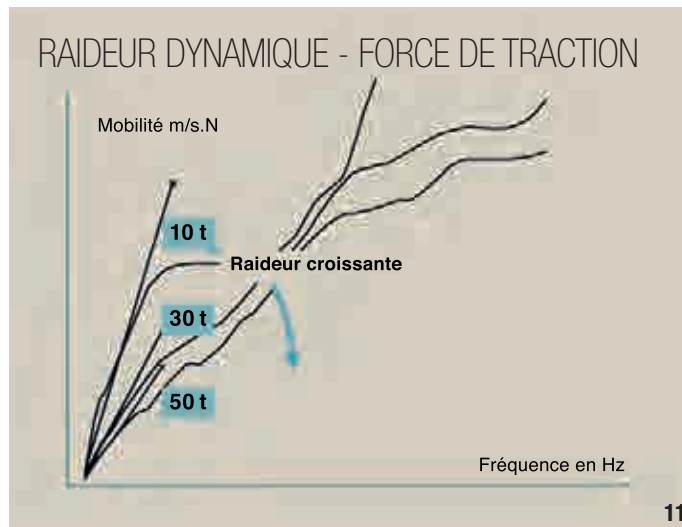
$$R_d = 2 \pi f_M / (V/F)_M$$

Le dispositif présenté à la figure 10 permet de réaliser des essais dynamiques et statiques simultanément sur le même élément.

Par exemple les raideurs dynamiques (figure 11) mesurées pour des efforts de traction de 10, 30 et 50 t sont :

- $1,47^E+08 \text{ N/m}$;
- $2,62^E+08 \text{ N/m}$;
- $3,43^E+08 \text{ N/m}$ (figure 11).

La raideur dynamique est un nombre complexe, des travaux de recherches



11

© RINCENT BTP SERVICES

en particulier sur des chevilles pré-contraîntes ont montré que les parties réelles et imaginaires sont constantes pour des valeurs inférieures à 80 Hz. Généralement le calcul de la raideur des tirants est effectué pour des valeurs de fréquence inférieures à 40 Hz.

Il existe une relation entre la raideur dynamique R_d et la force F pour les tirants qui est de la forme suivante :

$$(R_d)^{1/2} = aF + b$$

En reprenant l'exemple de l'essai précédent nous obtenons la courbe de la figure 12, la raideur dynamique est en N/m et la force en t.

11- Raideur dynamique - Force de traction.

12- Racine carrée de la raideur dynamique en fonction de la force.

13- Essai statique.

14- Raideur dynamique sous des charges croissantes.

15- R_d/R_s pour différents efforts de traction.

11- Dynamic stiffness - Tensile force.

12- Square root of dynamic stiffness as a function of the force.

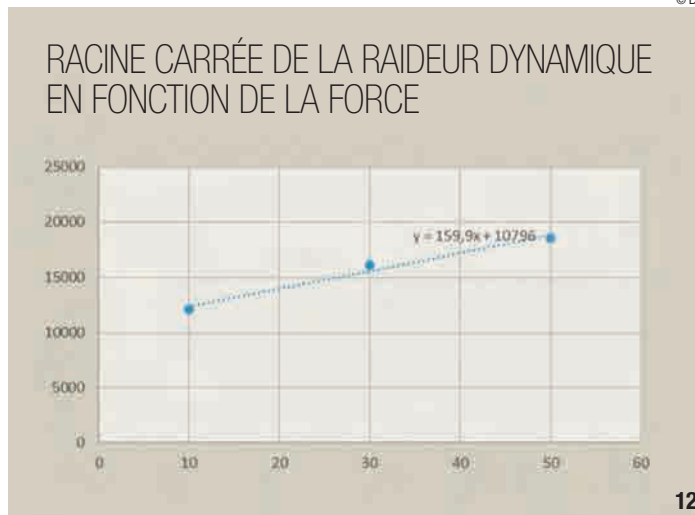
13- Static test.

14- Dynamic stiffness under increasing loads.

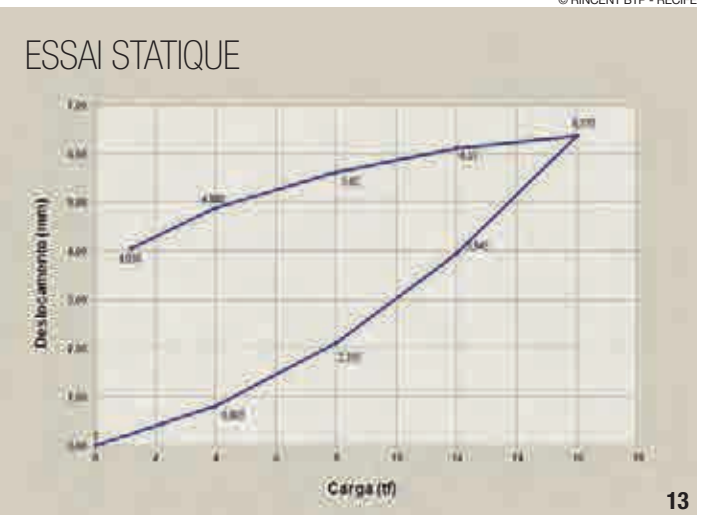
15- Dynamic/static stiffness (R_d/R_s) for various tensile forces.

© DR

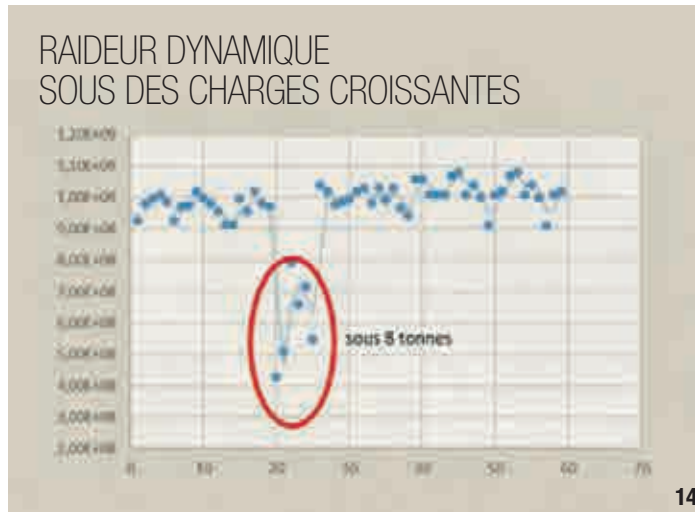
© RINCENT BTP - RECIFE



12

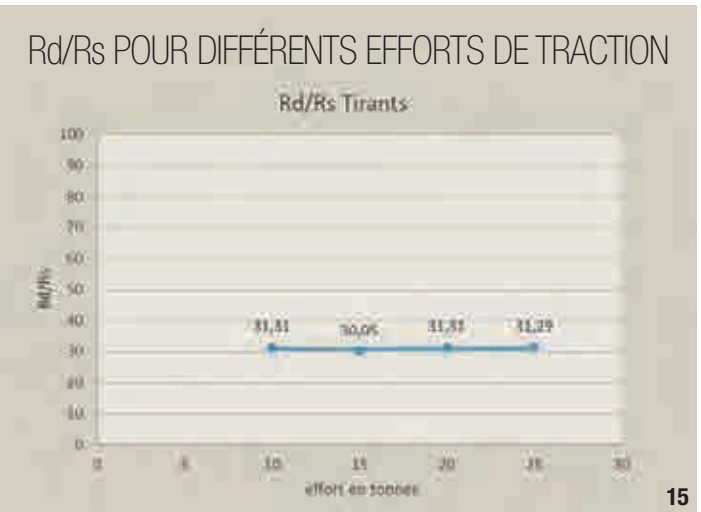


13



14

© DR



15

© DR

TABLEAU B : VALEURS DES EFFORTS DE TRACTION EN T

P12				P13				P14				
5,20	6,90	6,00	6,10	8,00	8,80	7,50	6,90	5,90	5,90	6,80	6,20	7,00
1,50	2,70	2,10	1,40	3,80	4,00	3,60	3,60	2,30	1,50	2,30	1,90	1,80
x	5,00	5,00	6,50	4,60	4,60	3,40	3,30	2,90	4,30	3,70	3,40	2,70
7,20	1,10	7,60	1,10	2,70	6,20	5,90	0,50	0,50	8,30	9,40	7,70	7,50
				5,80	12,00	8,00	12,00	12,30	14,70	12,50	14,10	14,70

16- Essais non destructifs conditions d'essai.

16- Non-destructive testing: test conditions.

Il s'agit donc de déterminer a et b pour établir la formule liant les raideurs dynamiques et les forces de tension. Les essais statiques participent à l'exploitation des essais dynamiques et apportent des informations sur le comportement des tirants dans la perspective d'une remise en tension.

Les paliers de chargement dans l'exemple de la figure 13 sont pour le chargement et le déchargement :

- 1,2 t - 4 t - 8 t - 12 t et 16 t ;
- 12 t - 8 t - 4 t et 1,2 t.

La valeur de la force interne au tirant est notée quand la tête du tirant se décolle de la structure métallique d'appui sur le mur de soutènement, ici la valeur donnée par l'opérateur est de 7 t.

Le détail des calculs des raideurs dynamiques pour chaque palier de traction (figure 14) permet d'identifier trois phases :

- Avant 7 t de traction, les raideurs dynamiques sont constantes en moyenne ;
- À 8 t de traction, l'équilibre est rompu, le mode de sollicitation du tirant est modifié ;
- Au-dessus de cette valeur la raideur croît.

Le rapport entre la raideur dynamique et la raideur statique est constant pour un même élément dans une situation identique de sollicitation. La figure 15 est le résultat du calcul de ce rapport pour un tirant et sous des valeurs de traction inférieures à la tension interne au tirant.

La présentation des efforts en t dans les tirants se fait sous la forme du tableau B qui correspond à trois panneaux d'un des murs étudiés.



16 © RINCENT BTP - RECIFE

TABLEAU C : LES EFFORTS MOYENS PAR LIGNE DE TIRANTS

Effort moyen par ligne de tirants	Valeur résiduelle
6,1 t	17,40%
7,7 t	22,00%
7,25 t	20,70%
9,6 t	27,40%
13,2 t	38,70%

TABLEAU D : ESSAIS EFFECTUÉS SUR 725 TIRANTS DE 7 MURS DE SOUTÈNEMENTS

N° talus	Nombre de tirants testés	F moyen en tonnes
1	27	6,76
2	109	6,6
3	30	6,3
4	25	8,1
5	104	7,4
6	160	7,7
7	270	6,6
	725	7,05 t

La valeur de la tension initiale était de 35 t. Les efforts moyens par ligne de tirants sont rassemblés dans le tableau C.

Les essais effectués sur 725 tirants de 7 murs de soutènements donnent une valeur résiduelle en moyenne de 7 t. Après 30 ans, la force de tension moyenne a diminué d'environ 5,5 % par an (tableau D).

Le second exemple concerne une investigation sur 19 talus où 1 077 tirants à câbles ont été testés au moyen d'essais non destructifs et plus de 20 essais statiques ont été effectués. La quantité de tirants ayant fait l'objet d'essais non destructifs est de 69 % de la totalité des tirants.

Il convient de noter que ces murs tirants assurent la stabilité d'un chemin de fer minéralier supportant des convois importants en longueur et en charge. La figure 16 est caractéristique des conditions de réalisation des essais dynamiques. La tête du tirant a été nettoyée de sa protection et le capteur de vitesse est fixé sur la plaque de répartition de l'effort. La préparation de la tête du tirant et la qualité de la fixation du géophone multidirectionnel sont des opérations essentielles pour obtenir des résultats interprétables. Souvent, la réalisation des essais non destructifs ou statiques nécessite le recours à des personnes habilitées pour effectuer des travaux en hauteur.

Sur un mur de soutènement unique (figures 17 à 19), 590 tirants sur 741 ont été testés, réalisés il y a 40 ans, les analyses de pertes de tension ont été effectuées pour chacune des 12 lignes de tirants rassemblées dans le tableau E.

Le mur de soutènement est haut d'environ 20 m, il est possible de distinguer quatre familles de tirants :

- En pied sur les deux dernières lignes de tirants la perte de charge est d'environ 30 % en 40 ans ;
- Sur les lignes 7 à 10, 50 à 55 % de la charge a été perdue ;
- Sur les lignes 5 et 6, 60 % à 70 % ont été perdus ;



17



18

17, 18 & 19- Mur de 741 tirants.

17, 18 & 19- Wall with 741 tie anchors.

→ Et sur les 4 premières lignes les pertes de charges sont au moins de 75%.

Sur ce même talus un calcul d'incertitude relative a été effectué sur les résultats des raideurs dynamiques de deux colonnes de 12 tirants. L'écart type é été calculé sur 6 des 8 valeurs acquises. L'incertitude relative a été calculée à partir de l'écart type et de la valeur moyenne sur 6 valeurs.

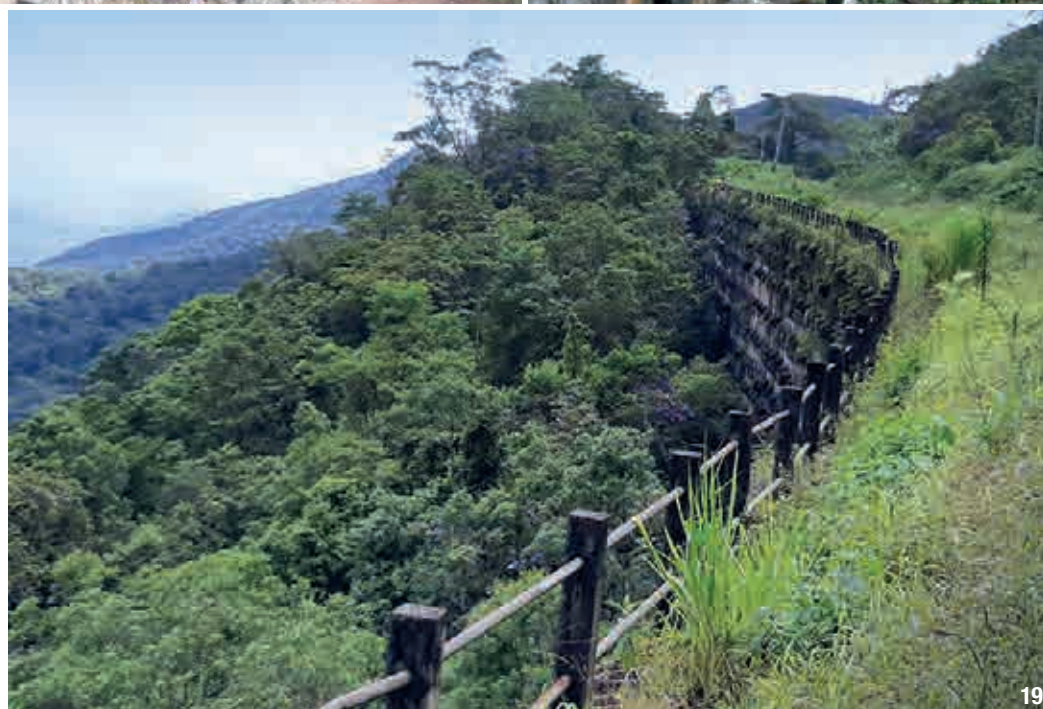
Les valeurs des incertitudes relatives sont indiquées dans le tableau F.

L'incertitude relative moyenne est de 5,8% avec un écart type de 0,64.

Le tirant sur lequel les essais aboutissent à une incertitude relative de 25% sur la raideur dynamique et qui a une force de tension interne de 3,7 t n'a pas été pris en compte dans ce calcul.

Ce type de tirant sensible à la vibration générée par la frappe du marteau a un comportement de type fragile. D'ailleurs ces résultats caractéristiques peuvent être un moyen d'identification des tirants ne supportant pas une remise en tension. À noter que les 10 tirants ayant une force résiduelle de tension interne supérieure à 15 t ont une incertitude relative sur les valeurs de raideurs dynamiques de 5,1%. Ces tirants situés dans la partie basse du

mur pourront être remis en tension sous réserve de vérifier leur état de corrosion. Le diagnostic, au final, permet d'optimiser la maintenance et la remise en état du mur avec ses tirants. Un des points importants concernant les essais réalisés sur ces murs, qu'ils soient dynamiques ou statiques, est la représentativité de ceux-ci. Sur un des murs testés de 100 tirants :



19

→ 11% des tirants sont situés à proximité de joints de construction ;

→ 37% sont situés dans les zones limites du mur où les sols en place côtoient les remblais ;

→ 52% sont situés dans des localisations de fonctionnement "normal".

Il est plus aisé de réaliser des essais statiques en pied du mur de soutènement mais bien souvent le pied du mur est en butée sur le sol ou sur un ouvrage d'évacuation des eaux pluviales ce qui influe notablement sur les résultats des essais qui ne peuvent être extrapolés à des cas courants. La représentativité d'un échantillon n'est toujours que partiellement vérifiable. C'est une notion relative.

Un échantillon peut être représentatif d'une, deux, trois ou plusieurs variables,

mais n'est jamais totalement identique à la population totale.

Enfin il y a la stratégie d'échantillonnage qui est essentielle dans la définition de l'erreur attendue. La stratégie d'échantillonnage est une étape essentielle dans la conception d'expériences scientifiques.

En utilisant la formule de Cochran :

$$n = t^2 \cdot p(1-p) / m^2$$

n : le minimum d'échantillon pour obtenir un résultats significatif, t : le niveau de confiance (la valeur standard est 95%), p : la proportion estimée de la population avec ces caractéristiques,

m : marge d'erreur habituellement de 5%.

Pour les tirants dans des situations "normales", pour une marge d'erreur de 10%, le nombre de tirants à tester pour atteindre ces objectifs est 43, avec un niveau de confiance de 95%.

Pour la même population avec des hypothèses inférieures, par exemple un niveau de confiance de 90% et une marge d'erreur de 15% le nombre de tests minimum est de 16.

Il existe d'autres méthodes de calcul plus sophistiquées, mais cet exemple montre la difficulté de choisir les éléments à tester et le lien entre le nombre et sa représentativité pour un groupe. Dans une opération de maintenance, la stratégie d'optimisation des coûts consistant à effectuer des remises en tension, il est préconisé d'effectuer des tests non destructifs sur l'ensemble des tirants. C'est ce qui a été fait dans le premier exemple présenté.

CONCLUSIONS

Le calcul des efforts de traction dans les tirants à partir d'essais non destructifs est un apport d'information important dans les opérations de maintenance. Réaliser des essais statiques en hauteur sur des murs de soutènement est beaucoup plus contraignant que pour les essais dynamiques. D'autant qu'il existe un risque de rupture liée aux essais statiques, en particulier pour des tirants anciens, alors que ce risque est pratiquement inexistant avec les essais dynamiques.

Le nombre d'essais statiques peut être limité et les résultats obtenus sont utilisés pour la calibration des essais non destructifs. Le comportement des tirants pendant l'essai statique apporte aussi des informations pour appréhender les remises en tension. Les essais non destructifs permettent l'analyse d'une situation à un moment donné sur un nombre représentatif de tirants.

Ces essais sont un outil de maintenance et de suivi à la disposition des gestionnaires d'ouvrages de soutènement.

D'ores et déjà des concessionnaires demandent des essais de contrôles avec une périodicité de plusieurs années

pour planifier des remises en tensions. Les pertes de tension mesurées sur les tirants doivent faire prendre conscience qu'un suivi est nécessaire dans la durée. Ces diagnostics permettent de statuer sur la stabilité de l'ouvrage et de définir les travaux à réaliser. □

TABLEAU E : ANALYSES DE PERTES DE TENSION EFFECTUÉES, IL Y A 40 ANS, POUR CHACUNE DES 12 LIGNES DE TIRANTS

N° ligne	Nb tirants	F de traction résiduelle
1	75	23%
2	72	24%
3	71	25%
4	68	25%
5	65	31%
6	57	39%
7	50	44%
8	45	49%
9	42	48%
10	20	47%
11	14	67%
12	11	67%
	590	

TABLEAU F : TABLEAU D'INCERTITUDES RELATIVES DES RAIDEURS

F en tonnes	Incertitude relative en %	F en tonnes	Incertitude relative en %
11,6		7	
	9,8		2,6
3,9		9,3	
	3,3		4,6
13,4		6,8	
	7,6		1,88
5,9		0,3	
	3,04		6,6
11,4		6,9	
	12,8		11,2
19,2		9,8	
	1,76		10,4
24,2		12,4	
	4,9		11,3
20,7		3,7	
	5,7		25,7
18,7		17,3	
	1,36		7,7
25,4		20,3	
	1,24		8
20,3		22,8	
	8,9		7,1
16,1		19,4	
	2,6		4,8

ABSTRACT

TENSION LOSSES IN TIE ANCHORS - SOUTHEASTERN BRAZIL

PHILIPPE BENO, AGENCE RINCENT BTP BRASIL SERVIÇOS DE ENGENHEIRA - JEAN-JACQUES RINCENT, RINCENT BTP SERVICES

Between 2019 and 2021, the Rincent BTP Services branch in Brazil carried out around 2,000 tests on tie anchors. Static tests are used to calibrate non-destructive vibration analysis tests. The dynamic stiffnesses measured by these tests are used to calculate the tensile forces in the tie anchors. The sampling quality enables us to assess the condition of the existing structure and perform maintenance diagnosis. □

PÉRDIDAS DE TENSIÓN EN LOS TIRANTES - SURESTE DE BRASIL

PHILIPPE BENO, AGENCE RINCENT BTP BRASIL SERVIÇOS DE ENGENHEIRA - JEAN-JACQUES RINCENT, RINCENT BTP SERVICES

Entre 2019 y 2021, las sucursales de Rincent BTP Services en Brasil realizaron alrededor de 2000 pruebas en tirantes. Los ensayos estáticos se utilizan para calibrar los ensayos no destructivos de análisis de vibraciones. Las rigideces dinámicas medidas a partir de esas pruebas permiten calcular las fuerzas de tensión en los tirantes. La calidad del muestreo permite evaluar el estado de la estructura existente y realizar diagnósticos de mantenimiento. □



1

© SETEC

AUTOROUTE A64 : DES MICROPIEUX POUR FRANCHIR UNE ZONE COMPRESSIBLE À URT (64)

AUTEURS : ALEXANDRE BEAUSSIER, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN, SETEC TERRASOL - PAUL VIROLE, INGÉNIEUR STRUCTURE, SETEC DIADES - DAOUA GUEYE, RESPONSABLE DU PÔLE OA, ASF DOIO - THOMAS SERNA, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY

CONSTRUIT EN 1990 SUR LA COMMUNE D'URT (64), LE PI175 - PONT CADRE PERMETTANT LE RÉTABLISSEMENT DE LA RD123 SOUS L'AUTOROUTE A64 - A SUBI, DEPUIS SA MISE EN SERVICE, UN TASSEMENT D'AMPLITUDE QUASIMENT-MÉTRIQUE NON STABILISÉ EN L'ÉTAT. DU FAIT DE SON HOMOGENÉITÉ, CE TASSEMENT NE MET PAS EN PÉRIL LA STRUCTURE DE L'OUVRAGE, MAIS IL CONDUIT À UNE DIMINUTION DE LA HAUTEUR LIBRE MENAÇANT LES CONDITIONS DE LA ROUTE DÉPARTEMENTALE. AINSI, UN CONFORTEMENT DE L'OUVRAGE PAR DES MICROPIEUX PERMETTANT DE BLOQUER LES TASSEMENTS A ÉTÉ RÉALISÉ.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE GÉNÉRAL ET CONCEPTION DE L'OUVRAGE

Édifié dans le cadre des travaux de construction de l'autoroute A64 entre Bayonne et Toulouse, le PI175 est un ouvrage cadre d'ouverture droite de 9,45 m et de hauteur moyenne 7,4 m permettant le rétablissement de la

RD123 au sein d'un remblai de 9 m de hauteur, érigé en bordure de la plaine alluviale de l'Aran (figure 2).

Sous l'emprise de ce remblai, les reconnaissances réalisées entre 1988 et 1990 ont mis en évidence une épaisseur de 15 à 20 m de matériaux alluviaux compressibles surmontant un substratum marneux (figure 3) ; les

1- Foration des micropieux de confortement.

1- Consolida- tion micropile drilling.

épaisseurs de matériaux compressibles étant conditionnées par la distance aux collines armant le flanc Nord de la plaine. Cette configuration a conduit le concepteur à prévoir un préchargement de la zone, associé à un réseau de drains et, pour le rétablissement de la RD, un ouvrage cadre permettant de limiter les contraintes apportées au sol.



D'un point de vue structurel, on a retenu un ouvrage cadre en deux plots qui, en plan, présentent un biais de 52 grades, une ouverture droite de 9,45 m, des longueurs des piédroits d'environ 12 m. Les épaisseurs de piédroits et de la traverse supérieure sont de 45 cm, le radier présente une épaisseur courante de 55 cm portée à 135 cm au niveau des goussets de la jonction radier-piédroit. Enfin, l'ouvrage à proprement parler est associé à quatre murs en retour tandis que la transition remblai/ouvrage est assurée par le biais des dalles de transition.

HISTORIQUE DE CONSTRUCTION

Sur la base des documents d'archive, dans la zone s'étendant sur une distance de 25 m de part et d'autre de l'axe de l'ouvrage, la chronologie sommaire des travaux a été la suivante :

- **Novembre 1988 à mars 1989** : mise en place du réseau des drains ;

2- Implantation de l'ouvrage.

3- Contexte géotechnique du remblai dans lequel s'enclâsse l'ouvrage.

2- Works location.

3- Geotechnical environment of the embankment in which the structure is embedded.

- **Mi-avril à fin octobre 1989** : préchargement de la zone en deux phases ;
- **Décembre 1989 à mai 1990** : génie civil de l'ouvrage et de ses murs en retour ;
- **Août à décembre 1990** : remblaiement des blocs techniques ;
- **Mai à octobre 1991** : mise en œuvre des chaussées.

UN OUVRAGE AFFECTÉ D'IMPORTANTES TASSEMENTS DÈS SA CONSTRUCTION...

En raison du contexte géotechnique d'alluvions fortement compressibles, l'ouvrage et le remblai au sein duquel il s'insère ont fait l'objet d'une instrumentation basée sur des mesures de nivellement et, durant la phase de préchargement, sur un suivi des pressions interstitielles.

En dépit du drainage de la zone - conçu pour assurer une consolidation de 85% des terrains au bout de 3 mois de préchargement - l'instrumentation a mis en évidence une très lente cinétique de la déformation.

En effet, au retrait du préchargement, 6,5 mois après sa mise en œuvre, les tassements mesurés par les tassomètres atteignaient 50 cm (soit environ un tiers des 140 cm de l'amplitude calculée), les vitesses de tassement étaient encore de l'ordre de 1 cm par semaine, sans signe de ralentissement

(figure 4), et les cellules de pression interstitielle n'avaient pas fait montre de franc rééquilibrage des pressions engendrées par la montée du remblai (figure 5).

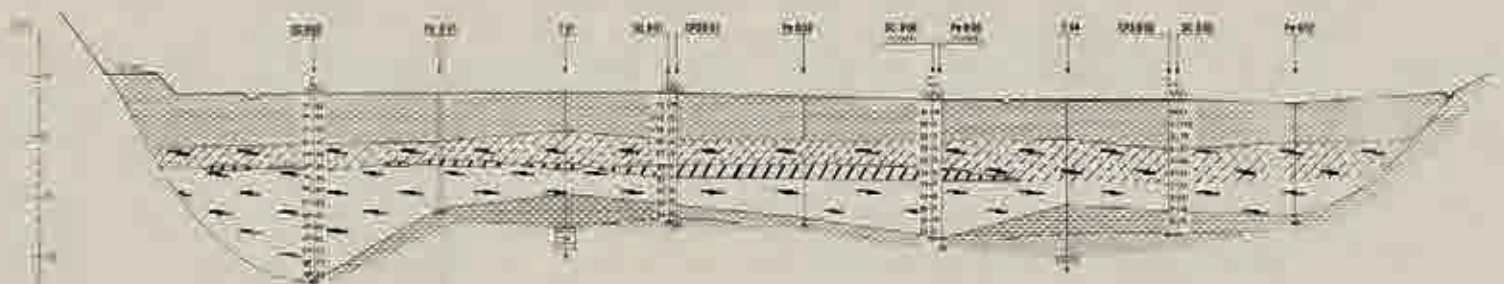
Durant les phases de construction de l'ouvrage puis après ouverture de la section autoroutière au sein de laquelle cet ouvrage s'inscrit, les terrains ont continué à tasser "lentement" au rythme de leur consolidation non anticipée durant le préchargement. Et finalement, depuis la construction de son génie civil, l'ouvrage aura tassé de l'ordre de 65 à 85 cm entre 1991 et 2016 ; dans le même temps, les remblais adjacents auront tassé de plus d'un mètre. Ainsi, en tenant compte des quelques 50 cm de tassement acquis durant le préchargement, entre l'état initial de 1989 et 2016, les terrains formant l'assise des remblais et de l'ouvrage auront tassé d'environ 130 à 160 cm (figure 6).

Classiquement, l'ouvrage formant un vide dans le remblai, les relevés ont montré des tassements plus importants sous les remblais que sous l'ouvrage. En outre, du fait de l'approfondissement de la couche d'alluvions, les tassements sont plus importants à l'est qu'à l'ouest.

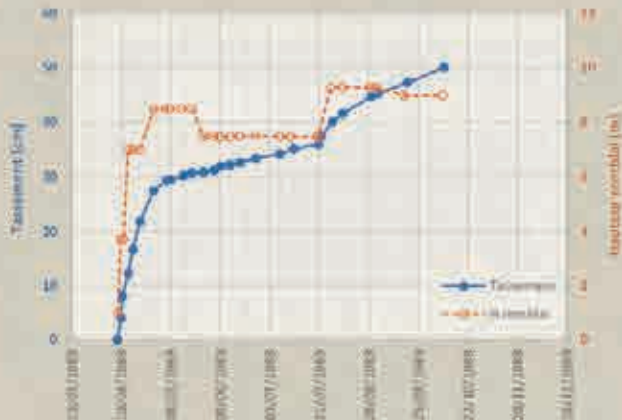
... AYANT CONDUIT L'EXPLOITANT À DES RECHARGEMENTS RÉGULIERS DES VOIES

Même si les inspections détaillées ont mis en évidence un accroissement régulier des désordres visibles : dérasements entre les deux plots de l'ouvrage, fissures en piédroits..., les tassements, relativement homogènes sous l'ouvrage, n'ont pas, en dépit de leur forte amplitude, été à l'origine de pathologies structurelles sérieuses nécessitant des travaux de renforcement. ▶

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE DU REMBLAI DANS LEQUEL S'ENCHÂSSE L'OUVRAGE

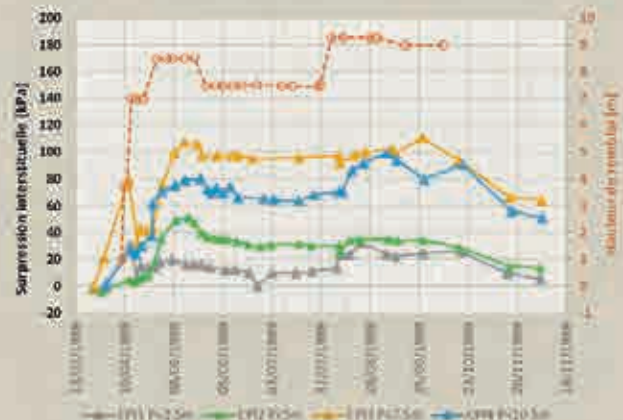


ÉVOLUTION DES TASSEMENTS durant le préchargement



4

ÉVOLUTION DES SURPRESSIONS INTERSTITIELLES durant le préchargement

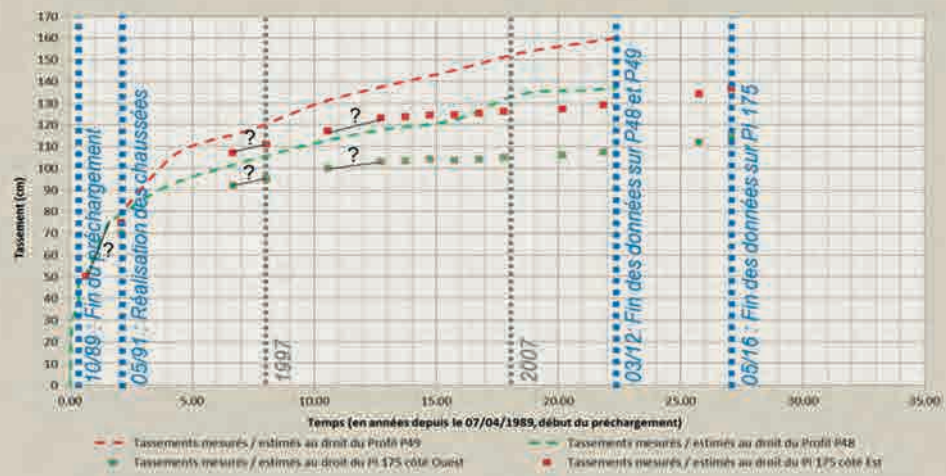


5

- 4- Évolution des tassements durant le préchargement.
- 5- Évolution des surpressions interstitielles durant le préchargement.
- 6- Tassements cumulés sur la zone depuis le début des travaux d'amélioration de sol.
- 7- Modélisation en éléments finis 2D de l'interaction sol/structure - Tassements cumulés à l'horizon 2070.

TASSEMENTS CUMULÉS SUR LA ZONE DEPUIS LE DÉBUT DES TRAVAUX D'AMÉLIORATION DE SOL

Tassements mesurés / estimés à l'axe du PI 175 et des trmblais contigus

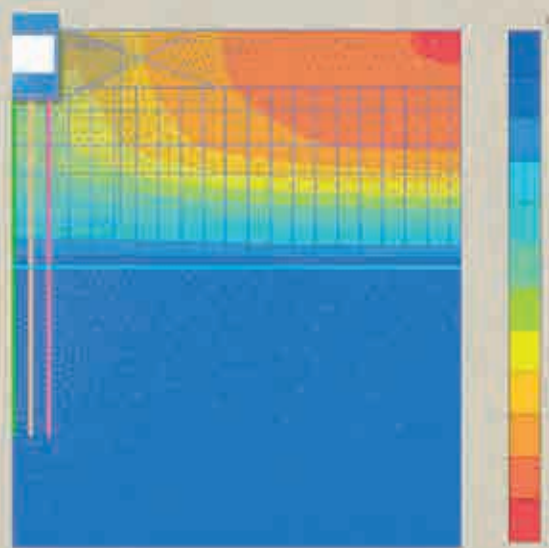


6

- 4- Change in subsidence during soil preloading.
- 5- Change in interstitial overpressures during soil preloading.
- 6- Cumulative subsidence in the area since the start of soil improvement works.
- 7- 2D finite element modelling of soil/structure interaction - Cumulative subsidence predicted by 2070.

MODÉLISATION EN ÉLÉMENTS FINIS 2D DE L'INTERACTION SOL/STRUCTURE

Tassements cumulés à l'horizon 2070



7

Le principal problème lié à poursuite des tassements est l'abaissement progressif des lignes rouges de l'autoroute et de la RD123 (portée par la dalle inférieure du PI175), affectant l'exploitation de ces axes. Durant les 30 premières

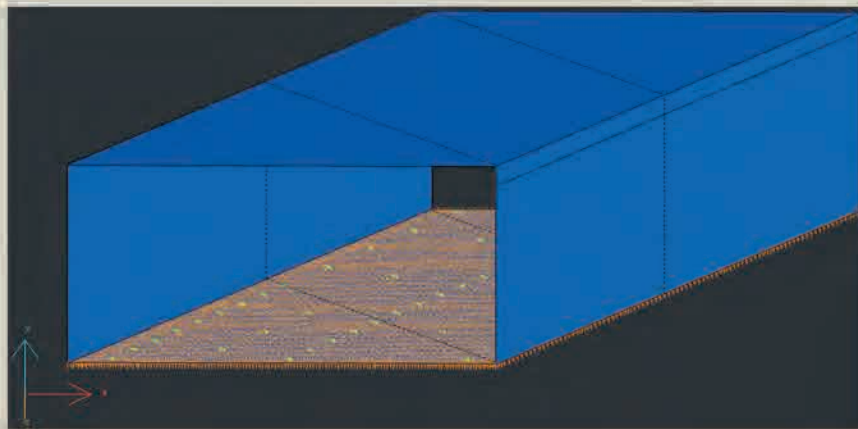
années de service, ces modifications de profil ont été réglées par des rechargements réguliers de l'autoroute et de la route départementale. Le rechargement de la route départementale, réalisé par remblaiement au-dessus de la traverse inférieure, est à l'origine d'une réduction de la hauteur libre du passage inférieur.

AVANT DE PRÉVOIR UNE STABILISATION DÉFINITIVE DE L'OUVRAGE

Trente ans après la mise en service de l'A64, les mesures de nivellement du remblai et des ouvrages ne montrant pas de tendance à la stabilisation des tassements sur la zone, la maîtrise d'ouvrage a souhaité étudier des solutions palliatives avant que leur amplitude ne devienne problématique tant structurellement que vis-à-vis du gabarit de la route départementale. À l'issue des études, deux solutions sont ressorties : confortement par

MODÉLISATION STRUCTURELLE EN ÉLÉMENTS FINIS 3D DU CADRE

Modèle Pythagore



8- Modélisation structurelle en éléments finis 3D du cadre - Modèle Pythagore.

9- Modélisation structurelle en éléments finis 3D du cadre - Efforts dans les armatures supérieures du radier.

10- Raideur en rotation du cadre liée aux mécanismes d'interaction sol/radier et sol/piédroit.

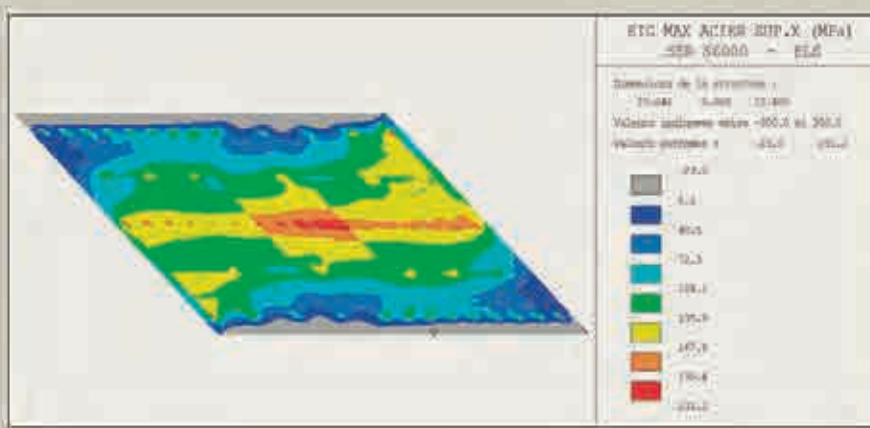
8- 3D finite element structural modelling of the frame - Pythagore model.

9- 3D finite element structural modelling of the frame - Forces in the deck top rebars.

10- Rotation stiffness of the frame due to soil/deck and soil/pier interaction mechanisms.

MODÉLISATION STRUCTURELLE EN ÉLÉMENTS FINIS 3D DU CADRE

Efforts dans les armatures supérieures du radier



8

9

micropieux connectés au radier de l'ouvrage et confortement par jet-grouting sous le radier. Ces deux solutions, limitant les travaux à l'emprise de l'ouvrage, permettent d'arrêter les tassements du passage inférieur et donc de ne pas entraver le gabarit de la RD (ce qui était à craindre en l'absence de travaux). Toutefois, le remblai autoroutier continuant à tasser, elles sont associées à un suivi topographique de la chaussée autoroutière destiné à suivre ces mouvements afin de programmer les reprofilages de cette dernière.

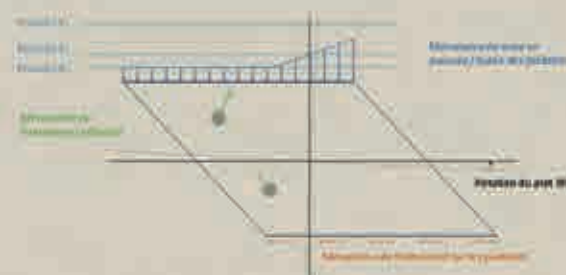
CONCEPTION DE LA SOLUTION DE RENFORCEMENT

CAMPAGNE DE RECONNAISSANCES COMPLÉMENTAIRES

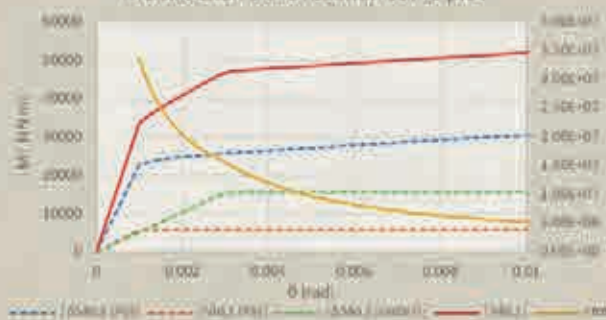
Le principe de confortement retenu étant de mettre en œuvre des renforcements ponctuels convertissant le radier existant en fondation mixte,

RAIDEUR EN ROTATION DU CADRE

liée aux mécanismes d'interaction sol/radier et sol/piédroit



Mobilisation de la réaction sur le plot



10

© SETEC

un calcul d'interaction sol-structure est apparu nécessaire.

Et, dans la mesure où la mise en charge des renforts est uniquement contrôlée par la consolidation des quelques 20 m d'alluvions vasardes - l'effort total transitant par le radier n'est pas modifié par les travaux de confortement - l'étude nécessite la considération de modèles phasés et de lois de comportement avancées en mesure de représenter le comportement différé des sols.

Ainsi, les études d'avant-projet ont débuté par une campagne d'investigations géotechniques axée sur la caractérisation des alluvions par le biais de deux piézocônes, de deux sondages pressiométriques, et de deux carottés au sein desquels des échantillons intacts ont été prélevés pour la réalisation d'identifications et d'essais mécaniques : compressibilité à l'œdomètre (visant à la détermination de paramètres de compressibilité primaire, de consolidation et de fluage) ainsi que résistance au cisaillement à la cellule triaxiale.

L'analyse conjointe de l'ensemble des reconnaissances a permis de fiabiliser le modèle géologique au droit du P1175, ▷

d'une part et, d'autre part, de conforter l'ordre de grandeur du taux de consolidation actuel ($U \sim 85\%$) pouvant être déduit de l'analyse de l'évolution des tassements, d'estimer les tassements résiduels - y compris tassements de fluage - pouvant être attendus en 2070 en l'absence de renforcements (~ 35 cm), et enfin, de définir, pour l'ensemble des terrains formant le sous-bassement de l'ouvrage, des modèles de comportement qui, conjointement, permettent de reproduire l'amplitude des tassements cumulés en surface aux différents moments clefs de la vie de l'ouvrage : retrait du préchargement ($S_{\text{préchargement}} \approx 50$ cm), état actuel ($S_{2020} \approx 160$ cm), état projeté en 2070 en l'absence de renforcement ($S_{2070} \approx 195$ cm).

VERS UNE SOLUTION DE MICROPIEUX

Les premières modélisations réalisées ont conduit à écarter la solution de jet-grouting qui, en dépit d'une bonne efficacité dans la réduction des tassements de l'ouvrage, génère des contraintes de compression dans les colonnes trop élevées en regard des résistances escomptées pour du jet-grouting réalisé dans des matériaux argileux. On s'est alors orienté vers une reprise en sous-œuvre par micropieux, pour laquelle les principaux enjeux de conception sont les suivants :

- Le blocage des tassements au droit de l'ouvrage ;
- L'impact du changement du mode de fondation (passage d'un appui homogène à une succession d'appuis ponctuels) sur les efforts internes au cadre (radier, piédroit et traverse supérieure) ;
- La réduction de la contrainte de contact radier/sol modifiant la reprise du moment d'axe vertical lié aux poussées des terres pour un ouvrage très biais (figure 10) ;
- Le calepinage des micropieux au sein d'un radier existant assez fortement ferrailé ;
- La stabilité structurelle des micropieux soumis aux efforts apportés par le radier et aux efforts parasites induits par le sol ;
- Les sujétions de réalisation des micropieux dans des terrains inconsistants sous nappe ;
- La prise en compte de l'incertitude sur l'amplitude des tassements différés résiduels attendus en l'absence de renforcement (ces derniers conditionnant la mise en charge des renforcements).

Pour répondre à ces différentes problématiques, la conception a fait appel à plusieurs modèles numériques :

→ **Des modèles d'interaction sol/structure (ISS)** (figure 7) réalisés en déformations planes, permettant de calculer les champs de déplacement, d'appréhender le comportement de la fondation mixte, de calculer les efforts parasites (G_z et G_{SN}) s'appliquant sur les micropieux et les piédroits. Ces calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel Plaxis en considérant des lois de comportement *HSM* et un comportement non drainé pour les trois sous-couches d'alluvions, des lois de comportement élastiques linéaires à plasticité parfaite et un comportement drainé pour les remblais et le substratum,

des éléments de poutre pour les structures ainsi que des éléments spécifiques de type *embedded beams* pour les micropieux.

11- Vue en plan des renforcements par micropieu (pour un plot).

12- Ancrage des micropieux dans la structure existante.

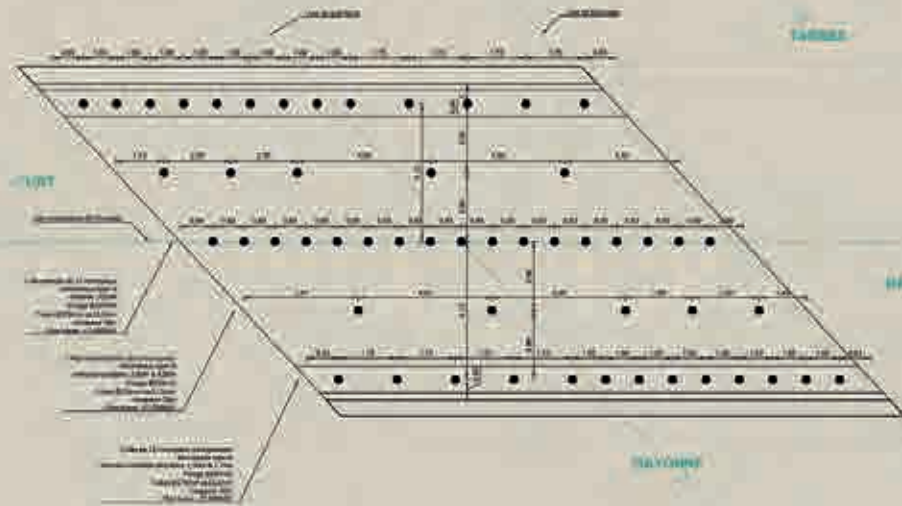
11- Plan view of micropile consolidation (for one section).

12- Micropile anchoring in the existing structure.

→ **Un modèle structurel 3D du cadre** (figure 8) réalisé sous Pythagore, utilisé pour déterminer les torseurs de sollicitations globales au niveau de la dalle inférieure de l'ouvrage, d'une part, et - en tenant compte d'une raideur d'appui radier-sol et de matrices de raideur en tête de micropieux - de déterminer les sollicitations dans les éléments structuraux du cadre, d'autre part (figure 9).

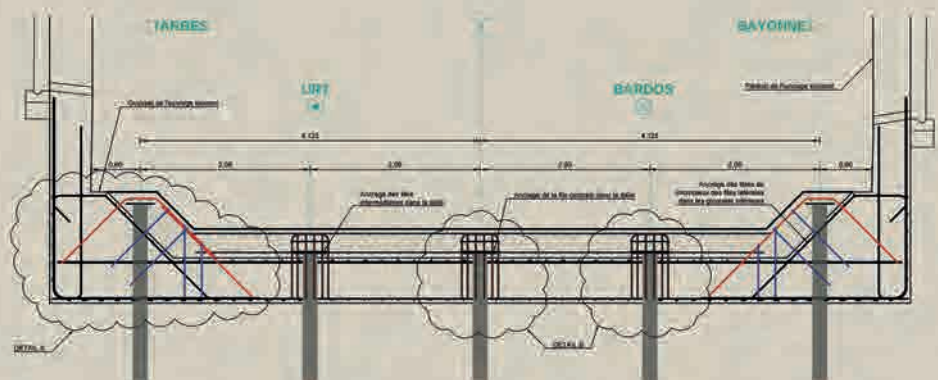
→ **Un modèle 3D de semelle infiniment rigide sur des micropieux** modélisés en éléments de poutres sur ressorts élasto-plastiques mené avec Groupie+, permettant, sur la base des torseurs globaux d'efforts appliqués à la semelle, des déplacements parasites et de la raideur en rotation de l'ouvrage (se

PLAN DE PRINCIPE DES RENFORCEMENTS PAR MICROPIEU (POUR UN PLOT)



11

PRINCIPE D'ANCRAGE DES MICROPIEUX DANS LA STRUCTURE EXISTANTE



12

développant par mise en poussée-butée des terrains au contact des piédroits, frottement des terrains le long des piédroits et frottement sol-radier (figure 10)), de déterminer les efforts internes dans les micropieux.

De manière à fiabiliser la conception vis-à-vis des incertitudes sur les tassements résiduels, les calculs d'interaction sol-structure ont été menés en considérant la valeur caractéristique du tassement résiduel sous le remblai courant de la zone de l'ouvrage (35 cm) et en majorant cette valeur de 50%. Ces calculs ont mis en évidence des comportements similaires à l'issue des 50 prochaines années de l'ouvrage, tant pour le contrôle des déplacements du cadre (ceux-ci étant estimés à moins de 2 cm), que pour le fonctionnement de la fondation mixte (le ratio d'efforts passant dans les micropieux étant de l'ordre de 45% pour les calculs basés sur la valeur caractéristique du tassement résiduel contre 55% pour ceux basés sur la valeur majorée).

SOLUTION RETENUE

Sur la base de l'analyse paramétrique menée à l'aide des modèles d'interaction sol-structure, de manière conservatoire, les dimensionnements ont été menés en considérant :

- Pour les justifications des structures et la détermination des efforts horizontaux en tête de micropieux, que la répartition de l'effort vertical entre radier et micropieux est de 75% de charge dans les micropieux (les 25% restant continuant à transiter directement du radier au sol) ;
- Pour les justifications des micropieux (portance et justification de l'armature), que 100% de l'effort vertical transite par les micropieux.



13
© SETEC

13- Essais préalables de micropieux.

14- Forage des micropieux dans le gousset côté Tarbes (sous alternat).

15- Mise en place et réglage des platines avant ferrailage (sous coupure de circulation).

13- Preliminary micropile tests.

14- Micropile drilling on Tarbes side (with alternating traffic).

15- Installation and adjustment of mounting plates before reinforcement (with traffic break).

Pour chacun des plots, la solution retenue *in fine* en conception est composée d'un total de 53 micropieux de 30 m de longueur.

Forés en 250 mm, ils s'ancrent de 12 m dans le substratum par le biais d'une injection globale et unitaire sur cette hauteur, sont équipés de tubes pétroliers de diamètre 178 mm d'épaisseur 11,5 mm et sont répartis en cinq files (figure 11) :

- Une file centrale de 17 micropieux espacés tous les mètres ;
- Deux files de 13 micropieux localisés dans les goussets sur lesquelles les espacements varient entre 1 m et 1,75 m ;
- Deux files intermédiaires composées de 5 micropieux espacés entre 2 et 4 m.

Les micropieux sont ancrés dans la structure existante par l'intermédiaire d'un sur-radier de 35 cm d'épaisseur en section courante de la traverse, épaisseur portée à 45 cm dans la zone du gousset (figure 12).

MISE EN ŒUVRE EN PHASE TRAVAUX

RECONNAISSANCES PRÉLIMINAIRES ET ESSAIS D'ARRACHEMENTS

En décembre 2022, au démarrage des travaux, une reconnaissance géotechnique complémentaire par trois sondages carottés descendus dans le substratum a été réalisée par l'entreprise dans le but de fiabiliser les interfaces du modèle géologique, de reconnaître la nature de l'horizon d'ancrage avec ses éventuelles variabilités verticale et horizontale et d'appréhender les outils de coupe les plus adaptés. Celle-ci a mis en évidence une interface entre alluvions et substratum environ 1,5 m plus profonde qu'escomptée et une nature franchement marneuse du substratum. Cette campagne a été complétée par des essais de micropieux menés à la rupture (figure 13), permettant de fiabiliser les frottements latéraux unitaires dans les terrains d'ancrage et d'en optimiser les longueurs d'ancrage : les portant de 12 m à 8 m.

ÉVOLUTION DU PROJET D'EXÉCUTION

Afin de réduire autant qu'il était possible la durée de la fermeture de la route départementale, les confortements ont été réalisés par demi-chaussée avec maintien de la circulation sous alternat sur la demi-chaussée opposée. Ce faisant, la période de fermeture a pu être réduite de 5 à 2 mois.

En raison de l'exiguïté de la zone de travail et de l'encombrement de la foreuse, les micropieux ont été réalisés avec des tubes de longueur 1,5 m assemblés par manchonnage. Et, du fait de la présence d'assemblages manchonnés en partie haute des micropieux, ▷



14
© SETEC



15
© SETEC



16

© SETEC



17

© SETEC

l'entreprise a mis en évidence, dans le cadre des études d'exécution, un défaut de résistance structurelle en partie haute de micropieux, pallié par la mise en place de tubes de section épaissie en partie haute : diamètre de 177,8 mm et épaisseur de 16 mm jusqu'à 3,5 m sous le radier existant puis épaisseur de 12,5 mm en dessous.

EXÉCUTION DES TRAVAUX

Les travaux de foration ont été réalisés en 3 phases dont deux sous alternat, par une foreuse C4XP, équipée d'une tête HI'Drill (figure 14).

Les forages ont été réalisés à l'auto-foreur avec un outil perdu directement monté sur les armatures du micropieu. Les platines ont été liaisonnées aux tubes de micropieux et réglées en altimétrie (figure 15).

Les micropieux ont été ensuite connectés à la structure existante via des armatures scellées (épingles) régulièrement espacées sur la surface du radier et par des "U" et "L" renforçant l'ancrage au

PRINCIPALES QUANTITÉS

TASSEMENT DE L'OUVRAGE AVANT TRAVAUX :
entre 0,50 et 0,90 m

NOMBRE DE MICROPIEUX : 106

LINÉAIRE DE FORAGE : 3021 m

ARMATURES DE MICROPIEUX : 180 t

BÉTON DU SUR-RADIER : 110 m³

ARMATURES BÉTON ARMÉ : 15 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉE :
Autoroutes du Sud de la France (ASF)

ASSISTANT À MAÎTRE D'OUVRAGE : Cerema

MAÎTRISE D'ŒUVRE STRUCTURE : Diades

MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉOTECHNIQUE : Terrasol

ENTREPRISE : Soletanche Bachy

BUREAU D'ÉTUDE STRUCTURE D'EXÉCUTION :
Soletanche Bachy et lecd

CONTRÔLE EXTÉRIEUR DE L'ENTREPRISE : Ginger Cebtp

16- Ferrailage du demi-radier côté Tarbes (sous coupure de circulation).
17- Bétonnage du demi-radier côté Tarbes (sous coupure de circulation).

16- Reinforcement of half-deck on Tarbes side (with traffic break).

17- Concreting of half-deck on Tarbes side (with traffic break).

droit de chaque micropieu (figure 16). Un sur-radier a ensuite été coulé sur une épaisseur d'environ 0,35 m (figure 17). L'ouvrage a été enfin remblayé et le profil routier repris de part et d'autre afin de le remettre en conformité (rendu non conforme suites aux tassements de l'ouvrage) et de restituer un écoulement gravitaire des eaux d'assainissement. □

ABSTRACT

A64 MOTORWAY: MICROPILES TO PASS OVER A COMPRESSIBLE AREA AT URT (64)

ALEXANDRE BEAUSSIER, SETEC TERRASOL - PAUL VIROLE, SETEC DIADES - DAOUA GUEYE, ASF DOIO - THOMAS SERNA, SOLETANCHE BACHY

Frame bridge PI175 is embedded in a 9-metre embankment erected on compressible materials. Despite soil preloading of the area together with drainage, since it entered service 30 years ago it has sustained further subsidence by about one metre. This led to consolidation with micropiles. Since the design of this consolidation transformed shallow foundations into composite foundations, soil/structure interaction calculations had to be performed to analyse the structure's vertical behaviour. 3D structural calculations were also needed to assess the impact of the change of foundation behaviour on the internal forces in this highly skewed frame. Finally, the works faced challenges due to the cramped work area. □

AUTOPISTA A64: MICROPILOTES PARA FRANQUEAR UNA ZONA COMPRESIBLE EN URT (64)

ALEXANDRE BEAUSSIER, SETEC TERRASOL - PAUL VIROLE, SETEC DIADES - DAOUA GUEYE, ASF DOIO - THOMAS SERNA, SOLETANCHE BACHY

El puente-marco PI175 está encastrado en un terraplén de 9 m, erigido sobre materiales compresibles. A pesar de una precarga de la zona asociada al drenaje, desde su puesta en servicio hace 30 años ha sufrido una subsidencia adicional de aproximadamente de un metro. Ello ha obligado a prever un refuerzo por micropilotes. El diseño de este refuerzo, que transforma un cimiento superficial en cimiento mixto, ha precisado cálculos de interacción suelo/estructura para entender el comportamiento vertical de la construcción, así como cálculos estructurales en 3D para evaluar el impacto de la modificación del comportamiento de los cimientos en los esfuerzos internos en este marco, que discurre muy oblicuamente bajo la autopista. Finalmente, la realización ha topado con problemas debidos a la exigüidad de la zona de trabajo. □



En 2023,
votre assureur unit
toutes ses forces sous
une nouvelle identité



Retrouvez tous nos produits
d'assurance sur smabtp.fr



**VOTRE ASSUREUR
PARTENAIRE**

Engineering a Better Solution

Rejoignez notre communauté technique !



MACCAFERRI

www.maccaferri.com/fr



Protection contre les risques naturels :

En haut : Carcassonne Ligne SNCF (11)
Géomatelas tridimensionnel MacMat R-Acier

En bas : Ligne SNCF de la Côte Bleue (13)
Écrans pare-blocs, grillage double torsion

