TRAVAUX
REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

SOLS ET FONDATIONS. 3e LIGNE DU METRO DE TOULOUSE : ESSAIS DE CHARGEMENT STATIQUE DE PIEUX. DEVIATION DE JARGEAU (45). QUAI JOANNES COUVERT AU HAVRE. LE PARK HOTEL A NICE. STEP DES TROIS RIVIERES A CLERMONT-FERRAND. BIOMINERALISATION POUR SECURISER UN PONT A ORLEANS. REAMENAGEMENT DU RONDEAU A GRENOBLE. LIGNE 14 SUD : EXCAVATION AU TUNNELIER SOUS LES CARRIERES DE PARIS. REMONTEE DE FONTIS AU-DESSUS DES CAVITES SOUTERRAINES

N° 982 NOVEMBRE 2022

STEP DES TROIS RIVIÈRES À CLERMONT-FERRAND
© NGE

LES TRAVAUX PUBLICS FÉDÉRATION NATIONALE

© Gettyimages - agence PalettePalette
POUR INTÉGRER
VOS INTÉRIMAIRES...
QUI VOUS ACCOMPAGNE ?
Anticiper, accueillir et accompagner vos intérimaires avec
LePackSECURITEinterimairesBTP.fr
Le PACK SÉCURITÉ
INTÉRIMAIRES BTP

OPPBTP

TRAVAUX
REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS
N° 982 NOVEMBRE 2022

Directeur de la publication
Bruno Cavagné

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

Comité de rédaction
Jean-Bernard Datry (Setec),
Denis Etienne (Bouygues),
Philippe Gotteland (Fntp),
Ziad Hajar (Systra),
Florent Imberty (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),
Jacques Robert (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
235, avenue le Jour se Lève
92100 BOULOGNE BILLANCOURT
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.fr

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

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

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

Site internet : www.revue-travaux.com

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

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

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux).
Ouvrage protégé ; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).

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

GÉOTECHNIQUE

DISCIPLINE EMPIRIQUE OU SCIENCE À PART ENTIÈRE ?

© DR

La géotechnique est souvent perçue par certains ingénieurs comme une discipline très empirique dans laquelle le retour d'expérience joue un rôle fondamental, sinon unique. Sans nier l'apport essentiel de l'expérience et de l'expérimentation dans les diagnostics géotechniques, cette vision de la discipline est réductrice et peu motivante pour de jeunes ingénieurs qui peuvent se sentir écartés de projets importants avant de longues années d'apprentissage. Malheureusement, cette vision est exacerbée par la prolifération des normes qui font la part belle à des formules empiriques pour le calcul des ouvrages géotechniques. Les normes n'ayant pas vocation à être des livres d'enseignement, les explications et limitations accompagnant ces formules sont inexistantes et la tendance des ingénieurs non spécialistes de géotechnique peut être de s'approprier, sans discernement, ces expressions dont le mérite est de leur fournir la réponse à leur problème sans s'embarrasser de considérations théoriques. Combien de fois ai-je entendu en commission de normalisation parasismique cette volonté de donner dans la norme une formule passe-partout qui pourrait être utilisée par n'importe quel ingénieur, de préférence non-géotechnicien.

Pourtant si l'on se projette quelques années en arrière, ce qui est enseigné actuellement sous le nom de géotechnique s'appelait Mécanique des Sols, un nom à mon avis mieux approprié et plus évocateur de la réalité. Le fondateur de la Mécanique des Sols, Karl Terzaghi, faisait la part belle aux aspects théoriques et avait intitulé le premier livre complet sur cette discipline en 1943 "Theoretical Soil Mechanics" ; il fut suivi par d'autres noms illustres comme Taylor (Fundamentals of Soil Mechanics en 1948), Casagrande, Seed, etc. La France elle-même a joué un rôle prépondérant dans cette approche théorique avec les travaux d'ingénieurs exceptionnels depuis Coulomb, Poncelet, Boussinesq, Caquot et Kérisel.

En 1773, Charles Augustin Coulomb soumettait à l'Académie des Sciences son mémoire intitulé "Essai sur une application des règles de maximis et de minimis à quelques problèmes de Statique relatifs à l'Architecture". Ce texte est considéré comme fondateur en géotechnique des travaux ultérieurs portant sur la stabilité des pentes, la poussée sur les soutènements, la capacité portante des fondations, etc. et constitue la base théorique de ce qui deviendra l'analyse limite ou le calcul à la rupture, outils théoriques d'une richesse incomparable. Afin de rendre hommage aux contributions de Coulomb en géotechnique, et de célébrer le 250e anniversaire de la parution de son mémoire, le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS) organise en 2023 un symposium international destiné à mettre en lumière les divers apports de la théorie de Coulomb à la géotechnique. Il donnera l'opportunité à des experts français et européens de témoigner de l'importance de l'héritage des travaux de Coulomb dans la géotechnique d'aujourd'hui, y compris dans ses développements les plus récents. Néanmoins, tout en reconnaissant le rôle essentiel de l'approche théorique, il convient de ne pas occulter le fait qu'un modèle, aussi élaboré soit-il, n'est qu'un modèle et ne représente qu'imparfaitement la réalité physique. Aussi, ce symposium, placé sous le haut patronage de l'Académie des Sciences, de l'Académie des Technologies, de la Société Internationale de Mécanique des Sols et de Géotechnique (ISSMGE) et qui a également reçu le soutien de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), n'a pour objectif que de mettre en lumière un des aspects de la Mécanique des Sols, et de lui redonner sa place de science mécanique à part entière.

ALAIN PECKER
MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
PROFESSEUR À L'ENPC
ANCIEN PRÉSIDENT DU CFMS

LISTE DES ANNONCEURS : ***OPPBTP***, 2e DE COUVERTURE - ***BOTTE FONDATIONS***, P.9 - ***SETEC/TERRASOL***, P.10 - ***SMA BTP***, P.13 - ***CNETP***, P.15 - ***PRO BTP***, P.23 - ***BTP BANQUE***, P.37 - ***L'AUXILIAIRE BTP***, 3e DE COUVERTURE - ***SOLETANCHE BACHY***, 4e DE COUVERTURE

SOLS & FONDATIONS

DÉVIATION DE JARGEAU (45) : DES PIEUX DE FONDATIONS À L'ÉPREUVE DES KARSTS © SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

04 ALBUM

06 ACTUALITÉ

16 **ENTRETIEN AVEC BENJAMIN RICHARD**
AFPS - RISQUES SISMIQUES : PRÉVENIR, OBSERVER ET GÉRER L'AVENIR

24 SOL SOLUTION - APPORTER "LA SOLUTION" AUX PROBLÈMES GÉOTECHNIQUES

32 **ESSAIS DE CHARGEMENT STATIQUE DE PIEUX**
pour la 3e ligne du métro de Toulouse

38 **DÉVIATION DE JARGEAU (45)**
Des pieux de fondations à l'épreuve des karsts

46 **QUAI JOANNÈS COUVERT AU HAVRE**
Renforcement d'un quai de 400 m dans le cadre d'un projet éolien

53 **LA RENAISSANCE D'UN PALACE À NICE**
Le Park Hôtel

60 **STEP DES TROIS RIVIÈRES À CLERMONT-FERRAND**
Un chantier de fondations spéciales multi-techniques en conception-réalisation

66 **DE LA BIOMINÉRALISATION POUR SÉCURISER LE PONT RENÉ THINAT**
à Orléans

72 **RÉAMÉNAGEMENT DU RONDEAU**
une tranchée couverte routière stratégique pour l'agglomération grenobloise

80 **RETOUR D'EXPÉRIENCE DE LA LIGNE 14 SUD**
Excavation au tunnelier sous les carrières souterraines du Calcaire Grossier de Paris

86 **REMONTÉE DE FONTIS AU-DESSUS DES CAVITÉS SOUTERRAINES**
Utilisation d'un géosynthétique bi-raideur instrumenté

ÉCHANGEUR DU RONDEAU À GRENOBLE OUVRAGE STRATÉGIQUE CHANTIER COMPLEXE

Soletanche Bachy, au sein d'un groupement d'entreprises Vinci Construction, réalise pour la DREAL Auvergne Rhône Alpes les travaux spéciaux du projet de réaménagement de l'échangeur du Rondeau à Grenoble. L'ouvrage est construit sous nappe, dans des alluvions graveleuses du Drac, à l'abri de parois moulées qui supportent une dalle de couverture. Les terrassements en taupe sont quant à eux menés à l'abri d'un fond injecté préalablement réalisé depuis la surface.
(Voir article page 72).

© CÉDRIC HELSLY

© CÉDRIC HELSLY

UNE SECONDE LIGNE DE MÉTRO POUR LA MÉTROPOLE DE RENNES

La Ligne B de métro de la métropole rennaise qui a été mise en fonction en septembre 2022, doit assurer le transport de 110 000 voyageurs par jour. 764 entreprises ont travaillé à la réalisation de cette infrastructure majeure pour ce territoire. Ce projet techniquement complexe a pu bénéficier d'innovations, telle que la maquette numérique BIM utilisée par Egis, dès le début du projet.

© EGIS

La nouvelle ligne du métro relie sur 13,4 km Cesson-Sévigné à Saint-Jacques-de-la-Lande.

Le 20 septembre 2022 était une date importante pour la métropole rennaise. La seconde ligne de métro, qui compte 15 stations, a reçu ses premiers voyageurs. Reliant Cesson-Sévigné à Saint-Jacques-de-la-Lande en passant par la ville centre, cette nouvelle infrastructure doit assurer le transport de 110 000 voyageurs par jour soit 4 000 par heure et par direction. « *L'ouverture de la seconde ligne de métro réduit de 50 000 le nombre de véhicules circulant dans la métropole. Cela permet de régler des problèmes de pollution de l'air et d'apporter plus de confort aux habitants,* » explique Yannick Nadesan, maire adjoint de Rennes délégué à la santé et au vieillissement. C'est ainsi qu'avec la Ligne B, les trois quarts des Rennais habiteront à moins de 10 minutes à pied d'une station de métro. À l'échéance 2025, la métropole table sur une augmentation de fréquentation de 25 % soit plus de 110 millions de voyageurs par an.

→ 7 500 emplois équivalents temps plein

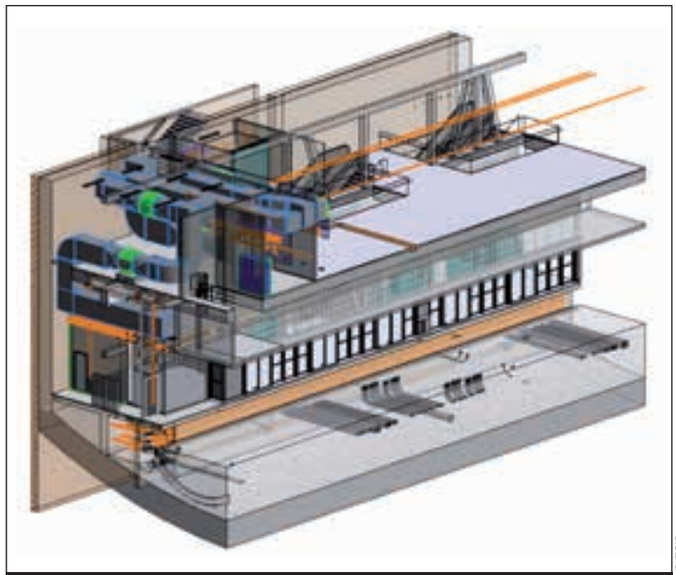
Solution alternative à la voiture individuelle, son impact environnemental est mis en avant par les élus, qui espèrent des retombées économiques, d'emploi et d'insertion sociale. La Ligne B permettra de relier plus aisément lieu de travail et habitat. Le réseau de bus métropolitain a été redéployé en fonction de ce nouveau métro, offrant une plus grande fréquence et amplitude de ses lignes. Le coût de cette infrastructure est de 1,342 milliard d'€ dont 1,096 ont été financés par la métropole. 764 entreprises (7 500 emplois équivalents temps plein) ont travaillé sur ce chantier d'envergure et techniquement complexe.

La Société des transports collectifs de l'agglomération rennaise (Semtcar), mandataire de la maîtrise d'ouvrage Rennes Métropole, a constitué un groupement dont Egis était le mandataire avec Arcadis et l'Heude & l'Heude.

Les équipes engagées ont dû répondre à plusieurs spécificités : une typologie d'infrastructures mixtes avec 8,6 km du tunnel monotube foré au tunnelier (diamètre 9,5 m), 2,4 km en tranchée couverte, 2,4 km de viaduc. Les travaux souterrains ont été réalisés dans un milieu urbain dense et sensible comprenant des interfaces avec la Ligne A en exploitation. La géothermie a directement été intégrée aux structures des stations.

→ Maquette numérique BIM

Egis en charge (liste non exhaustive) de la direction du projet, de la maîtrise d'œuvre du tunnel et de ses équipements, du viaduc et du génie civil de 10 stations, a utilisé de nouveaux outils numériques tel que le BIM, dès le début du projet. Ainsi les stations ont été conçues sous maquette numérique BIM pour les métiers du génie civil, de la structure, du second-œuvre, jusque dans la réalisation des plans d'exécutions. Selon les mots des communicants du groupe Egis « *En favorisant le travail collaboratif entre toutes les parties prenantes, et en permettant la modélisation la plus juste des ouvrages sur tout leur cycle de vie, le BIM a participé à la maîtrise de l'acte de construire et a répondu aux exigences techniques et environnementales les plus hautes.* » ■



© EGIS

Maquette numérique de la conception des stations.

13 MESURES POUR LE BTP

Face à l'augmentation des prix des matériaux et aux difficultés d'approvisionnement des entreprises Bruno Le Maire, ministre de l'Économie et des Finances, avait annoncé en juillet 2022, le lancement des Assises du bâtiment et des travaux publics (BTP). 200 représentants du secteur ont ainsi été entendus lors de 6 sessions de travail qui ont abouti à l'annonce de 13 mesures applicables sans délai.

Des dispositions ont été prises pour améliorer la trésorerie des entreprises et la prévisibilité des prix sur les marchés publics et privés, pour simplifier les marchés publics et la mise en œuvre des obligations règlementaires et écologiques qui pèsent sur les entreprises et pour accélérer la transition écologique.

« *À ce stade, les annonces essentiellement axées sur les marchés publics ne concernent pas les TPE, soit 96 % des entreprises de cette branche dont seul 13 % du chiffre d'affaires est réalisé avec l'État et les collectivités locales. Il est impératif de soulager la trésorerie des entreprises du BTP (...), beaucoup de chemin reste à accomplir.* » a réagi Marc Sanchez, le secrétaire général du Syndicat des indépendants et des TPE. ■

DES INNOVATIONS POUR DÉCARBONER L'ENSEMBLE DU SECTEUR DES TRAVAUX PUBLICS

© HESUS

Le recyclage des terres de chantier, et plus largement l'économie circulaire, enjeux de décarbonation.

Comment décarboner les activités liées aux travaux publics ? Cette vaste question était abordée lors de deux journées, les 17 et 18 octobre 2022, organisée par la Fédération nationale des travaux publics (FNTP) à la Maison des travaux publics, à Paris. La FNTP a initié pendant deux ans des études en étroite collaboration avec le cabinet Carbone 4 et l'Observatoire français des conjonctures économiques (OFCE) sur les émissions de CO_2 des activités du secteur. Les résultats rendus publics en février 2022, ont mis en évidence que la moitié des émissions de CO_2 en France est liée aux usages des infrastructures : usage des énergies et des mobilités. Cela représente un effort d'investissement entre 16 et 30 milliards d'euros par an jusqu'en 2050, pour améliorer la maintenance des infrastructures, décarboner les mobilités et l'énergie, lutter contre l'artificialisation avec la création de puits de carbone ou encore rendre les territoires résilients face aux aléas climatiques.

→ Mettre en place des solutions efficaces

L'innovation est un facteur essentiel en matière de décarbonation des travaux publics avec quatre enjeux qui sont bien identifiés : le numérique, les matériaux, les nouvelles énergies et l'économie circulaire. « *Ces questions sont abordées dans le cadre d'un comité de suivi intitulé Acteurs pour la planète et présidé par Brice Lalonde, qui va se réunir 4 fois par an. Il comprend des personnes d'horizons différents, des entrepreneurs, des associations, des politiques, des chercheurs. Le sujet est assez compliqué, donc nous avons besoin de confrontation. Les comportements doivent bouger et nous devons mettre en place des solutions efficaces.* » considère Xavier Neuschwander, Président de la commission technique et innovation de la FNTP.

Ce comité doit travailler sur le financement de cette transition, les innovations, la formation mais aussi sur les indicateurs pour mesurer les effets des mesures décarbonation. « *Nous devons innover dans les méthodes, dans le juridique avec des nouveaux contrats, mais aussi dans la communication pour attirer les jeunes talents. Il faut aussi réussir à mieux mobiliser les donneurs d'ordre tels que les collectivités locales, sur cette problématique. Pourquoi ne pas appliquer la méthode d'Analyse du cycle de vie (ACV) à la commande publique ?* » s'interroge Jean-Christophe Louvet, Président de la commission développement durable de la FNTP.

Des startups mais aussi des entreprises travaillant dans la branche des travaux publics depuis plus longtemps, développent des innovations pour répondre aux enjeux de décarbonation, qui doivent entrainer la société entière vers la neutralité carbone, en 2050.

→ Logiciels et applications

Le numérique tient une place importante dans ces processus. Des innovations étaient présentées lors de ces journées : un logiciel pour automatiser et optimiser les projets afin de réduire leur impact environnemental, une application sur le suivi béton avec le calcul de son empreinte carbone immédiatement accessible sur les chantiers ou encore la méthode ACV appliquée en dynamique sur les opérations. « *Pour moins de gaspillage, une Supplychain permet qu'une bonne ressource soit au bon endroit et au bon moment pour toutes les entreprises d'un chantier. Ainsi nous fournissons un logiciel de planning, des applications de gestion de la logistique, du tri, de la régulation du trafic.* » explique Fabien Font, directeur de Teamoty, qui vient de lever 3 Md€ pour développer son activité qui promet une réduction de 30 % des délais par chantier et un tri de 100 % des déchets. ■

TROPHÉE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Le Syndicat des énergies renouvelables (SER) a choisi de mettre à l'honneur la Vendée, « département qui constitue un modèle dans le domaine de la transition énergétique. » *Lors de son colloque annuel, Alain Leboeuf, Président du conseil départemental s'est vu décerner le Trophée des énergies renouvelables, soulignant sa politique volontariste. En effet en Vendée, 10 % du gaz consommé est du biogaz, 20 % de l'électricité provient de ressources renouvelables locales et 300 kg d'hydrogène vert (bientôt une tonne) sont produits quotidiennement. Une deuxième station distribuant de l'hydrogène vert est en construction et 101 bornes de recharge électrique sont ouvertes au public.*

FINANCEMENT EUROPÉEN POUR UN PONT AU-DESSUS DE LA GARONNE

La Banque européenne d'investissement a octroyé un prêt à hauteur de 30 Md'€ à l'Agglomération d'Agen pour le projet du Pont et Barreau de Camélat, dont la mise en service est prévue fin 2023. Cet accord permettra d'étaler le financement en complément de la participation du département du Lot-et-Garonne et de l'État. Ces nouvelles infrastructures, un tronçon routier de trois kilomètres, un troisième pont sur la Garonne, et un viaduc traversant le canal latéral au fleuve ainsi qu'une voie pour les cyclistes et les piétons, sont la dernière étape du contournement d'Agen par l'ouest. Ce projet doit contribuer à désenclaver l'est du département du Lot-et-Garonne.

LA GÉOTECHNIQUE SOUS TOUS LES ANGLES

Dans son rôle de promotion de la profession, des recherches et des études de Génie Civil ayant trait au sol, le Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS) a organisé pour la troisième année, un concours de photo. Des photographes étaient appelés à montrer en image la réalité des métiers de cette branche. Leurs clichés ont été réalisés sur différents chantiers importants. Il s'agit du franchissement urbain Pleyel (FUP) à Saint-Denis (Seine-Saint-Denis), des ouvrages géotechniques à Port-en-Bessin (Calvados), de l'effacement d'une galerie sur le chantier du barrage de Poutès en Haute-Loire ou encore du creusement d'une galerie à Bagneux (Hauts-de-Seine). Ce concours permet au CFMS de se constituer une photothèque libre de droits afin d'illustrer, avec des photos de qualité, la discipline géotechnique auprès des géotechniciens, mais aussi du grand public.

Palmarès

1er Prix : *Omar Krikez, Franchissement urbain Pleyel (FUP) travaux de barrettes / Saint-Denis.*

2e Prix : *Anthony Dumont, Les ouvrages géotechniques face aux forces de la nature / Port-en-Bessin.*

3e Prix : *Vincent Madern, Effacement d'une galerie pour redonner de la liberté aux saumons / Poutès.*

Prix spécial du jury : *Thomas Chauvin, Creusement d'une galerie dans une carrière préalablement injectée / Bagneux.*

© OMAR KRIKEZ / CFMS

1er prix du concours photo organisé par le CFMS.

UNE DÉMARCHE INÉDITE POUR LIMITER LES CHUTES DANS LE BTP

© SOPHIE LE RENARD

Les salariés du BTP sont particulièrement exposés aux accidents du travail.

Les chiffres sont éloquents. Le secteur du BTP présente une sinistralité bien au-dessus de la moyenne : à lui seul, il concentre 14 % des accidents du travail, en France. Selon l'Assurance Maladie, 1 salarié du BTP sera victime de plus de 2 accidents du travail dans sa carrière et cumulera en moyenne 220 jours d'arrêt de travail.

Les chutes (hauteur et plain-pied) et les manutentions manuelles sont impliquées dans près de 80 % des arrêts d'accidents du travail. Elles engendrent des coûts directs et indirects pouvant être estimés à 5 % du budget des ouvrages.

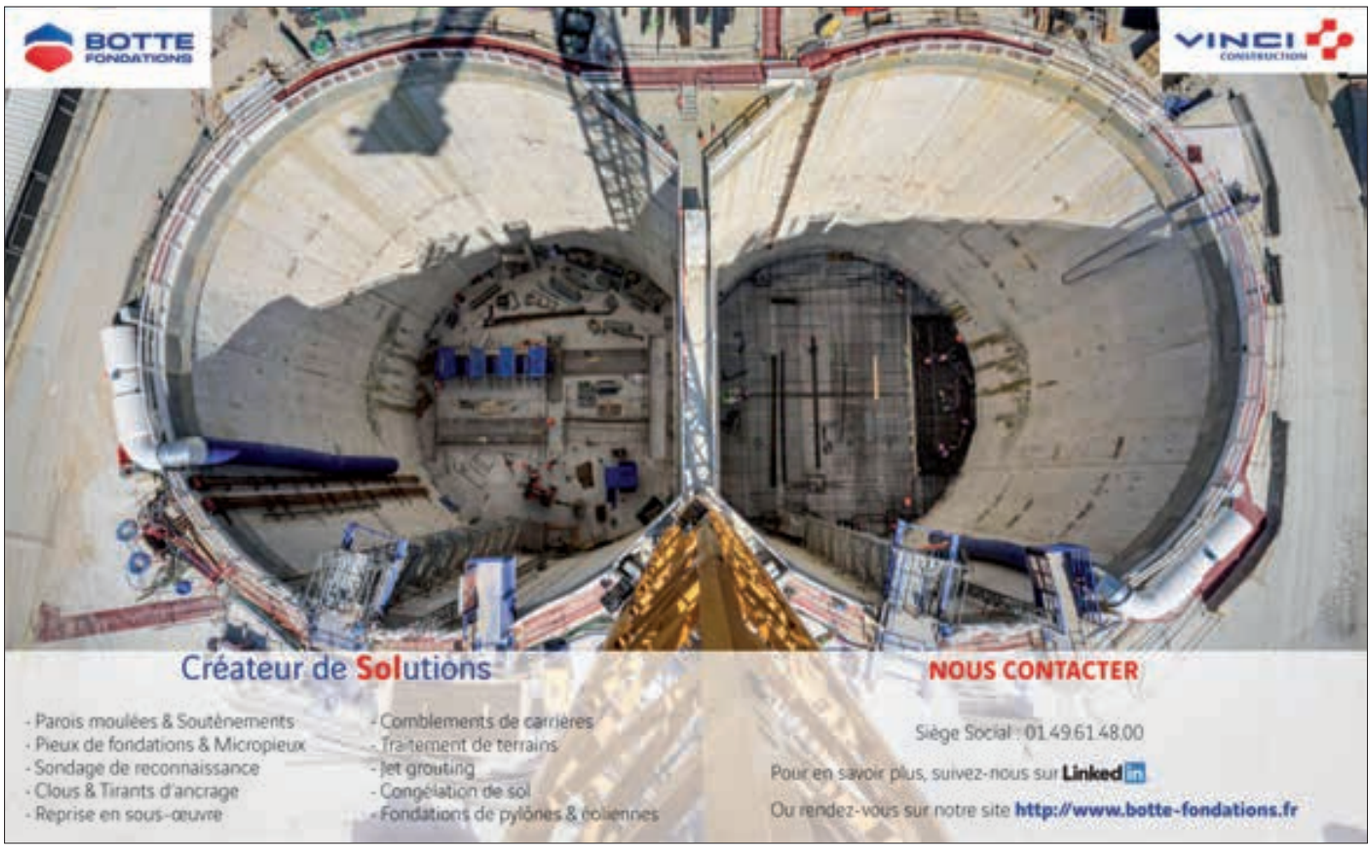
Face à cette réalité, la Caisse d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat), a souhaité mettre en place un programme au niveau national pour réduire les risques d'accidents du travail et de maladies professionnelles sur les chantiers. La Carsat Aquitaine est particulièrement engagée sur la sinistralité, qui concerne dans cette région 89 509 salariés du BTP et décline depuis 2019, le dispositif "Chutes Pro BTP".

→ Mutualisation des moyens

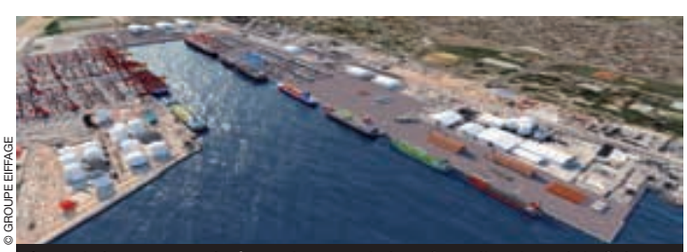
« *Plutôt qu'une sensibilisation en direction des entreprises et des salariés, nous avons choisi de cibler les maîtres d'ouvrages mais aussi les maîtres d'œuvres et les coordonnateurs Sécurité et protection de la santé (SPS). Dans une optique de prévention des risques, l'objectif est de convaincre les décideurs d'inclure dès l'appel d'offre, des prescriptions pour faire baisser la sinistralité.* » explique Francis Di Guiseppe, ingénieur conseil à la Carsat Aquitaine. Cette démarche inédite s'appuie sur une mutualisation des moyens au niveau des infrastructures (prévention des chutes de hauteur), de la logistique (gestion des manutentions et des approvisionnements), de l'hygiène et des conditions de travail. Il s'agit aussi de valoriser le rôle de la coordination SPS. « *Les missions ne sont pas à la hauteur des attendus que fixe la réglementation par rapport à la santé et à la sécurité au travail.* » déplore l'ingénieur. L'évaluation réalisée les deux premières années de la mise en place du programme montre que les prescriptions en matière de sécurité ont été suivies d'effet dans 75 % des cas, lorsqu'elles étaient stipulées dans l'appel d'offre. Le programme national se terminera fin 2022 mais « *il pourra être reconduit,* » précise Francis Di Guiseppe. ■

UNE STARTUP D'ÉTAT AU SERVICE DES RÉSEAUX DE CHALEUR

France Chaleur Urbaine est un service public nouvellement mis en place par l'État, qui a pour but de mieux faire connaître les réseaux de chaleur afin d'accélérer les raccordements à ce mode de chauffage. C'est une des solutions de transition vers une énergie peu émettrice de gaz à effet de serre. Aujourd'hui, 2,4 millions d'équivalents-logements sont déjà raccordés et environ 5,6 millions de tonnes de CO_2 sont évitées chaque année grâce à l'utilisation de ces réseaux de chaleur. « *Malheureusement, pour se raccorder aux réseaux, le parcours reste complexe et long à aboutir. Avec France Chaleur Urbaine nous facilitons les relations entre propriétaires et gestionnaires des réseaux de chaleur, informons sur les démarches à accomplir et aides financières disponibles, et identifions les points de blocage afin de pouvoir contribuer à les lever. Aujourd'hui, des aides financières considérables existent pour se raccorder : le coût des travaux peut être très réduit et, une fois réalisés, ils permettent des économies au quotidien,* » affirme Florence Lévy, porteuse du projet France Chaleur Urbaine. Le raccordement aux réseaux de chaleur qui figure dans le plan de sobriété énergétique du gouvernement, est soutenu au titre du nouveau "Coup de pouce chauffage des bâtiments résidentiels collectifs et tertiaires". ■



UN GROUPEMENT DÉSIGNÉ POUR LA MODERNISATION DU PORT DE COTONOU, AU BÉNIN



© GROUPE EIFFAGE

4 ans de travaux seront nécessaires pour la transformation du port de Cotonou au Bénin.

Le contrat de conception-réalisation pour les travaux d'extension du bassin portuaire et de plusieurs quais ainsi que de rénovation des quais Nord du port de Cotonou au Bénin, a été signé à la fin du mois de juillet 2022.

Ainsi Eiffage Génie civil marine a remporté ce marché en groupement avec Spie Batignolles fondations et l'entreprise béninoise Adéoti. Eiffage est mandataire de ce marché pour un montant global de 160 M€, et devrait pour sa partie, réaliser 119 M€. La phase de conception a débuté en septembre 2022 et la partie réalisation interviendra 5 mois après. Ce chantier dans l'unique port du Bénin est prévu pour une durée totale de 48 mois.

→ Accueil de porte-conteneurs de grande capacité

Les travaux permettront de réaliser le renouvellement et l'approfondissement du quai Nord ainsi que son extension sur un linéaire de 216 mètres, la construction d'une rampe roll-on/roll-off, l'extension du quai Sud de 154 mètres et du bassin portuaire avec la création d'un talus en enrochement au fond de la darse. Toutes les structures seront draguées jusqu'à une profondeur de 15 à 16 mètres et seront mises en œuvre au moyen de murs en paroi moulée, réalisés à 30 m de profondeur.

L'objectif de ce chantier d'envergure est d'adapter les quais du port à l'accueil de porte-conteneurs de grande capacité, de type "Post Panamax". Ces géants des mers, dont les dimensions ne permettent pas de naviguer dans les écluses du canal de Panama (référence pour porte-conteneurs), pourront ainsi transporter jusqu'à 6 400 conteneurs d'une capacité de 30 à 33 m^3.

Sur la côte Atlantique, le port autonome de Cotonou constitue l'équipement névralgique du pays et la 3e infrastructure portuaire d'Afrique de l'Ouest. Le groupe Spie Batignolles est présent sur d'autres chantiers africains comme la réhabilitation du pont Houphouët-Boigny à Abidjan (Côte d'Ivoire). Et pour Eiffage Génie civil marine « *ce nouveau contrat consolide la position du groupe sur les grands projets portuaires complexes faisant notamment appel à des compétences pointues en génie civil maritime, dont plusieurs sont actuellement menés en Afrique, au Moyen-Orient et en Amérique du Sud.* » ■

VINCI CONSTRUCTION REMPORTE UN MARCHÉ D'EAU POTABLE EN OUGANDA

Sogea-Satom et Vinci Construction Grands Projets, filiales de Vinci Construction, ont été retenues pour la conception-construction d'infrastructures d'alimentation en eau potable dans le district de Mbarara, dans le sud-ouest de l'Ouganda, pour le compte de la société publique National Water and Sewage Corporation. Ce contrat de 73 M€ porte sur la construction d'une prise d'eau sur la rivière Kagera, d'une usine de traitement d'eau potable d'une capacité de 30 000 m^3 par jour, d'une station de surpression et la pose de 62 km de canalisations. Ces infrastructures permettront de fournir de l'eau potable à 200 000 habitants.

MARCHÉ ATTRIBUÉ POUR LA GESTION DES DÉBLAIS, LIGNE 15 EST DU GRAND PARIS EXPRESS

Eiffage, Sarpi (Veolia) et Cemex remportent en groupement le marché attribué par la Société du Grand Paris pour la Gestion et l'emploi des matériaux excavés (GEME) issus des travaux de construction de la Ligne 15 Est du Grand Paris Express. D'un montant de plus de 200 M€ pour une durée de 84 mois, ce contrat dont Eiffage est mandataire, concerne la réception, le traitement, le transport, la valorisation et l'élimination de 7,5 millions de tonnes de déblais excavés lors des travaux. Eiffage annonce « la valorisation de 99 % des terres excavées » *ainsi qu'un engagement* « sur le plan environnemental en privilégiant le transport fluvial des déblais à hauteur de 60 %. »

LE GROUPE HYDROCOP ACQUIERT CINQ CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES

Implanté principalement dans les Alpes, le Sud-Ouest et les Vosges, le groupe Hydrocop continue son développement par l'achat d'un parc de cinq centrales hydroélectriques dans la vallée du Lot. Possédant déjà trois centrales hydroélectriques dans le département du Lot à Cessac, Calvignac et Frontenac, Hydrocop détient désormais celles de Fumel (Lot-et-Garonne) ; d'Assier à Capdenac, de Moulin-du-Périé à Cahors, de Floiras à Prayssac (Lot) ; et de Sainte-Livrade à Moissac (Tarn-et-Garonne).

La puissance cumulée des centrales nouvellement acquises est de 14,6 MW, ce qui représentent un productible annuel de près de 63 GWh d'énergie. Situées au fil de l'eau, ces infrastructures produisent de l'électricité principalement en hiver. Avec cet investissement, Hydrocop devient de 4e hydroélectricien français avec 41 centrales en exploitation « *pour une puissance installée de 100 MW et un productible annuel de plus de 410 GWh,* » explique l'entreprise. Par cet investissement, le groupe est un acteur majeur des énergies renouvelables et locales de la vallée du Lot. ■

Centrale hydroélectrique de Floiras dans le Lot.

© ENVINERGY

MAMMOET CONSTRUIT DEUX VIADUCS PRÈS DE BILBAO AVEC UNE EMPREINTE MINIMALE

© MAMMOET

Première phase de construction pour la partie de la route "Supersur", dans la vallée de Bolintxu.

C'est une infrastructure importante pour la ville de Bilbao (Pays basque, Espagne) et toute sa périphérie. La nouvelle route "Supersur" doit permettre aux automobilistes de relier le port et le littoral tout en évitant de traverser la capitale régionale, dont le développement entraîne de nombreux embouteillages. Cette autoroute 2x2 voies, de 40 km de longueur est aujourd'hui complétement terminée. Mais la dernière partie de ce chantier s'est révélée délicate car située en zone protégée pour sa biodiversité. Le projet prévoyait la construction de 2 viaducs jumeaux s'étendant jusqu'à 162 m pour relier les tunnels routiers de chaque côté, mais avec une empreinte minimale pour chaque structure. La zone d'installation des infrastructures ne devait pas avoir des conséquences environnementales néfastes pour la vallée. Le maître d'ouvrage Interbiak et les consultants en ingénierie structurelle Arenas&Asociados ont considéré « *que nous devions explorer d'autres moyens qu'une approche conventionnelle.* » C'est ainsi qu'ils ont fait appel à l'entreprise Mammoet pour une solution appropriée.

→ Une opération historique

« *Éviter de perturber la rivière et le fond de la vallée signifiait que nous devions examiner comment une méthodologie d'arc pivotant pourrait être utilisée pour permettre la construction des ponts en abaissant un segment d'arc de chaque côté de la vallée. Bien que cette technique ait été utilisée au cours des dernières décennies, elle n'est pas courante. De plus, alors que des travées de pont similaires ont déjà été installées de cette manière, le poids de chaque section d'arche - jusqu'à 1 150 t - ne l'avait pas été. Nous étions donc confrontés à une opération historique dans tous les sens du terme pour garantir la mise en place des ponts de manière sûre et efficace.* » explique Veronica Arrayago, chef de projet Mammoet.

Chaque arche constituée de deux moitiés - une de chaque côté du ravin - a ainsi été abaissée et inclinée lentement pour se rencontrer au centre. Ces semi-arches ont été construites sur place, connectées à des câbles en acier, elles ont été ensuite déplacées via un vérin à torons. Montés sur des cadres en acier pivotants sur mesure, cet équipement de levage a été entièrement conçu, et fabriqué par l'entreprise Mammoet. « *Nous possédons des vérins à torons de 1 250 t, qui sont les plus grands au monde. Ils se sont avérés indispensables pour le projet Bolintxu car ils nous ont permis d'en utiliser moins pour chaque arc, réduisant ainsi le temps et les coûts pour le client et tirant le meilleur parti de l'espace très limité sur le site.* » a précisé la chef de projet. Chaque pont a pris entre deux et trois jours pour être installé. Ce nouvel itinéraire "Supersur" qui doit désengorger Bilbao, est maintenant en fonctionnement. C'est un axe de circulation important pout toute cette région du Pays basque. ■

© MAMMOET

Installation finale des deux moitiés de l'arche du viaduc.

CHANTIER EXPRESS SUR DES CANALISATIONS D'EAU, À PUTEAUX

Sénéo, producteur et distributeur d'eau potable vient de terminer une étape importante du chantier des Bergères à Puteaux, dans le secteur de la Défense. Le projet de sécurisation et de modernisation d'une partie du réseau d'acheminement de l'eau sur le secteur Nord-Seine pouvait se révéler complexe sur un axe de circulation important, traversé par la départementale D913, qui relie La Défense à Rueil-Malmaison. 630 m de canalisations de 800 mm de diamètre et datant de 1941, sont désormais conformes aux normes du 21e siècle. Certains tronçons ont dû être remplacés. Après une phase de préparation en avril et mai 2022, le chantier a été lancé le 7 juin dernier pour une durée de six semaines. L'investissement représente plus de 3 M€. Malgré de nombreuses contraintes et contretemps (pénuries de matériaux, un calendrier remis en cause par le passage du Tour de France, un secteur sous-terrain très encombré par les divers réseaux ...), les travaux sur le rond-point des Bergères ont été livrés le 1er septembre dernier. « Sur site, cinquante personnes, au lieu de 12 à 15 pour un chantier de même ampleur, ont travaillé sans relâche, 6 jours sur 7. L'ensemble des intervenants a fait preuve d'un engagement et d'un professionnalisme sans faille, » *s'est réjoui Florent Casy, directeur général de Sénéo.*

© SÉNÉO

630 mètres de canalisations de 800 mm de diamètre et datant de 1941 ont été modernisés.

DES LUMINAIRES ADAPTÉS AUX INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

Le fabricant de luminaires Sécurlite propose des solutions d'éclairage spécifiques pour les transports et les leurs infrastructures tels que les parkings, passerelles extérieures, quais couverts ou extérieurs. Ils doivent répondre aux contraintes diverses présentes dans ces lieux : l'eau, l'humidité, les températures extrêmes et les risques de choc ou de vandalisme. C'est ainsi qu'ils sont étanches, résistants aux chocs mécaniques, aux huiles et aux hydrocarbures. Ces nouveaux luminaires LED revendiquent une haute performance énergétique avec des durées de vie supérieures à 100 000 h.
La gestion de la lumière peut être optimisée grâce des modes de détection et des systèmes de commande intégrés. Recyclés et recyclables, les luminaires LED Sécurlite sont évolutifs grâce à leurs composants démontables et réparables sur site ou en usine.

UNE NOUVELLE SOLUTION ANTI-CORROSION POUR LES MÉTAUX

Dans les métiers du bâtiment et des travaux publics, les protections anticorrosion sont appliquées aux infrastructures métalliques. ITW Spraytec a travaillé sur une solution de protection plus poussée permettant d'obtenir plus de brillance et une meilleure protection des métaux. Sous le nom de Galva Flash Ultra, ce revêtement de protection, dans sa nouvelle version, est délivré en aérosol. Elle est constituée d'aluminium pelliculant, d'additifs anticorrosion et de résines synthétiques en dispersion dans un mélange de solvants. Une fois appliqué, ce revêtement se présente sous forme d'un film lisse, flexible et uniforme. Il résiste sans altération jusqu'à 400°C.

DES COMPTEURS D'EAU NOUVELLE GÉNÉRATION, À ULTRASONS

Itron lance une nouvelle génération de compteurs d'eau à ultrasons, une solution intelligente de gestion de l'eau, appelée Intelis wSource. Avec un niveau de précision très élevé et des fonctionnalités qui améliorent la visibilité sur le réseau de distribution, cette innovation a pour but de limiter les pertes et de réduire les erreurs de facturation.
Effectuant des mesures à bas débit, ces nouveaux compteurs ont accès à des données extrêmement fines de consommation d'eau et à des alarmes en cas de fuites et de fraudes. Ils relèvent les tendances de consommation qui peuvent engendrer des recommandations pour la préservation de l'eau.

→ Mesures fiables et performantes

Les technologies employées de relevé automatique du compteur, AMR (Automatic Meter Reading) et AMI (Advanced Metering Infrastructure), intègrent des fonctions réseau qui facilite son déploiement avec divers systèmes de communication. Les mesures restent fiables et performantes sous des températures extrêmes et en présence d'une arrivée d'eau intermittente. Particulièrement étanche, ce compteur nouvelle génération peut être posé dans des regards inondés. Par ailleurs, il bénéficie d'une autonomie de batterie dont la durée de vie est prévue pour 20 ans de service. Il est doté d'alarmes signalant les reflux ou le gel de canalisations. « *Intelis wSource change la donne en matière de précision des compteurs, y compris dans les conditions les plus difficiles. Sa conception robuste se justifie par la nécessité d'une facturation juste en toutes circonstances,* » a affirmé Justin Patrick, vice-président Device Solutions chez Itron. Les premières livraisons de ces compteurs interviendront au début de l'année 2023. ■

© ITRON

Les compteurs Intelis wSource sont conçus pour durer une vingtaine d'années.

URBAN RADAR REÇOIT LE LABEL GREENTECH INNOVATION

L'Urban Radar est une plateforme cloud qui aide les collectivités à gérer de façon optimisée l'espace public et en particulier les trottoirs et toute la logistique urbaine. Cette startup fondée en 2019 propose trois solutions pour observer les tendances et accompagner la prise de décisions des urbanistes, basée sur l'analyse de données. Ces innovations doivent ainsi permettre de répondre aux besoins des citoyens en créant un territoire de proximité. Elles contribuent aussi à comprendre les mouvements des marchandises des zones d'activités logistiques périurbaines et révèlent ainsi l'utilisation qui est faite des trottoirs pour percevoir les opportunités d'amélioration. Cette plateforme de données SaaS aide les villes à réguler leur mobilité. En effet, elle donne accès à de nombreuses informations qui permettent de comprendre les différents flux pour ensuite pour atténuer leur impact sur la congestion et la qualité de l'air.

→ 45 lauréats en 2022

Cette technologie développée par Urban Radar a reçu le label "Greentech Innovation", porté par le ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. Celui-ci récompense les startups et PME françaises porteuses de solutions capables d'accélérer la transition écologique.
En 2022, 45 lauréats ayant répondu à l'appel à manifestation d'intérêt ont reçu ce label dans des domaines aussi divers que la biodiversité, la santé-environnement, les énergies renouvelables et décarbonées, la mobilité durable, l'économie circulaire, le numérique éco-responsable, la gestion des risques, la ville durable, l'alimentation et l'agriculture, la finance durable, l'innovation maritime, et la décarbonation de l'industrie. Dans la liste des lauréats, on peut aussi noter que l'entreprise Acwa qui a développé les solutions robotiques autonomes pour aider les services de l'eau à améliorer la condition des réseaux d'eau potable et prévenir les pertes occasionnées par les fuites. NXSTEP, propose une nouvelle technologie "de bio-remédiation micro-algale" dans le traitement des eaux usées et « *prône une valorisation complète de tous les produits de l'épuration sans augmentation des coûts d'exploitation.* » ■

Digitalisation des activités
Travail collaboratif
Partage des données

Bienvenue dans un monde qui se construit autrement.

L'univers de la construction se transforme. SMABTP adapte ses solutions d'assurance pour mieux vous accompagner. Avançons ensemble.

Notre métier : assurer le vôtre.

www.groupe-sma.fr

SMABTP – Société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics.
Société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances
RCS PARIS 775 684 764 – 8 rue Louis Armand – CS 71201 – 75738 PARIS CEDEX 15

SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

1er assureur de la construction

SÉCURISATION ET OPTIMISATION DU CARBURANT DES VÉHICULES DE CHANTIER

Les véhicules de chantier consomment en moyenne 3600 litres de carburant par an. L'entreprise Optimum automative a développé une solution pour sécuriser leurs réservoirs et pour optimiser leur consommation d'énergie. Un capteur "Sécurifuel" est installé sur le réservoir de tous types d'engins de travaux publics, quel que soit leur année de mise en service. Une sonde mesure en permanence le niveau de carburant. En cas de baisse brutale de celui-ci, une alarme sonore se déclenche (pour faire fuir les potentiels voleurs) et le conducteur ou gestionnaire de ces véhicules est immédiatement prévenu par message.

→ Manager les besoins en essence

En suivant en temps réel les niveaux de carburant, la plateforme Sécurifuel offre une analyse détaillée des consommations par véhicule. En période de forte inflation des prix des carburants, cela permettra aux gestionnaires de flotte de manager de façon précise les besoins en essence par trajet. L'optimisation consiste à ce que les réservoirs des véhicules ne soient pas inutilement remplis. « L'ADN d'Optimum Automotive basé, sur l'innovation, nous a conduits à nous pencher sur les problématiques récurrentes de nos clients. Ils vont pouvoir limiter les pertes sèches liées aux vols de carburant, et optimiser de façon sensible les consommations. Ce phénomène étant mondial, cette solution sera déployée en Europe, Afrique et Amérique du sud, *» s'est félicité Daniel Vassallucci, CEO d'Optimum Automotive.*

CALCULER L'IMPACT DES EAUX PLUVIALES ROUTIÈRES SUR LES COURS D'EAU

© DÉPARTEMENT DE LA MOSELLE

Les tests ont été réalisés dans le ruisseau de Veymerange, à proximité de Thionville.

Afin de préserver la qualité de l'écosystème aquatique, le Cerema s'est penché sur l'impact sur les cours d'eau, des eaux pluviales se déversant sur les infrastructures routières. Car, en ruisselant, les pluies se chargent potentiellement d'hydrocarbures et de nombreux éléments chimiques issus des différents matériaux de la chaussée, des véhicules et des équipements.

L'étude porte sur la pollution chronique liée à l'infrastructure et au trafic mais aussi au salage des routes en hiver et à l'utilisation d'herbicides. Définir les différents impacts sur les rivières et autres fleuves s'est avéré complexe car difficile à appréhender. Car les contaminations peuvent être intermittentes (selon qu'il pleuve ou non) et leur nature toxique peut avoir un effet immédiat ou sur le long terme. Certains effets peuvent aussi être combinés. De plus, la capacité de résilience du milieu récepteur en rapport avec la fréquence des rejets brouille aussi les cartes.

→ Baisse importante de l'abondance des espèces

L'identification des macro-invertébrés aquatiques semble être un mécanisme pertinent pour rendre compte de cette pollution. Pour étudier ces phénomènes, le Cerema a réalisé quatre campagnes de mesures, le long de l'A31, près de Thionville (avec un trafic allant jusqu'à 75 000 véhicules par jour) se rejetant dans le ruisseau du Veymerange. Ces investigations ont été menées au printemps quand le cours d'eau est à son débit maximum et en été quand il est au plus bas.

Trois stations de prélèvements ont été sélectionnées, en amont du rejet, en aval proche (120 m) et en aval éloigné (300 m). À ce stade, l'établissement public a élaboré une méthode de collecte et d'exploitation des listes de macro-invertébrés, qui a permis de mettre en évidence de manière certaine, un impact des eaux pluviales routières de l'A31 sur le cours d'eau.

Les résultats de ces analyses ont montré un écart significatif par rapport à la station de référence qui est sans perturbation anthropique connue. Elles ont mis en avant une baisse importante de l'abondance des espèces présentes les plus sensibles à la pollution. Dans la station aval éloignée et avec courant rapide, cette diminution a été évaluée à 86 %, en avril 2021. ■

NOUVELLES INNOVATIONS POUR LE TRAITEMENT DE L'EAU

Intervenant sur l'ensemble du cycle de l'eau, le groupe Aco propose des solutions pour le drainage, le traitement de l'eau, sa régulation et son infiltration contrôlée. Il a dernièrement dévoilé trois innovations. La première qui porte sur un décanteur hydrodynamique (ACO V-Septor) destiné à piéger les polluants contenus dans les eaux de ruissellement. De nouveaux séparateurs d'hydrocarbures (Oleocido-P) ont été conçus en cas de pollution de l'eau due aux stations-service, aires de lavage, parkings, routes ou zones industrielles, portuaires et aéroportuaires. Cette innovation permet de traiter les eaux de ruissellement pour qu'aucune substance nocive ne soit déversée dans les réseaux d'eaux pluviales ou les noues d'infiltration. Et enfin, une nouvelle gamme de limiteurs de débit (ACO Q-Brake) permet de réguler les eaux pluviales avant qu'elles ne se déversent dans les cours d'eau ou dans les réseaux. Un regard est mis en place en aval des bassins de stockage enterrés. Cette solution a été étudiée pour garantir des débits allant de 0,5 à 15 litres/seconde. ■

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

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

• DU 13 OCTOBRE 2022 AU 25 JUIN 2023
Le musée d'histoire urbaine et sociale de Suresnes organise une exposition "Les Jardins du Grand Paris, aux sources de la nature en ville." Elle retrace l'histoire de la nature en ville et se saisit des enjeux contemporains de leur végétalisation
Lieu : Suresnes

FORMATIONS

• 5 AU 8 DÉCEMBRE
Conception et dimensionnement des ouvrages hydrauliques d'infrastructures linéaires
Lieu : Paris
https://formation-continue.enpc.fr

• 6 ET 7 DÉCEMBRE
Chantiers furtifs ! Comment améliorer l'acceptabilité des Chantiers et Projets Interurbains
Lieu : Paris
https://formation-continue.enpc.fr

• 7 AU 9 DÉCEMBRE
Gestion de patrimoine d'infrastructures : Présentation des enjeux, des méthodes et des responsabilités
Lieu : Paris
https://formation-continue.enpc.fr

• 12 AU 14 DÉCEMBRE
Eurocode 8 ouvrages d'art : calcul des structures pour leur résistance aux séismes
Lieu : Paris
https://formation-continue.enpc.fr

• 15 ET 16 MARS 2023
S'initier aux procédures et études pour la conduite des projets d'infrastructures des transports
Lieu : Paris
https://formation-continue.enpc.fr

• 15 AU 17 MARS 2023
Dimensionnement et réalisation des ouvrages de soutènement
Lieu : Paris
https://formation-continue.enpc.fr

NOMINATIONS

BOUYGUES CONSTRUCTION
Philippe Jouy a été nommé directeur général adjoint de Bouygues construction, en charge de Bouygues bâtiment France.

ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES
Anthony Briant est le nouveau directeur de l'École nationale des ponts et chaussées.
Il succède à Sophie Mougard qui était en poste depuis 2017.

IDDRIM
Jean Dubois a pris les fonctions de responsable des affaires techniques en remplacement de Patrick Porru.

RATP
Jean Castex, ancien Premier Ministre et président du conseil d'administration de l'Agence de financements des infrastructures de transports en France, a été nommé Président directeur général de la RATP.
Il succède à Catherine Guillouard qui a démissionné le 30 septembre 2022 pour des raisons familiales.

VÉOLIA
Alexandre Lagny est désormais directeur régional de Veolia Hauts-de-France.
Il succède à Aurélie Lapidus, nommée à la direction financière de Veolia Water Technologies.

AFPS
RISQUES SISMIQUES :
PRÉVENIR, OBSERVER ET GÉRER L'AVENIR

L'étude des tremblements de terre, celle de leurs conséquences sur le sol, sur les constructions et sur leur environnement, la recherche et la promotion de toutes mesures tendant à minimiser ces conséquences et à protéger les vies humaines. Tel est l'objet et telles sont les missions de l'Association Française de Génie Parasismique (AFPS). Benjamin Richard est Chef du Laboratoire de Modélisation et d'Analyse de la Performances des Structures (LMAPS) à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). Il est également Président du Comité Scientifique et Technique de l'Association Française de Génie Parasismique (AFPS) depuis 2018. C'est à ce titre qu'il intervient dans ce numéro "sols et fondations" de *Travaux* pour présenter quelques-unes des missions initiées par l'AFPS dans le cadre de la gestion des risques sismiques. Entretien avec Benjamin Richard, Président du Comité Scientifique et Technique de l'AFPS. PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON

1- Benjamin Richard, Président du Comité Scientifique et Technique de l'AFPS.

Quelles sont les origines de l'AFPS et quelles sont ses missions ?

L'Association Française du Génie Parasismique (AFPS) est une société savante (association loi de 1901) fondée le 14 décembre 1983 à l'initiative de Jean Despeyroux.

Elle a pour objet l'étude des tremblements de terre, celle de leurs conséquences sur le sol, sur les constructions et sur leur environnement, et la recherche et la promotion de toutes mesures tendant à minimiser ces conséquences et à protéger les vies humaines. Elle regroupe l'ensemble des professionnels du domaine, quel que soit leur organisme de rattachement : architectes, ingénieurs structures, sismologues, bureaux de contrôle, assureurs, gestionnaires de crise...

Toutes les questions techniques que l'on peut se poser en termes d'interprétation de la réglementation ou de formulation de recommandations lorsque c'est nécessaire, donnent lieu à des échanges lors des séances plénières du Comité Scientifique et Technique (CST).

Dans la plupart des cas, des consensus techniques émergent à la suite de quoi le comité rédige des propositions de recommandations qu'il soumet à l'instance décisionnelle de l'association, c'est-à-dire son conseil d'administration. Lorsque ce dernier a validé ces

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © EDUARDO ROBANA

2

BENJAMIN RICHARD : **PARCOURS**

Benjamin Richard est ingénieur de l'INSA de Rennes (2007). En parallèle, lors de cette formation, il réalise plusieurs stages sur chantiers ainsi que dans des laboratoires de recherche en génie civil, ce qui va contribuer à orienter sa carrière ultérieure.

En dernière année, il postule pour réaliser un master de recherche au sein de l'université de Rennes 1, orientée méthodes numériques avancées en génie civil (2006-2007).

Dans ce cadre, il effectue son stage de fin de master au Laboratoire des Ponts et Chaussées (LCPC) au cours duquel il lui est proposé un thème sur la fiabilité dans le domaine des ouvrages d'art ainsi que la réalisation d'une thèse orientée principalement sur la mise en place d'une méthodologie de gestion et d'optimisation de la maintenance des réseaux d'ouvrages d'art atteints de corrosion. Ses travaux portent notamment sur l'élaboration d'une technique visant à simuler dans le temps la propagation de la corrosion (2007-2010) dans les structures en béton armé.

Dans l'attente du traitement d'un dossier de candidature au CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives), il rejoint en 2010 l'École Normale Supérieure de Cachan (devenue depuis École Normale Supérieure Paris-Saclay) en qualité de postdoctorant, avec une mission portant globalement sur le développement de modèles de fissuration de béton sous chargement sismique.

À l'issue de ce postdoctorat, il intègre de 2011 à 2018, au sein du CEA Paris-Saclay, le laboratoire d'études de mécanique sismique qui exploite en particulier la plateforme d'essais sismiques Tamaris avec deux types d'activité.

Entre 2011 et 2014, Benjamin Richard se centre sur le développement de codes de calculs dédiés à la simulation du comportement sismique des structures en béton armé.

À partir de 2014, il pilote des campagnes expérimentales d'essais sismiques sur tables vibrantes ce qui lui fournit l'opportunité, accompagné par ses anciens collègues ingénieurs d'essais, de spécifier les essais à réaliser (grandeur physique, emplacement des capteurs, interprétation de résultats...).

Il pilote notamment la campagne d'expérimentation SMART 2013, co-financée par EDF, à l'issue de laquelle est organisé un "benchmark" rassemblant une quarantaine d'équipes provenant du monde entier. Ce qui a permis d'identifier les meilleurs pratiques de simulation et de modélisation de ce type de structure sous chargement sismique.

En 2016, il soutient son habilitation à diriger des recherches (HDR) et en 2018, il a la chance, comme il le dit lui-même, de rejoindre l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), en pleine phase de réorganisation de son activité de recherche en génie civil, avec le projet de création d'une unité spécialisée dans ce domaine autour de deux thèmes principaux de R&D : d'une part, le comportement d'ouvrages et d'équipements sous chargements extrêmes, en particulier sismique, d'autre part, la prédiction des conséquences mécaniques du temps, c'est-à-dire du vieillissement, sur les ouvrages en béton et béton armé.

Depuis 2018, Benjamin Richard est chef du Laboratoire de Modélisation et d'Analyse de la Performance des Structures de l'IRSN.

Il convient d'ajouter que, parallèlement, il est impliqué depuis 2011 dans l'AFPS (Association Française du Génie Parasismique) avec une prise de responsabilité croissante au sein de l'association qui l'amène à devenir en 2018 Président du Comité Scientifique et Technique de l'AFPS.

Benjamin Richard est également enseignant à l'École Normale Supérieure Paris Saclay. Il enseigne le cours intitulé "conception parasismique des structures en béton armé et en acier" aux étudiants de master.

Depuis 2018, il a été auteur ou co-auteur de plus de 31 articles publiés dans des revues internationales à comité de lecture et de plus de 34 articles présentés dans des actes de congrès internationaux.

propositions et qu'il considère qu'elles peuvent être diffusées largement, elles sont mises sous la forme d'un "cahier technique" et rendues publiques sur le site web de l'AFPS.

Le spectre thématique de l'AFPS ne se limite pas aux fondations et aux inclusions rigides. Il s'intéresse également, par exemple, à des mesures de réduction de la vulnérabilité sismique d'ouvrages construits avec des techniques utilisées uniquement dans certaines régions de France. C'est le cas, par exemple, des Antilles, qui sont les régions les plus sismiques de France (zone de sismicité 5). L'arc des petites Antilles se situe à l'aplomb d'une zone de convergence des plaques tectoniques Nord et Sud-américaines avec la plaque Caraïbe, les premières s'enfonçant sous la seconde par le phénomène de subduction. Ses mouvements engendrent des déformations et donc des séismes et du volcanisme dans la région.

Pour ces régions - Martinique et Guadeloupe - les problématiques de fondations de génie civil sont complètement différentes de ce que l'on peut rencontrer classiquement dans le domaine du génie civil. Par contre, il existe des recommandations, souvent basées sur le bon sens, ce qui n'exclut pas qu'il faille avoir la connaissance de ce qu'il faut faire ou ne pas faire pour rendre les ouvrages parasismiques. L'un des rôles de l'AFPS est de produire des guides à destination non seulement des propriétaires des constructions mais également des professionnels de la construction. Ces guides n'ont pas de valeur légale mais, dans la pratique, ils sont très utilisés parce qu'ils permettent de sensibiliser les habitants et les constructeurs aux bonnes pratiques de ▷

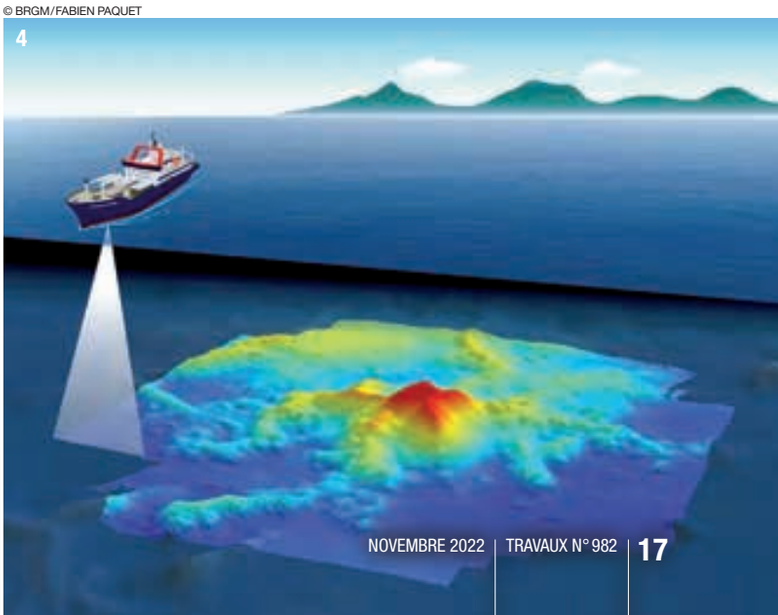
2- Le volcan Cumbre Vieja situé sur l'île de La Palma, aux Canaries, est entré en éruption le dimanche 19 septembre 2021.

3- Partie Sud de l'île de Mayotte.

4- À Mayotte, Illustration de l'acquisition bathymétrique au sondeur multifaisceaux par le Marion Dufresne II, au-dessus du nouveau volcan.

© A HREF

© BRGM/FABIEN PAQUET



Séisme du 29 avril 1897 à la Guadeloupe

« Le Courrier de la Guadeloupe n'a pas pu paraître vendredi dernier parce que son imprimerie a été à moitié détruite par un tremblement de terre. » C'est en ces termes que le dit journal annonce, dans son édition du 4 mai 1897, sa réparation, priant ses lecteurs de bien vouloir l'excuser de ce « retard ».

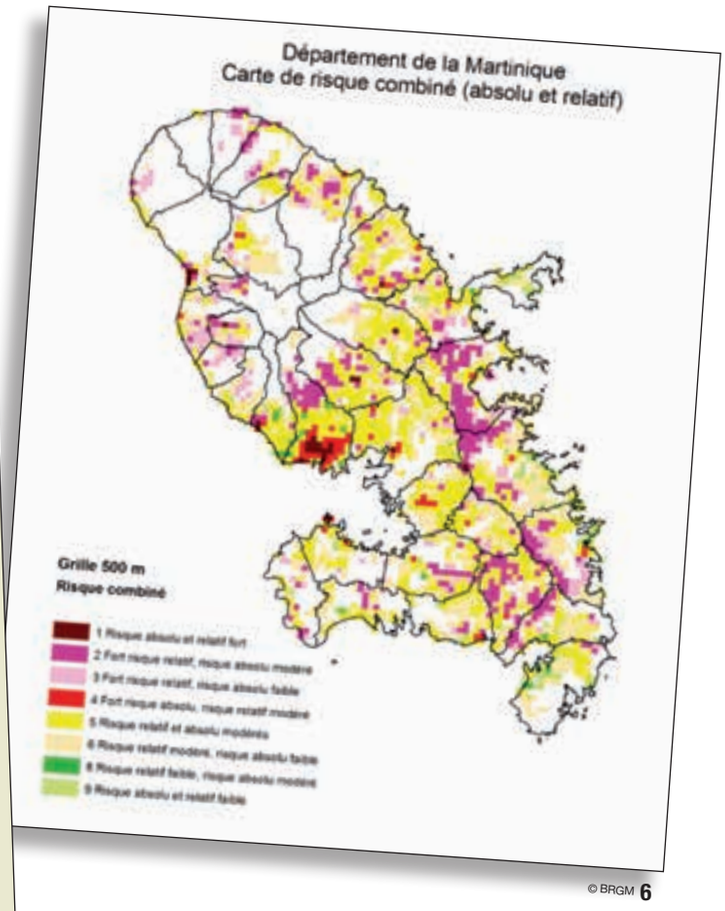
Encore un tremblement de terre destructeur aux Antilles. Un de plus serait-on tenté de dire. Une cinquantaine d'années après la catastrophe du 8 février 1843 où un millier de personnes perdirent la vie, principalement à Pointe-à-Pitre, voici que s'annonce à la Guadeloupe une journée « noire », noire par le malheur, la ruine et le deuil : le jeudi 29 avril 1897.

Ce jour-là, le temps est superbe et la température très chaude. Tout le monde est à son travail. Subitement, à 10h20 du matin, une forte détonation comparable à celle d'un coup de canon accompagné d'un grondement souterrain est entendue par la population pointoise. Ce bruit n'est pas encore atténué qu'une violente secousse ébranle le sol. Pendant une durée de dix à douze secondes, la terre se met à trembler, d'abord dans un mouvement de trépidation puis dans un mouvement d'ondulation. On croit que c'est la fin de tout tant l'agitation apparaît furieuse : les maisons sont secouées « d'une façon effrénée et bondissent comme des êtres vivants ».

Bien des années plus tard, une personne, alors enfant, se souvient : « Le 29 avril 1897, à 10 heures du matin, une terrible secousse de tremblement de terre causa de graves dégâts à la Guadeloupe et surtout à la Pointe-à-Pitre, où la plus grande partie des maisons de la ville s'effondrèrent. Nous étions, mes sœurs et moi, en visite chez une amie de ma mère. Je me souviens qu'entre devant une armoire à glace qui menaçait de m'écraser tant elle était bellotée, je me jetai à genoux, et demeurai là, immobile par terre sans oser bouger. Dès que ce fut possible, à travers les ruines qui encombraient les rues, nous rentrâmes à la maison où, dans une grande émotion, nous rejoignîmes mon père qui avait pu venir pour retrouver. Dieu merci, sains et saufs, ma mère chez nous. Les mois qui suivirent furent bien pénibles. La terre tremblait sans cesse. Il fallut se camper dans les étages inférieurs des maisons et vivre là dans l'angoisse d'une catastrophe. Dure épreuve pour des nerfs d'enfant. »

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

© DR 5



© BRGM 6

construction pour rendre plus résilientes et moins vulnérables les habitations aux séismes.

Une réflexion dans ce domaine est également en cours pour l'île de Mayotte, au nord de Madagascar, dans l'océan Indien.

Dans une moindre mesure, l'AFPS s'intéresse également au traitement de constructions historiques dans les régions de Grenoble et de Nice, ainsi que dans les Pyrénées orientales, reconnues comme les plus sismiques en France métropolitaine mais dans lesquelles le risque est moins élevé qu'aux Antilles.

Dans ces régions, s'agissant de plus de bâti historique classé, l'objectif étant de minimiser les victimes en cas de séisme, la stratégie repose le plus souvent sur des actions de prévention : en cas de séisme, enseigner les bons réflexes et appliquer la méthodologie appropriée de post-crise, dans les heures qui suivent le séisme.

Dans ce cas, l'AFPS peut être saisie par les préfectures concernées pour mettre en œuvre un dispositif d'urgence de gestion de crise. Ce dispositif a fait l'objet d'un certain nombre d'exercices et, en particulier, nous avons eu l'occasion de le mettre en œuvre, en vraie grandeur, lorsqu'est survenu le séisme du Teil, dans le sud de la France, le 11 novembre 2019 à 12h30. Plus de 600 bâtiments ont ainsi été inspectés avec l'objectif de les classer en catégorie vert : les habitants peuvent rentrer - orange : attente d'un diagnostic complémentaire - rouge : on ne rentre pas chez soi.

5- Témoignage du séisme du 29 avril 1897 à la Guadeloupe.

6- Carte de risque sismique combiné du département de la Martinique.

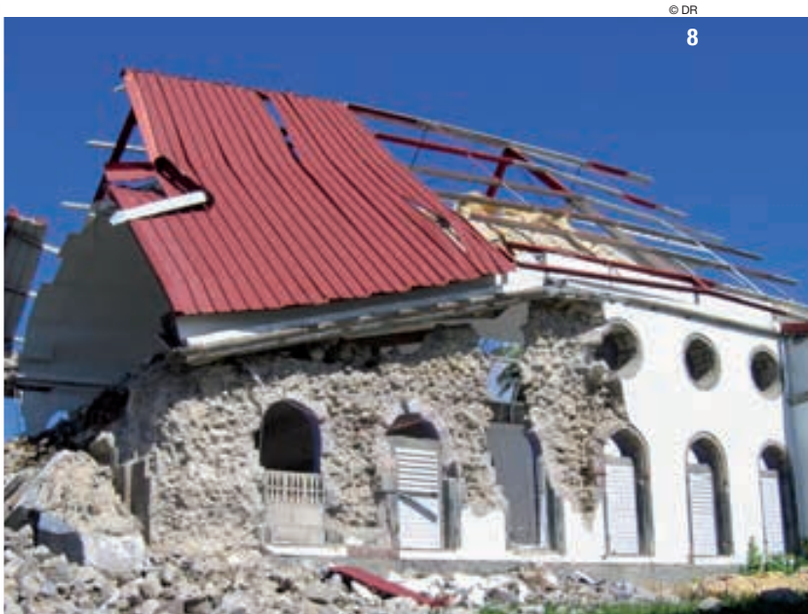
7- Il y a 120 ans, le 8 mai 1902, la Montagne Pelée, en Martinique, connaissait une violente explosion suivie d'une nuée ardente qui tua en quelques minutes près de 28 000 personnes.

8- Église de Terre-de-Bas après le séisme du 21 novembre 2004 à Saintes (Guadeloupe).

© OVSM

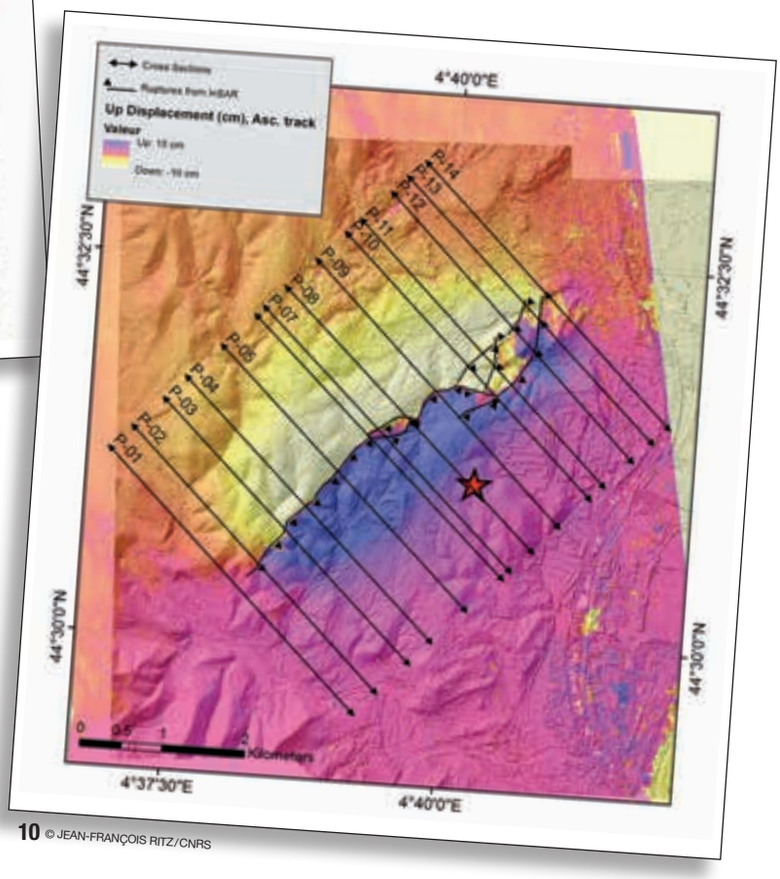
7

© DR



8

9 © CNRS/INSAR



10 © JEAN-FRANÇOIS RITZ/CNRS

Ce séisme de magnitude 5 s'est produit aux environs du Teil, en Ardèche. L'occurrence d'un séisme d'une telle magnitude en France métropolitaine, à si faible profondeur, associé à un nombre particulièrement faible de répliques, en font un séisme aux caractéristiques assez atypiques. C'est d'ailleurs ce qui a motivé le CNRS à former un comité d'experts afin d'étudier ce phénomène et ses origines. À cette date, il n'y a pas encore de consensus clair sur les raisons qui ont déclenché cet événement si singulier.

Dans une telle occurrence, quelle intervention peut être réalisée au niveau des bâtiments surtout lorsqu'ils sont anciens ?

Il est rare qu'il puisse être réalisé du renforcement préventif. Par contre, une fois que le séisme a causé des dommages, des désordres sur du bâti ancien, il existe des techniques pour le remettre en état afin qu'il se rapproche le plus de sa version initiale. Après un séisme, un bâtiment ancien n'est pas totalement détruit, des actions de confortement peuvent être mises en œuvre consistant à s'assurer qu'après le choc principal du séisme le bâtiment soit stabilisé. Sachant que le choc du séisme est toujours suivi de plusieurs centaines de répliques sismiques qui sont susceptibles, sans confortement du bâti ancien, de causer des dommages supplémentaires.

9- Contexte géologique du Teil. Certaines failles sont indiquées en noir. La zone de rupture détectée par InSAR est la ligne magenta.

10- Déplacement du sol cartographié par la technique InSAR, utilisant l'imagerie satellite radar dans la région du Teil. L'étoile désigne l'épicentre.

11- Le 11 novembre 2019, un séisme de magnitude 5 a frappé le village du Teil et ses environs, en Ardèche, générant une rupture et un déplacement inattendus de la surface du sol.

12- Cartographie de plis et fissures affectant une route après un séisme aux environs du Teil à l'aide d'un scanner laser.

Pour en revenir à Mayotte, que s'est-il produit précisément ?

Depuis mai 2018, Mayotte a connu une succession d'épisodes sismiques et une importante mobilisation interministérielle et scientifique a été mise en place pour comprendre ce phénomène nouveau et mettre en place les mesures d'anticipation adaptées.

La naissance de l'édifice volcanique sous-marin a été découverte lors d'une mission de recherche océanographique en mai 2019, à bord du Marion Dufresne.

Cette mission faisait suite à un nombre conséquent de séismes ressentis sur l'île depuis 2018. ▷

© BRGM

11

© JEAN-FRANÇOIS RITZ/CNRS

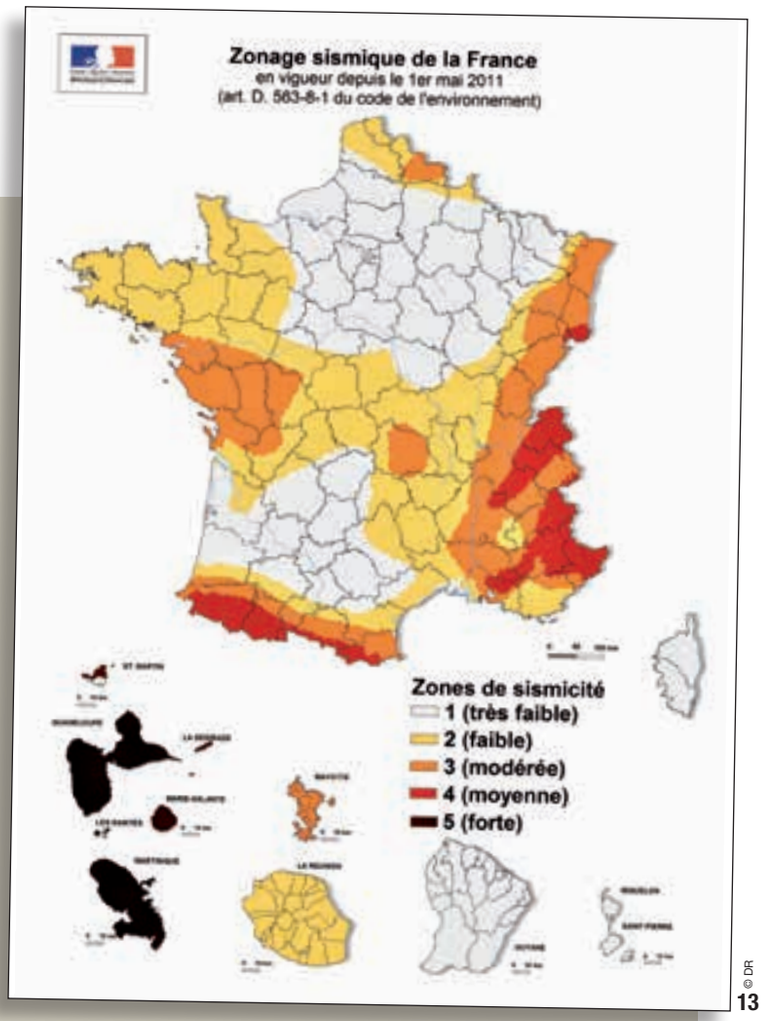
12

L'AFPS EN BREF EN BREF

L'Association Française du Génie Parasismique (AFPS) est une association (loi 1901) fondée le 14 décembre 1983. Elle a pour objet l'étude des tremblements de terre, celle de leurs conséquences sur le sol, sur les constructions et sur leur environnement, la recherche et la promotion de toutes mesures tendant à minimiser ces conséquences et à protéger les vies humaines. Elle compte plus de 750 membres dans 26 pays, venus d'horizons professionnels divers (grands groupes, administration, bureaux d'études et de contrôle, grandes écoles et universités, ...) et aux spécialités variées (ingénieurs, géophysiciens, architectes, spécialistes de la gestion de crise, sociologues, ...). Les 32 membres collectifs représentent aussi bien l'État (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM), IRSN, CEA...) que des grands groupes (EDF, Vinci, AXA, ...) et de nombreux bureaux d'études ou de contrôle.

L'AFPS a reçu dès sa création le soutien de l'État, qui a demandé l'avis de ses experts sur l'état de l'art de la connaissance scientifique des séismes et de leurs conséquences, sur les moyens de s'en protéger notamment au travers de la réglementation parasismique.

L'AFPS est à ce titre régulièrement consultée par le MEEDDM, dans le cadre de l'évolution de la réglementation pour le bâtiment conventionnel et le risque spécial. Les principales activités de l'association sont : le partage et la capitalisation des connaissances au sein de groupes de travail en vue de leur diffusion au travers notamment de guides techniques, la diffusion des bonnes pratiques, la formation, la participation à des programmes de recherche, la coopération internationale via la participation à des congrès et le retour d'expérience sur séismes majeurs.



© DR

13

Le nouveau volcan est situé à 3500 m de profondeur. Sa taille actuelle est évaluée à 800 m de hauteur avec une base de 4 à 5 km de diamètre. Le panache de fluides volcaniques de 2 km de hauteur n'atteint pas la surface de l'eau. Les émanations de gaz constatées sur le littoral de Petite-Terre par la population sont, selon la mission, un signe habituel rencontré dans ce type d'activité volcanique et feront l'objet d'études spécifiques.

Dès juin 2018, le gouvernement a en effet pris l'initiative de lancer une mission scientifique impliquant notamment la campagne océanographique réalisée par le navire Marion Dufresne (de retour à quai à Mayotte le 15 mai 2019) qui permet aujourd'hui d'apporter des éclaircissements majeurs sur ces épisodes.

L'AFPS travaille-t-elle à définir des types de construction qui soient résilientes aux catastrophes naturelles ?

Selon son organisation, l'AFPS gère plusieurs groupes de travail thématiques rattachés au Comité Scientifique et Technique.

L'un d'entre eux, intitulé groupe de travail "multirisques" vise à identifier les dispositions constructives communes qui permettent de rendre les constructions, d'une part, moins vulnérables aux séismes et, d'autre part, moins vulnérables aux cyclones.

L'enjeu de ce groupe de travail est carrément économique. Une disposition constructive peut ainsi permettre de réduire les vulnérabilités tant aux séismes qu'aux cyclones tandis qu'un autre type de disposition peut rendre les constructions plus résilientes aux séismes mais moins résistantes aux cyclones et vice-versa. L'objectif de ce groupe de travail qui a démarré récemment va être de définir des dispositions constructives à mettre en œuvre sur les structures neuves ou existantes pour les rendre plus résilientes tant aux séismes qu'aux cyclones.

L'AFPS est-elle impliquée dans d'autres domaines directement ou indirectement liés aux mouvements sismiques ?

Récemment, l'AFPS a été sollicitée par France Chimie[1], un collectif d'in-

© MENARD

14

dustriels exploitant des installations non nucléaires classées ICPE[2] pour émettre un certain nombre de guides méthodologiques qui visaient, pour la partie Génie Civil, c'est-à-dire "structures support", à évaluer ce que l'on appelle des "spectres transférés".

En présence d'un séisme, par exemple, le sol se met en mouvement, les mouvements sont transférés à tous les étages du bâtiment et, à un étage donné, un équipement lourd - une pompe, par exemple - peut être affecté par ces mouvements.

Être capable d'estimer ces mouvements sismiques transférés depuis les fondations vers les étages est tout à fait crucial pour prévenir tout incident ou accident sur l'ouvrage concerné. L'AFPS est en charge de recommander les méthodes qui, à son sens, sont les plus appropriées.

En effet, la détermination et le contrôle du mouvement sismique transféré vers les composants d'une installation industrielle, leurs supports et ancrages représentent un enjeu majeur pour les installations industrielles.

La principale exigence des codes actuels pour la construction dans la situation sismique est la préservation des vies humaines. Cette exigence s'applique à la structure dans sa globalité, bien évidemment aux éléments structuraux, mais aussi aux éléments non-structuraux.

Pour ces derniers, une analyse globale de la structure avec éléments structuraux et non structuraux est rarement possible, principalement en raison de la méconnaissance des caractéristiques des éléments non structuraux.

Cependant, l'interaction entre ces deux parties peut exister et lorsque cela est vérifié, on la retrouve aussi bien pour des bâtiments industriels que pour des bâtiments plus classiques.

Une étude réalisée par l'AFPS propose une formulation simplifiée de la force latérale appliquée à un élément non structurel ou à un équipement.

Dans le cas d'un équipement fixé en un seul point, la problématique est de définir l'accélération subie par un élément intégré dans une structure soumise à un séisme.

Cet élément est soumis à une accélération due à l'amplification entre le sol et l'étage où est fixé l'équipement et à celle entre l'étage et l'équipement lui-même.

Plusieurs équipements sont ainsi recommandés : ancrages corrects des équipements, appuis parasismiques filtrant les mouvements, organisation et stockage des fûts dans des râteliers évitant leur renversement... et bien d'autres encore (vérification du mouvement sismique, des équipements, des structures-support, des canalisations enterrées).

ASIRI+ EN BREF

L'état de l'art rédigé dans le cadre de l'étude de faisabilité du projet national ASIRI+ a mis en évidence un besoin de mener des actions de recherche pour différentes applications du renforcement des sols par inclusions rigides. À partir de ce constat, le programme de recherche du PN ASIRI+ a été élaboré autours de trois principaux axes :

- **Axe 1 :**
  L'étude des plateformes de transfert de charge ;
- **Axe 2 :**
  Le comportement des ouvrages sous sollicitations quasi-statiques et/ou inclinées ;
- **Axe 3 :**
  Le comportement des ouvrages sous sollicitations dynamique et sismiques.

Le programme de recherche est organisé en 10 tâches.

L'AFPS s'intéresse-t-elle à la notion en pleine actualité désormais concernant le suivi et la durabilité d'un ouvrage dans le temps ?

C'est l'objectif principal du groupe de travail intitulé "mesures vibratoires". Pour répondre à la question relative à la vulnérabilité potentielle d'un bâtiment donné, plusieurs manières de procéder sont disponibles.

L'une d'elles est de réaliser ce que l'on appelle des analyses vibratoires "in situ". Cela consiste à "suivre" le bâtiment en l'équipant de capteurs et d'accéléromètres afin d'observer comment il réagit au bruit sismique ambiant.

Des études de traitement de signal permettent de déterminer à quelles fréquences il entre en résonance, ce qui donne une indication sur la sensibilité du bâtiment sachant que le "bruit sismique ambiant" est présent partout.

Dans la région de Grenoble, qui a la particularité d'être totalement encaissée dans un bassin, l'hôtel de ville qui est une tour de 12 étages d'une hauteur de 46,50 m a été équipé lors de sa construction entre 1965 et 1968 de capteurs qui permettent précisément de suivre son comportement pendant la totalité de son exploitation.

Ce groupe de travail a également vocation, d'une part, à identifier les techniques de mesures "in situ" applicables aux bâtiments existants pour caractériser "in fine" leurs propriétés dynamiques et, d'autre part, à publier des solutions et recommandations technologiques en termes de capteurs.

La retombée pour la profession d'un groupe de travail tel que celui-ci est notamment de proposer des solutions de monitoring qui vont permettre ▷

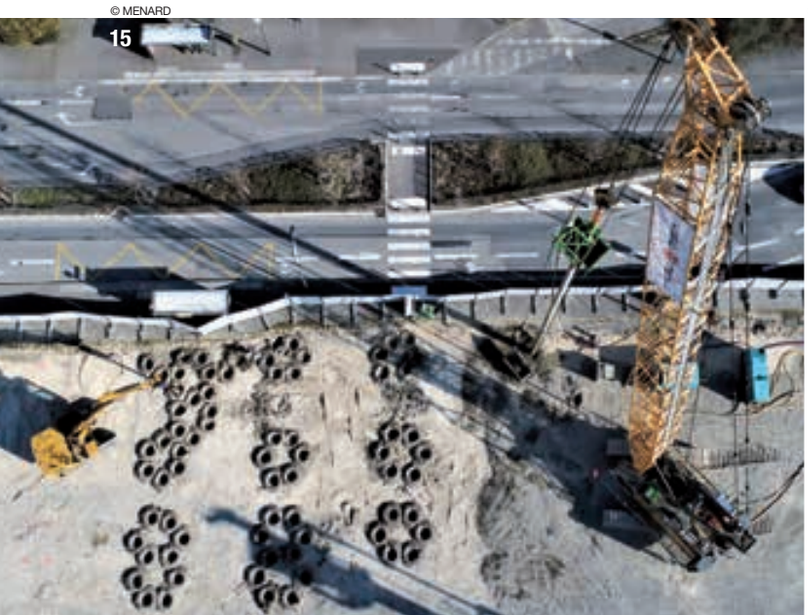
13- Zonage sismique de la France en vigueur depuis le 1er mai 2011.

14- À Miribel, compactage dynamique au sol à l'aide d'une masse suspendue à une pelle à câble par Menard.

15- À Saint-Martin-d'Hères, "Earthquake Drains" ou drains dits de "tremblement de terre" mis en œuvre par Menard.

16- Projet Genesis à Raceland en Louisiane, aux États-Unis, par Menard USA : renforcement de sols par Colonnes à Module Contrôlé (CMC) de 40 m de profondeur.

© MENARD



15

© MENARD

16

d'équiper des structures neuves de Génie Civil pour suivre leur comportement tout au long de leur durée d'exploitation. Il existe également des solutions technologiques applicables à l'existant.

Un autre groupe de travail porte sur la qualification sismique des équipements notamment dans le domaine industriel, mais aussi dans le domaine médical, visant à recenser les typologies d'équipements qui nécessitent une telle qualification : on va trouver dans l'industrie, typiquement des ponts roulants, des armoires électriques, et dans le domaine médical, des IRM par exemple. L'objectif de ce groupe de travail est d'identifier le meilleur protocole d'essai pour qualifier un équipement donné ou une famille d'équipements. Le produit final va être de proposer un cahier des charges type qui sera fourni par l'exploitant de l'équipement à une société capable de réaliser des essais de qualification.

QU'EST-CE QU'UN ESSAIM DE SÉISMES ?

Un essaim de séismes correspond à de multiples séismes survenant dans une zone délimitée sur une période de plusieurs jours ou plusieurs semaines, par opposition à la configuration habituelle d'une secousse principale suivie de répliques. La notion d'essaim ne permet pas en tant que telle de caractériser la magnitude ou la durée des événements.

De tels phénomènes sont assez courants et ont été répertoriés par le passé dans de nombreuses régions du globe. Des essaims sismiques se produisent aussi en France métropolitaine, comme ce fut le cas fin 2017 en Maurienne. Les essaims sont à différencier des séquences sismiques qui sont associées à la survenue de plusieurs séismes importants (de magnitude comparable), successifs, chacun étant suivi par des répliques. Les plus proches de Mayotte ont été observés en 1985 au nord de la ride de Davie (au large du Mozambique), et en 1989 puis en 2005 en Éthiopie (région de l'Afar), dans des régions tectoniquement actives associées à différents systèmes de rifts.

De quelle manière l'AFPS intervient-elle au niveau des fondations d'ouvrages qui sont parmi les premières à ressentir les effets d'une secousse sismique ?

À l'AFPS, il existe un suivi ainsi qu'une volonté d'émettre un certain nombre de recommandations pour aider les concepteurs et les bureaux d'études à réaliser les fondations d'ouvrages. Bien souvent, cela concerne des fondations de type pieux pour lesquelles un cahier technique vient d'ailleurs d'être publié récemment mais plusieurs membres de l'AFPS sont également présents dans le projet national ASIRI+ dont l'objectif est en particulier de fournir des recommandations qui vont, soit compléter celles déjà existantes, soit s'intéresser au cas particulier des inclusions rigides, toujours pour aider les concepteurs et les bureaux d'études à les dimensionner et à réaliser la phase d'exécution. Le renforcement des sols par des éléments rigides de fondation (inclusions verticales) a été redécouvert et s'est développé en France depuis les années 1990. Il permet de réduire de manière significative les tassements des massifs de fondation sous les chargements appliqués, tout en améliorant leur stabilité au poinçonnement. Ce procédé de renforcement consiste à créer une fondation composite dans laquelle les charges se distribuent entre le sol lui-même et les inclusions rigides.

L'état de l'art rédigé dans le cadre de l'étude de faisabilité du projet national ASIRI+ a mis en évidence un besoin de mener des actions de recherche pour différentes applications du renforcement des sols par inclusions rigides. Dans ce domaine, les cas particuliers sont tellement nombreux qu'au-delà du cadre général défini par les Eurocodes, si la réglementation n'est pas exhaustive, la valeur ajoutée de l'AFPS se manifeste par l'émission de recommandations ou de bonnes pratiques.

Pour conclure, quelques mots sur l'interférence sur les fondations dans le cas d'un séisme et l'action de l'AFPS dans ce domaine.

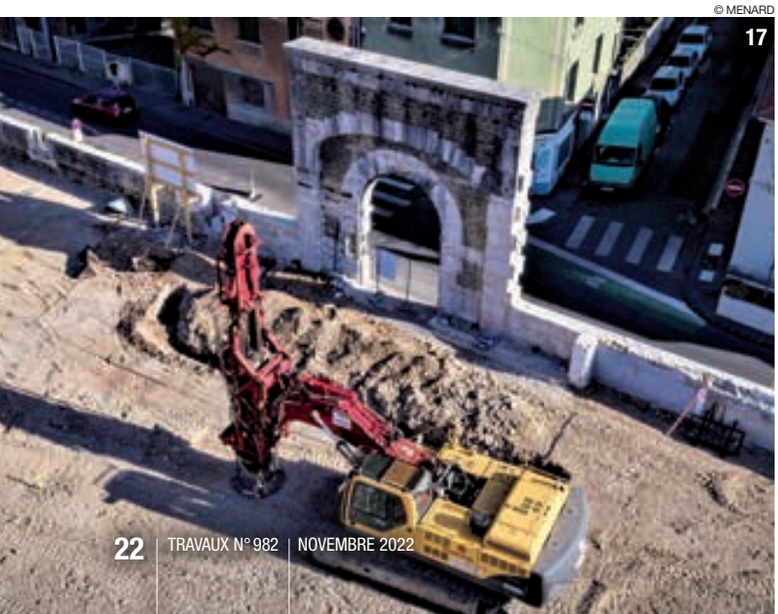
La connaissance du système de fondations initial sur un existant est fondamentale pour bien comprendre, toujours dans le cadre d'un séisme, comment les mouvements vont se transmettre sur la hauteur d'un bâtiment, étage après étage. Sans cela, le risque est de mal les évaluer et, dans ce cas, non seulement, la réévaluation du bâtiment pourra en être entachée mais encore, si le bâtiment, notamment un bâtiment industriel, reçoit des équipements, soit de pointe, soit susceptibles de l'agresser, il sera difficile de démontrer la tenue au séisme de l'ensemble.

Dans le cas des ouvrages neufs, le problème est un peu différent puisqu'on a la main sur les fondations mais, par contre, même si la conception des fondations dépend naturellement de la nature du sous-sol, du site, les exigences demeurent très importantes en termes d'exécution, de mise en œuvre directement sur chantier parce que, clairement, les mouvements sismiques vont transiter depuis le sol, via le système de fondations, vers les étages de la construction. Lorsqu'elle est sollicitée à ce sujet, l'AFPS émet des recommandations pour la bonne mise en œuvre, en particulier le bon dimensionnement des fondations. □

1- France Chimie fédère les France Chimie régionales, les Syndicats sectoriels, des fédérations et syndicats associés illustrant la variété des activités des industries de la Chimie. Elle représente aujourd'hui près de 1 200 entreprises adhérentes et près de 4 000 établissements réunissant 220 000 salariés dans la branche sur tout le territoire.

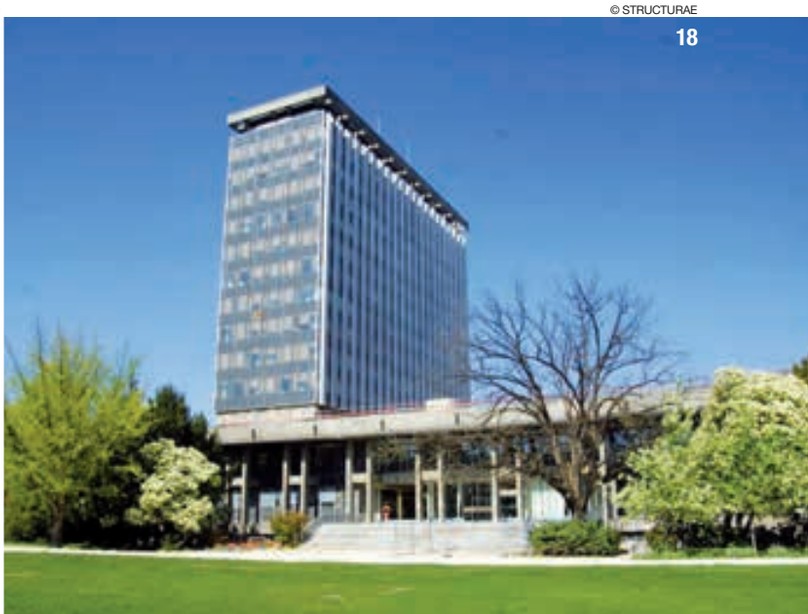
2- Toute exploitation industrielle ou agricole susceptible de créer des risques ou de provoquer des pollutions ou nuisances, notamment pour la sécurité et la santé des riverains, est une installation classée.

© MENARD



17

© STRUCTURAE



18

17- À Valence, Rapid Impact Compaction (RIC), compactage à impacts rapides par Menard, technique d'amélioration de sol permettant la densification des couches de sol de surface.

18- L'hôtel de ville de Grenoble est équipé de capteurs qui permettent de suivre son comportement.

SANTÉ • PRÉVOYANCE • ASSURANCES • ÉPARGNE • RETRAITE • VACANCES • ACTION SOCIALE

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

PRO BTP Association de prévoyance sociale du Bâtiment et des Travaux publics régie par la loi du 1er juillet 1901 - Siège social : 1 rue du Regard 75006 PARIS – SIREN 399 164 966

Réf. 2022 - 01 - 0 - 0 - Avril 2022 - Conception : Communicaid

1

© SOL SOLUTION

2

© SOL SOLUTION

SOL SOLUTION APPORTER "LA SOLUTION" AUX PROBLÈMES GÉOTECHNIQUES

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

SOL SOLUTION, QUI FÊTE CETTE ANNÉE SES 30 ANS D'EXISTENCE, POSSÈDE UN SAVOIR-FAIRE UNIQUE : LA COMPRÉHENSION DU SOL ET SON INTERACTION AVEC LES STRUCTURES QU'IL SUPPORTE (ROUTES, OUVRAGES D'ART, BÂTIMENTS, VOIES FERRÉES) OU QUI LUI SONT INTÉGRÉES (CANALISATIONS, RÉSEAUX, FONDATIONS...). AUTRE SPÉCIFICITÉ : ELLE CONÇOIT, DÉVELOPPE ET COMMERCIALISE DU MATÉRIEL GÉOTECHNIQUE QU'ELLE UTILISE AUSSI POUR DES MISSIONS D'ÉTUDES DE SOL SIMPLES OU COMPLEXES ET DES CONTRÔLES DE COMPACTAGE. PAR AILLEURS, ET CECI EST LIÉ À SON FONDATEUR : ELLE INVESTIT 10 % DE SON CHIFFRE D'AFFAIRES EN R&D. AVEC ANNE-SOPHIE VERET, DIRECTRICE GÉNÉRALE DE SOL SOLUTION, RETOUR EN ARRIÈRE SUR UNE AVENTURE TRENTENAIRE ET PROJECTIONS D'AVENIR.

Sol Solution a été créée en 1992 afin de distribuer le Panda®, un pénétromètre dynamique à énergie variable dont le concept reposait sur le besoin d'un matériel simple, léger et transportable pour caractériser le comportement des sols, en rupture avec les matériels géotechniques présents à l'époque sur le marché[1].

« *Le premier Panda® est né en 1987,* indique Anne-Sophie Veret, *mais ce n'est qu'en 1992 que Sol Solution a vu le jour. Son succès n'a pas été immédiat. Il a fallu convaincre des avantages de cette nouvelle technique. Plus léger, plus maniable, plus facile d'utilisation et de transport, le Panda® était en rupture avec les matériels lourds présents sur le marché. Mais il a profité quelque temps plus tard d'une norme rendant obligatoire le contrôle de compactage au pénétromètre dynamique à énergie variable qui a fait décoller ses ventes. Cependant, le Panda® présentait un*

1- Le Panda® est un pénétromètre dynamique à énergie variable.

2- Le Grizzly® est un pénétromètre dynamique lourd à énergie constante destiné au contrôle de compactage et à la reconnaissance des sols.

3- Anne-Sophie Veret, directrice générale de Sol Solution.

4- Carte des principaux distributeurs de Sol Solution dans le monde.

autre avantage non négligeable qui a contribué à son succès. En effet, il était livré avec un ordinateur portable et une imprimante qui permettait de publier directement les résultats des sondages sur le chantier. Le Panda® est aujourd'hui le pénétromètre le plus vendu dans le monde en contrôle de compactage. Il est présent dans 95 pays. Son acronyme cache ses fonctions : Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur. »

DU PANDA® AU E-KODIAK®

30 ans plus tard, c'est toute une famille de matériels relevant de la même philosophie qui a vu le jour, enrichie de prestations et de logiciels "métiers" : en 2006, lancement du Pandoscope®, pour l'auscultation des voies ferrées, en 2010, lancement des gammes Pandito® et Grizzly®, en 2020, lancement du e-Kodiak®, premier pénétromètre connecté et de l'application Websprint© sans oublier le M3S® Géotextile développé en 1994.

Le Pandito® est un pénétromètre dynamique ultra léger pour réaliser un auto-contrôle de compactage par couche. Son encombrement réduit permet aux équipes de chantier de réaliser des contrôles rapides et fiables, d'une extrême simplicité d'interprétation à chaque étape des travaux. Il répond à un besoin récurrent sur chantier mais il ne se substitue évidemment pas aux contrôles de réception finaux.

Le Grizzly® est un pénétromètre dynamique lourd à énergie constante destiné au contrôle de compactage et à la reconnaissance des sols. Le logiciel dédié embarqué permet les calculs en automatique des anomalies pour tous les matériaux. Il est conforme à la norme NF P 94 063 en contrôle de compactage et à la norme NF EN ISO 22476-2 en reconnaissance des sols.

Quant à Websprint©, cette application s'inscrit dans l'évolution naturelle des usages en géotechnique avec la gestion de données, la mobilité et la digitalisation.

« *Forts de notre expérience en matériel et en développement de logiciel,* précise Anne-Sophie Veret, *nous avons souhaité apporter à nos clients et futurs clients, une nouvelle manière de travailler, plus mobile, plus collaborative, plus rapide. L'application en ligne Websprint© est une alternative aux logiciels géotechniques actuels. Elle est multi-équipement, accessible d'un bureau ou d'un chantier, et très facile à utiliser.* »

DEUX MODÈLES ÉCONOMIQUES AUTOUR DE LA GÉOTECHNIQUE

Aujourd'hui, Sol Solution est un bureau d'études de géotechnique spécialisé dans la caractérisation mécanique des sols.

La société conçoit, développe et commercialise des solutions innovantes dans le domaine du contrôle de compactage des ouvrages en terre, de la reconnaissance géotechnique, du renforcement de sols et du diagnostic haut rendement et peu traumatisant de l'interaction sol/structure.

« *Sa philosophie,* précise Anne-Sophie Veret, *est de mettre en oeuvre les moyens, humains et matériels, adaptés aux besoins spécifiques de la maîtrise d'ouvrage, des entreprises de Travaux Publics et des gestionnaires d'infrastructures, tout en garantissant son indépendance scientifique.* ▷

© SOL SOLUTION

3

ANNE-SOPHIE VERET : **PARCOURS**

Anne-Sophie Veret est diplômée de l'IESEG (School of Management ou Institut d'Économie Scientifique et de Gestion) école de commerce privée de l'Université catholique de Lille (2003).

À sa sortie de l'école, elle rejoint la société de distribution textile "Jules" en tant que contrôleur de gestion qu'elle quitte en 2005 pour réaliser pendant 16 mois, à titre personnel avec son mari, un tour du monde.

De retour en France en 2007, elle décide, bien que d'origine vosgienne, de s'installer en Auvergne sans raison vraiment objective mais, peut-être, tout simplement liée au fait qu'elle retrouve dans cette région les paysages de montagne et de forêts des Vosges.

Elle rejoint alors en tant que chef de projet, entre 2007 et 2010, "Défi Mode", une enseigne de mode basée à Brioude, en Haute-Loire.

Lors du rachat de Défi Mode par le groupe Vivarte, préférant poursuivre sa carrière dans une PME, elle décide de quitter l'entreprise et, à la recherche d'un emploi, croise le chemin de Roland Gourvès, enseignant-chercheur à Polytech Clermont-Ferrand et créateur de Sol Solution.

Il se trouve qu'à cette époque, en 2009, ce dernier vient de prendre sa retraite universitaire mais surtout la direction de Sol Solution qu'il a créé en 1992.

Il engage Anne-Sophie Veret en septembre 2010 afin d'assurer de gérer les ressources de l'entreprise en développement.

En octobre 2017, lors de la reprise de la majorité du capital de Sol Solution par l'ensemble du comité de direction de l'époque, Anne-Sophie Veret devient directrice générale de l'entreprise.

© SOL SOLUTION

4

Son activité se divise en deux types de modèle économique :

- → *Le premier est lié à la conception, la fabrication et la distribution de matériels et de logiciels géotechniques et représente 38 % de son chiffre d'affaires ; il s'accompagne de la fourniture de l'ensemble des pièces destinées à leur fonctionnement ainsi que d'une formation autour de ses matériels, de plus en plus spécialisée sur la partie logicielle ;*
- → *Le second - 62 % du chiffre d'affaires - concerne la prestation d'ingénierie avec ses propres équipes d'investigation au travers d'études géotechniques classiques mais aussi vis-à-vis d'ouvrages déjà en service : installations ferroviaires, ouvrages en terre, cela étant toujours réalisé sans interrompre leur service. »*

© N.GROSS

Ainsi, les prestations d'ingénierie de Sol Solution se décomposent-elles en trois grands domaines :

- → Les études en amont de la construction : préconisations de fondations, dimensionnements de soutènements, ...
- → Le contrôle d'ouvrages nouvellement construits : réseaux d'assainissement, pieux, micropieux,
- → Le diagnostic d'ouvrages en service : infrastructures de transports, digues, ouvrages en terre...

L'entreprise est installée à Riom, dans la périphérie de Clermont-Ferrand depuis 1999. Elle a réalisé une première extension de ses locaux en 2012 et se prépare cette année à en effectuer une seconde.

À Riom, elle est équipée d'appareils pour la fabrication de ses produit propres (Panda®, Pandoscope®, Pandito®, Grizzly®, e-Kodiak®) ainsi que d'appareils géophysiques pour réaliser des analyses pour ses clients, de deux ateliers de forage, d'un laboratoire de sols avec machines de cisaillement, oedomètre et appareil triaxial ainsi que d'un "Hole Erosion Test" (HET) développé par l'Inrae[2]. Le HET permet de diagnostiquer la potentielle rupture d'un ouvrage en terre due à une érosion interne. Le test HET calcule la sensibilité d'un sol en place à l'érosion interne dans une digue, et détermine sa vitesse d'érosion potentielle. Il n'existe que deux bureaux accrédités par l'INRAE de ce type en France.

L'équipe dirigée par Anne-Sophie Veret comprend 95 collaborateurs se répartissant en une quarantaine de techniciens intervenant sur les chantiers, une douzaine dédiée à la R&D, une trentaine d'ingénieurs et une dizaine d'administratifs.

Sol Solution a réalisé en 2021 un chiffre d'affaires de 11 502 725 € dont 10 % à l'international et 10 % dans la R&D. Ses matériels sont présents dans plus de 95 pays dans le monde et elle dispose de 11 distributeurs à l'international avec une présence forte en Europe, naturellement, mais aussi en Australie ainsi qu'en Amérique du Sud (Chili, Colombie, Mexique),sans oublier l'Amérique du Nord. Parmi les plus représentatifs : InSitutek en Australie, Core Hard au Royaume Uni, Orbis Terrarum en Espagne, Ingeum au Mexique, Geotecnia Ambiental au Chili...

5- Le laboratoire de Riom.

6- 75 essais pénétrométriques Panda® ont été réalisés à une profondeur moyenne de 8 mètres sur le barrage en terre de l'usine de Nam Theun au Laos.

7- Les essais en cours de réalisation sur le barrage de Nam Theun.

10 CHANTIERS MARQUANTS DES 30 DERNIÈRES ANNÉES

Parcourir en une dizaine de chantiers l'aventure d'une entreprise qui fête cette année ses 30 ans d'activité est ce que propose la suite de ce reportage avec la collaboration d'Anne-Sophie Veret. Ces 10 chantiers marquants qu'elle a choisi de mettre en évidence constituent un panel significatif de la diversité des interventions de cette PME en France et à l'international.

© SOL SOLUTION

© SOL SOLUTION

© SOL SOLUTION

8

M3S : A71/ N4 À MONTMARAULT

Dans le cadre des travaux de l'échangeur de Montmarault sur l'A71 pour le compte d'APRR (Autoroutes Paris-Rhin-Rhône), Sol Solution a réalisé la conception et accompagné Eiffage Génie Civil pour la réalisation de deux ouvrages de soutènement sous la déviation provisoire de l'autoroute permettant de réduire le talus pour réaliser un ouvrage d'art.

Le projet consiste en la création d'une déviation provisoire de l'A71 dans le secteur de Montmarault. Cette déviation implique la réalisation d'un raidissement provisoire des terres pour libérer une emprise de travail permettant la réalisation d'un ouvrage d'art de franchissement. Elle consiste en l'élévation d'un remblai renforcé par géotextiles alvéolaires M3S® d'environ 9 m de hauteur.

Le procédé M3S® est un renforcement de sol apportant une cohésion complémentaire permettant de raidir les talus.

L'ouvrage permet de supporter les charges de trafic importantes générées par l'autoroute et notamment la voie de droite (poids lourd).

Le procédé M3S® allie plusieurs caractéristiques : réutilisation des matériaux, solidité et façonnement en fonction des contraintes du site (possibilité de réaliser des courbes), impact carbone réduit avec une optimisation des matériaux de carrière déployés, ingénierie de haute qualité sur des ouvrages complexes.

LAOS : 75 ESSAIS PÉNÉTROMÉTRIQUES

Nam Theun 2 Power Company (NTPC) a mandaté Sol Solution afin de réaliser des essais pénétrométriques dans un barrage en terre de l'usine hydroélectrique Nam Theun au Laos. Ce pays d'Asie du Sud-Est, montagneux et soumis à la mousson, a un fort potentiel hydroélectrique. L'enjeu était de vérifier l'uniforme compacité d'une digue latérale à une rivière. Le Panda® a permis de réaliser des sondages peu destructifs de grande profondeur.

En 9 jours, 75 essais pénétrométriques Panda® ont été réalisés à une profondeur moyenne de 8 mètres dans un sol argilo-sableux, selon un maillage régulier et serré de trois lignes espacées de 2 mètres, par les équipes de Sol Solution aidées de deux techniciens sur place. Les données relevées ont permis de dessiner des profils de résistance révélant la cartographie de compacité de l'ouvrage. Le client s'est vu remettre des modélisations 2D et 3D.

« *La compacité des sols est le cœur historique de notre entreprise,* précise à ce sujet Anne-Sophie Veret.

Le Panda®, à l'origine de la création de l'entreprise, a tout de suite séduit les utilisateurs en permettant facilement et immédiatement sur le chantier de respecter les préconisations de compactage des remblais. Des remblais résistants à l'usage prévu permettent d'assurer la pérennité des ouvrages et de garantir l'optimisation des ressources qu'il a fallu utiliser pour le construire. »

8- Le procédé M3S® est un renforcement de sol apportant une cohésion complémentaire permettant de raidir les talus.

9- Auscultation au Pandoscope© associé à un géoendoscope sur le projet CDG Express.

10- Le Pandoscope© pour les diagnostics de la HS1, unique voie ferrée à grande vitesse du Royaume Uni.

CHARLES DE GAULLE EXPRESS : DIAGNOSTIC DE LA PLATEFORME

Le CDG express est un projet visant à relier Paris à l'aéroport de Roissy Charles de Gaulle en 20 minutes et renforcer ainsi la qualité et la complémentarité du service de transport en Île-de-France. Il intègre également la modernisation et la régénération concomitantes des voies existantes du RER B.

« *Sur CDG Express,* indique Anne-Sophie Veret, *le département Diagnostic d'Ouvrages de Sol Solution a été mandaté par SNCF Réseau pour réaliser des sondages au Pandoscope® sur des voies existantes afin de déterminer si la plateforme ferroviaire actuelle est compatible avec le tracé et les caractéristiques de la future voie.* ▷

9

© SOL SOLUTION

10

© SOL SOLUTION

Sol Solution est intervenu dans le projet CDG Express depuis 2015 à différentes phases de son avancement et sur différentes problématiques que ce soit le projet CDG express en lui-même ou les études de régénération du RER B associées. »

Le Pandoscope®, un pénétromètre dynamique à énergie variable associé à un géoendoscope, a permis de caractériser les structures d'assises de la voie, en apportant à la fois des informations sur la nature des matériaux (nature, épaisseurs, granulométrie) et sur les caractéristiques mécaniques des couches. Ces informations sont les données d'entrée nécessaires pour déterminer la nature et la quantité des travaux à effectuer pour créer la nouvelle liaison entre la gare de l'Est et l'aéroport de Roissy Charles de Gaulle. Par sa légèreté et sa facilité de mise en œuvre, il a permis des investigations dans des conditions d'intervention et d'accès parfois complexes sur des voies aux circulations particulièrement denses comme le sont toutes celles de la région parisienne.

11

© A.GUYOT

CHILI : CONTRÔLE DES STÉRILES MINIERS DE BARRAGES

Les gestionnaires de mines peuvent se trouver confrontés à la problématique des résidus miniers et de leurs stockages. En effet, risques sismiques, liquéfaction, stabilité générale et autres aléas rendent ces sites, pour certains laissés à l'abandon, dangereux.

Sol Solution apporte son savoir-faire technologique dans la surveillance et le contrôle de ces stériles miniers.

Les objectifs sont multiples, précise Anne-Sophie Veret : « *D'une part, il s'agit de déterminer en profondeur la stratigraphie et l'épaisseur des couches mais également de contrôler la qualité du compactage. Ces objectifs permettent alors d'évaluer la pertinence des procédés de construction mis en œuvre pour le stockage des résidus.*

D'autre part, il est également question, parfois, de préparer les fermetures progressives en toute sécurité de ces zones de stockage en caractérisant mécaniquement et en profondeur les dépôts. En couplant les données contextuelles et les données des sondages, Sol Solution donne à ses clients une vision complète de la stratigraphie et de l'épaisseur des conches rencontrées, ainsi que la qualité mesurée du compactage. Dans des territoires à forts aléas géotechniques, ces données permettent aux gestionnaires d'ouvrages de prévenir tout risque de liquéfaction et/ou de rupture. »

ROYAUME UNI : LA HS1 SOUS SURVEILLANCE

Après une formation à la sécurité ferroviaire anglaise et une batterie de tests PCR, l'équipe de géotechniciens de Sol Solution est partie en mission durant sept semaines pour réaliser des diagnostics sur la HS1, unique voie ferrée à grande vitesse du Royaume-Uni.

« *Un autre exemple,* précise Anne-Sophie Veret, *où le savoir-faire de Sol Solution, dans le contrôle des couches d'assise des voies ferrées, continue de voyager au-delà des frontières françaises. C'est dans le cadre des études préparatoires au renouvellement du ballast d'un tronçon de la section la plus ancienne, que le gestionnaire de l'infrastructure a fait appel aux services de Sol Solution, pour faire un diagnostic des voies concernées.* »

À noter que l'infrastructure ferroviaire et les trois gares principales font l'objet

11- Le monde ferroviaire s'est ouvert à nous en 2003, suite à deux travaux de thèses, financés par Sol Solution et le dispositif Cifre.

12- Sol Solution apporte son savoir-faire technologique dans la surveillance et le contrôle des stériles miniers de barrages, ici au Chili.

13- Carottage virtuel pour la cellule d'expertise du 25e RGA.

12

© SOL SOLUTION

13

© SOL SOLUTION

© WIKIPEDIA

14

© SOL SOLUTION

15

14- Le Rocher de Gibraltar.

15- Premier chantier à l'international, en 1995, sur le Rocher de Gibraltar.

16- L'intervention sur le tunnel de Soulat a nécessité des équipements supplémentaires et des dispositifs de sécurité particuliers.

17- Mission géotechnique d'exécution G3 sur les ouvrages sur pieux de la station d'épuration des Trois Rivières (63).

GIBRALTAR : PREMIER CHANTIER À L'INTERNATIONAL

Le Rocher de Gibraltar, côté méditerranée, possédait une pente revêtue de tôles métalliques servant à récolter les eaux de pluie.

Avant enlèvement de ces tôles et cloutage perpendiculaire, le but était de définir l'épaisseur de sable éolien, accumulé au fil du temps en une épaisseur conséquente (de l'ordre de 3 à 5 mètres), et légèrement cémenté contre la paroi rocheuse (consolidation en limite d'équilibre).

Le Panda®, utilisé sur toute la surface (opérateur sécurisé en rappel) a donné entière satisfaction quant aux résultats attendus, et a ainsi permis de déterminer l'interface entre ce sable cémenté et le sable naturel composant cette pente.

La corrélation qd Panda® et la cohésion non drainée Cu a aussi permis de donner une idée sur la stabilité de la pente.

Ce chantier de Gibraltar, réalisé pour Edmond Nuttal (maître d'ouvrage) s'est déroulé en 1995.

d'un contrat d'entretien, d'exploitation et de renouvellement par Network Rail (High Speed) Limited.

Les caractéristiques des couches d'assises (mécaniques, épaisseurs et nature) ont été fournies grâce au Pandoscope®. Par ailleurs, afin de dimensionner au plus juste les emports de ballast et réduire l'impact environnemental et économique de ces opérations de renouvellement de ballast, Sol Solution a utilisé son nouveau système de granulométrie par analyse d'images pour alimenter son modèle innovant d'estimation du potentiel de réutilisation du ballast, modèle qui prend en compte les composants de la voie ainsi que le modèle de dégradation du ballast, mettant ainsi à profit l'expérience acquise aux travers des collaborations et prestations réalisées pour SNCF Réseau durant les 20 dernières années.

Anne-Sophie Veret précise à ce sujet : « *Le monde ferroviaire s'est ouvert à nous en 2003, suite à deux travaux de thèse, financés par Sol Solution et le dispositif Cifre. L'objectif était de caractériser par l'image la donnée mécanique, qui reste aveugle. Ces travaux permettent aux gestionnaires d'ouvrage de connaître précisément les zones de faiblesse et d'optimiser la quantité et les coûts de renouvellement du ballast.* »

CAROTTAGE VIRTUEL POUR LE 25e RGA

Dans le cadre de ses collaborations en R&D et du transfert de technologie, Sol Solution a équipé la cellule d'expertise du 25e RGA (Régiment du Génie de l'Air) d'un système complet lui permettant de déployer sur le terrain une méthodologie d'auscultation des chaussées revêtues. Cette solution développée associe le carottage virtuel et le Pandoscope®.

« *Le carottage virtuel est une technique développée et brevetée par Sol Solution,* précise Anne-Sophie Veret, *qui consiste à compléter, voire substituer, le carottage classique des structures de chaussée par le couplage de l'essais de pénétration Panda® et de la géo-endoscopie réalisés sur un forage de très faible diamètres (Ø < 22 mm). Les logiciels et les algorithmes de reconnaissance d'images développés par notre R&D permettent d'obtenir, avec une très grande résolution verticale et spatiale, une carotte virtuelle.* ▷

16

© SOL SOLUTION

17

© SOL SOLUTION

Il est alors possible d'identifier les épaisseurs de chaque couche composant la structure, ainsi que leur nature et leur état hydrique, entre autres. Cette technique d'auscultation permet au gestionnaire d'ouvrages d'améliorer la connaissance de son patrimoine rapidement sans nuire à l'intégrité structurale de l'ouvrage et sans perturber l'exploitation des lieux (trafic, circulation des engins...). »

TUNNEL DE SOULAT : MISSION À RISQUE

Les équipes de Sol Solution sont intervenues sur un projet SNCF de remise en service du raccordement de Mourepiane à Marseille (ligne de l'Estaque). L'étude comptait au total 17 sondages Pandoscope® dont 9 au niveau du tunnel de Soulat.

L'accès au tunnel de Soulat est totalement interdit en raison d'une pollution importante au chrome hexavalent. En effet, cette pollution n'est pas présente dans l'air mais dans l'eau qui s'infiltre à l'intérieur de l'ouvrage, localisant les zones plus ou moins polluées.

Anne-Sophie Veret de préciser : « *Cette intervention a nécessité des équipements supplémentaires, gants et bottes étanches, combinaison chimique, lunette de protection étanche, masque filtrant, détecteur à photoionisation (PID) et la mise en place de dispositifs de sécurité afin que nos techniciens puissent se déplacer et travailler dans les meilleures conditions possibles.* »

TROIS RIVIÈRES : EXTENSION SOUS CONTRÔLE

Pour les travaux d'extension de la station d'épuration des Trois Rivières à Clermont-Ferrand (63), Sol Solution a accompagné NGE Génie Civil pour réaliser la mission géotechnique d'exécution G3 sur les ouvrages fondés sur pieux, le bassin de stockage et de retenue BSR (paroi moulée et micropieux en fond de bassin).

Le BSR est un ouvrage de 45 m de diamètre et de 20 m de profondeur. Il est prévu la réalisation de 265 micropieux sur lesquels repose en partie la dalle de fond du BSR. Cette dernière est également portée en périphérie par la paroi moulée et ponctuellement par 22 poteaux-pieux.

Afin d'absorber les effets du gonflement des marnes sous le radier, une couche de polystyrène a été mise en place en sous-face. Le dimensionnement du polystyrène a également fait l'objet d'une note de calcul spécifique.

© SOL SOLUTION

18- Le Panda sur chantier : léger, maniable, facile d'utilisation et de transport.

19- À Buchelay, Sol Solution a assuré la mission G3 de dimensionnement des raidissements sur des parois clouées.

20- Geosystem a mandaté Sol Solution pour étudier le risque d'érosion du barrage de Rorota en Guyane Française.

BUCHELAY : ÉLARGISSEMENT PAR PAROI CLOUÉE

Dans le cadre de l'aménagement des parcs d'activités "Les Aureines" et "Les Graviers" sur la commune de Buchelay (Yvelines), une voie "tourne à droite" doit être réalisée sous la travée Est d'un ouvrage d'art de franchissement entre les deux parcs d'activités. Côté Ouest de l'ouvrage, une voie douce (piétons et cycles) doit également être insérée. Ces deux aménagements impliquent le raidissement de chacun des deux perrés situés sous l'ouvrage.

Les raidissements réalisés sont des parois clouées dont Sol Solution a assuré la mission G3 de dimensionnement pour le compte de l'entreprise NGE Fondations. En plus des notes de calcul classiques et à la demande de la maîtrise d'œuvre, les déplacements en tête de paroi ainsi qu'au niveau du chevêtre ont fait l'objet de modélisations à l'aide du logiciel Plaxis afin de garantir la stabilité de l'ouvrage existant.

BARRAGE DE ROROTA : TESTS D'ÉROSION

Geosystem, conseil dans l'ingénierie géotechnique, implanté en Martinique, a mandaté Sol Solution pour étudier le risque d'érosion du barrage de Rorota en Guyane Française.

À cet effet, Sol Solution a réalisé trois essais d'érosion Hole Erosion Test (HET). Ce test permet de connaître le comportement d'un échantillon de sol préalablement perforé dans le sens longitudinal. Les résultats de cet essai sont la contrainte de cisaillement critique et l'indice d'érosion du sol. Le dispositif d'essai est constitué d'une cellule cylindrique en plexiglas, divisée en trois parties amovibles, qui permet

© SOL SOLUTION

© BETCGB

de recevoir l'échantillon, lui injecter de l'eau et d'analyser le différentiel de pression entre l'entrée et la sortie du dispositif de mesure.

« *Ce type de diagnostic est d'autant plus important qu'il permet de prévenir des éventuels sinistres, notamment la rupture d'un ouvrage en terre,* ajoute Anne-Sophie Veret. *Comme le barrage de Teton aux États-Unis qui avait cédé lors de son remplissage en 1976 du fait de l'érosion interne.*

Cette illustration montre combien il est important pour nous de suivre au maximum les nouveaux procédés issus du savoir-faire Irstea, désormais Inrae, et de nouer des partenariats avec les universités ou centres de recherche qui sont nombreux et nous permettent d'ouvrir notre offre pour une solution complète à destination de nos clients. »

SINGAPOUR : RENOUVELLEMENT DES VOIES

Sol Solution a été mandatée par le SMRT (Singapore Mass Rapid Transit) pour réaliser le diagnostic d'une partie de son infrastructure de chemin de fer. L'objectif est de fournir des informations pour un projet de renouvellement de ballast.

En effet, le réseau du SMRT a été construit en différentes phases. Les premières portions sont en service depuis 1987.

En ce qui concerne l'infrastructure, le ballast n'a pas été renouvelé depuis sa construction il y a plus de 30 ans. Même si les voies ferrées ballastées sont construites et entretenues depuis plus de deux siècles, la dégradation du ballast et sa durée de vie sont encore très difficiles à évaluer.

L'un des objectifs de cette étude est de fournir des informations qui permettront de comprendre l'état du ballast. Ces données doivent être croisées avec d'autres informations de maintenance afin d'aider à construire un programme de maintenance/renouvellement.

La méthodologie proposée est basée sur le couplage de mesures géophysiques (Ground Penetrating Radar) et géotechniques (tests Pandoscope®), peu invasives.

Sur ce type de projet, Sol Solution réalise une étude de voie avec une investigation initiale par géoradar (GPR). Une analyse préliminaire de cette étude combinée aux informations sur la géométrie de la voie et son entretien permet de localiser les endroits où les sondages Pandoscope® permettraient de comprendre et d'analyser les informations GPR et la particularité de la voie : un échange avec le client final est alors conseillé pour expliquer les anomalies observées sur le GPR, ou pour fixer de nouvelles positions de sondages. Une fois les sondages Pandoscope® effectués et analysés, ils sont couplés aux données GPR, permettant à Sol Solution de faire une analyse de l'ensemble de la voie.

« *Après une première étude de faisabilité effectuée en 2015,* poursuit Anne-Sophie Veret, *les équipes de Sol Solution ont effectué une mission en 2020 qui consistait à fournir des informations d'appui pour étudier le renouvellement des voies. Les objectifs étaient : la définition de la nature et de l'épaisseur des couches existantes (ainsi que leurs variations) ; la définition de la profondeur de l'assise de la voie dans les sections à niveau ou de la dalle dans les sections en viaduc et en tunnel ; la détermination de la position des différentes interfaces 1- ballast / ballast colmaté, 2- ballast colmaté / sous-ballast et 3- sous-ballast / plate-forme.* »

À préciser que la mission s'est déroulée sur trois semaines, avec un programme réajusté en raison du confinement lié à la première vague Covid-19 et a mobilisé quatre personnes du service international. Les résultats des investigations vont servir à bâtir le programme et la consistance du projet de renouvellement.

MOBILITÉ DURABLE ET DIGITALISATION

La question de la mobilité durable se situe au cœur des préoccupations de Sol Solution : réhabiliter les ouvrages existants, optimiser les quantités mises en place de matériaux, réutiliser les matériaux ont toujours été ses préoccupations N°1.

Trouver la solution adaptée à la contrainte de ses clients reste son fer de lance. 12 personnes sont entièrement dédiées à créer, améliorer les produits, services et logiciels de Sol Solution.

« *Une de nos plus grandes contraintes,* conclut Anne-Sophie Veret : *faire en sorte que nos outils soient faciles d'utilisation, non destructifs et rapidement interprétables.* »

Un pari facilité avec la digitalisation et la mise en place d'outils faciles et gratuits pour ses clients comme l'application mobile DCP associée au e-Kodiak® qui permet d'afficher les pénétrogrammes en temps réel, sur le terrain, à partir d'un smartphone ou d'une tablette. La transformation digitale est désormais au cœur des métiers de la géotechnique. □

© SOL SOLUTION

21

21- L'application mobile DCP associée au e-Kodiak® qui permet d'afficher les pénétrogrammes en temps réel, sur le terrain, à partir d'un smartphone ou d'une tablette.

LE E-KODIAK® : UN PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE "CONNECTÉ"

Dernier né de la gamme Solution et lancé en novembre 2020, le e-Kodiak® est un pénétromètre dynamique à énergie modulable, connecté.

Il permet de mesurer, d'enregistrer et d'analyser des données directement sur le terrain grâce à un boîtier équipé de capteurs "nouvelle génération" et une application mobile Sol Solution DCP, téléchargeable sur un smartphone ou une tablette.

Autre fonctionnalité, le e-Kodiak® possède un système très simple de masses interchangeables par simple vissage-dévissage manuel qui rend possible la variation et l'adaptation de l'énergie de battage à la dureté des sols sondés.

Avec ce matériel, Sol Solution a pour ambition de mettre au service de la géotechnique des solutions intégrant les nouvelles technologies du big data, l'IoT, du cloud, ...

À travers le développement de la digitalisation des mesures géotechniques, le e-Kodiak® permet à ses utilisateurs de gagner en efficacité et en rapidité par le transfert, le stockage et le traitement des données. Les mesures prises lors de nombreux essais peuvent ainsi être géoréférencées, transférées en temps réel et par la suite traitées, stockées et partagées en toute sécurité, limitant l'édition de papier et permettant la mobilité des collaborateurs.

Il répond à la norme européenne EN ISO 22476-2 -DPL.

1- La légende raconte que c'est en plantant une sardine dans le sol pour fixer sa tente que son inventeur, Roland Gourvès a eu l'idée d'utiliser l'énergie dégagée par la frappe accélérée d'une masse sur une tige pour mesurer la résistance du sol et relever des données.

2- INRAE, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, est né le 1er janvier 2020. Il est issu de la fusion entre l'Inra, Institut national de la recherche agronomique, et l'Irstea, Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture.

1

© PHOTOTHÈQUE FRANKI

ESSAIS DE CHARGEMENT STATIQUE DE PIEUX POUR LA 3e LIGNE DU MÉTRO DE TOULOUSE

AUTEURS : CHARLOTTE COCHEZ, INGÉNIEURE GÉOTECHNICIENNE, ARCADIS - ÉMILIEN MICHAUD, RESPONSABLE R&D, FRANKI FONDATION - JEAN-YVES DE LAMBALLERIE, DIRECTION INFRASTRUCTURE, TISSEO INGÉNIERIE

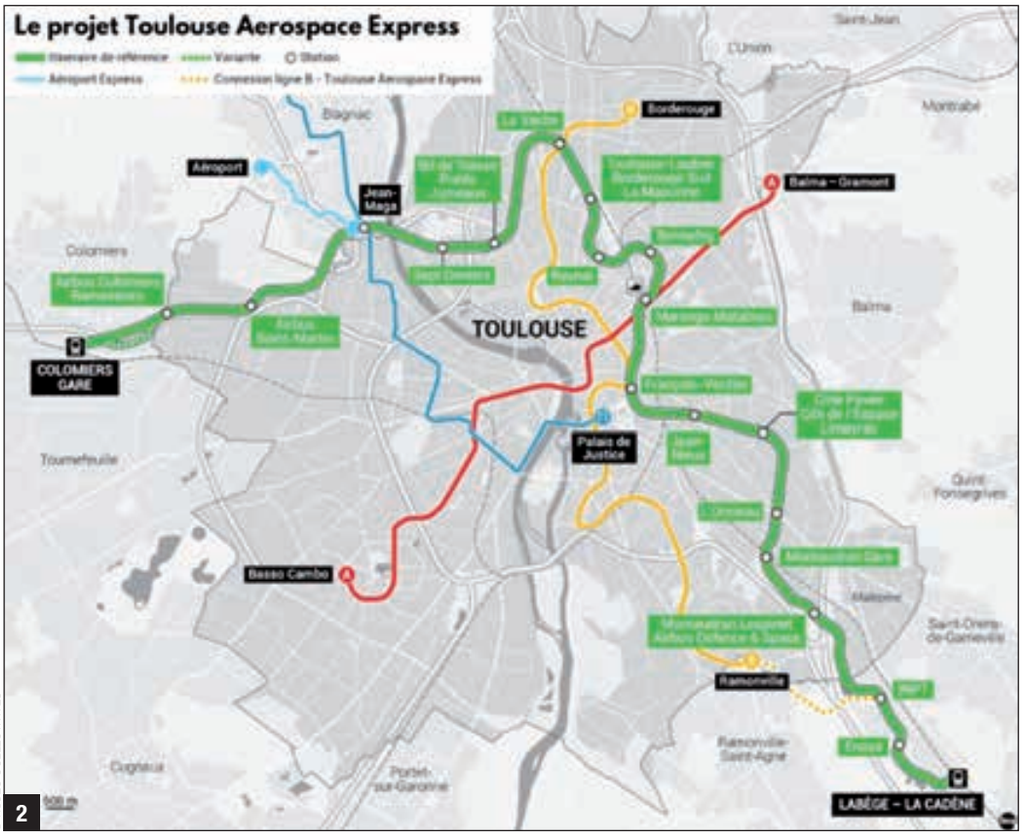
LES PROJETS DE 3e LIGNE DE MÉTRO ET DE PROLONGEMENT DE LA LIGNE B EXISTANTE COMPRENNENT 29,7 km D'INFRASTRUCTURES NEUVES DONT 7,2 km DE VIADUCS. CES OUVRAGES D'ART SERONT FONDÉS SUR UN SYSTÈME DE FONDATIONS PROFONDES ANCRÉES DANS LE SUBSTRATUM MOLASSIQUE. DÈS LE DÉBUT DE LA PHASE CONCEPTION, UNE RÉFLEXION A ÉTÉ MENÉE PAR LE MAÎTRE D'OUVRAGE ET LE MAÎTRE D'ŒUVRE POUR OPTIMISER AU STADE DU PRO LE DIMENSIONNEMENT DES 819 PIEUX D'OUVRAGE D'ART PROJETÉS.

PRÉSENTATION DU PROJET DE 3e LIGNE

Le projet de 3e ligne de métro est une infrastructure de 27 km reliant Colomiers à l'ouest à Labège au sud-est avec 21 nouvelles stations dont 5 en interconnexion avec les lignes de transport structurantes existantes. En parallèle, le prolongement de la Ligne B existante sera desservi par 2 nouvelles stations et se déploiera depuis le terminus de Ramonville jusqu'à Labège où il se connectera à la 3e ligne à la station INP (figure 2). Le sud-est de la 3e ligne ("M3SE") et la connexion à la Ligne B ("CLB") comportent respectivement 5 et 2,2 km de viaduc. Les ouvrages d'art courants constituent la quasi-totalité du linéaire (92 % du linéaire de M3SE et 89 % de CLB) avec une structure répétitive composée de caissons en béton précontraint et des travées de 40 m. Les appuis sont constitués d'un fût unique surmonté d'une pile en forme de tulipe qui repose sur une semelle fondée sur 4 pieux (ponctuellement 6 voire 9).

1- Vue générale du chantier.

1- General view of the site.



© TISSEO COLLECTIVITÉS

2

CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Le contexte géologique et hydrogéologique est relativement homogène tout au long des deux tracés avec des épaisseurs variables de recouvrements quaternaires reposant directement sur le substratum molassique qui présente une frange altérée à son toit.

Les différents dépôts quaternaires sont composés d'une succession de terrasses alluviales formées par les cours d'eau secondaires circulant dans le secteur : alluvions modernes et anciennes des basses terrasses de l'Hers, alluvions du seuil de Toulouse et des moyennes terrasses de l'Hers, avec des épaisseurs de remblais anthropiques localement très variables.

La molasse tertiaire est un sédiment détritique de type continental fluviatile mis en place par des ruisseaux itinérants sinueux et peu engravés. Sa composition est caractéristique de dépôts discontinus de cours d'eau méandreux avec une granularité fine (limon) à grossière (sable) selon la compétence du courant (figure 3). Des accumulations de calcite dans ces horizons ont formé les bancs rocheux rencontrés de façon aléatoire dans la formation.

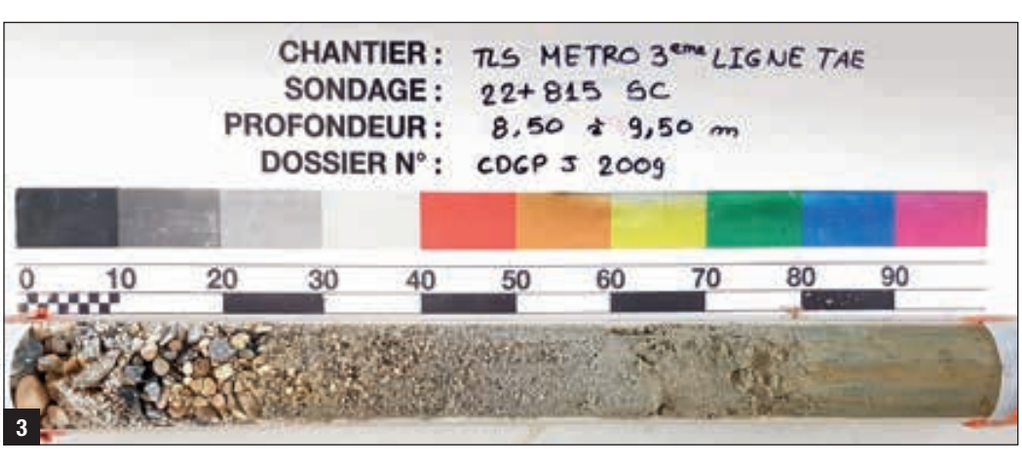
Le contexte hydrogéologique est caractérisé par la présence d'une nappe alluviale en relation directe avec l'Hers Mort, de micro-nappes temporaires dans les remblais superficiels et d'aquifères plus profonds d'extension limitée constitués par les lentilles et chenaux sableux molassiques.

2- Projection du tracé de 3e ligne et de prolongement Ligne B.

3- Carotte de molasse tolosane extraite du sondage 22+815 SC.

2- Plan of the alignment of Line 3 and extension of Line B.

3- " Molasse tolosane " core sample extracted from borehole 22+815 SC.



© PHOTOTHÈQUE GINGER

3

INVESTIGATIONS GÉOTECHNIQUES

Au total, 359 sondages géotechniques ont été réalisés pour ces deux projets (M3SE et CLB) dont 11 spécifiquement au droit du futur plot d'essai : 3 sondages pressiométriques dont 2 de 25 m et 1 de 15 m, 2 sondages carottés de 15 et 25 m, 4 CPT et 2 sondages à la tarière de 4 m, complétés par une série d'essais en laboratoire.

Au droit du plot, les terrains traversés sont un recouvrement quaternaire d'environ 2 m surmontant une frange altérée de molasse d'environ 6 m (Pl* ~ 4,5 MPa) puis le substratum sain (Pl* ~ 6,5 MPa) (figure 4).

La molasse est représentative du reste du tracé : elle est constituée pour 66 % de faciès fins limoneux, pour 30 % de faciès sableux respectivement fins et grossiers, pour 4 % de roche (grès et calcaires).

Les essais en laboratoire réalisés sur la molasse témoignent de limons sableux de consistance très dure avec une faible fraction argileuse, des teneurs en carbonates comprises entre 2,2 et 4,5 % (figure 5).

CARACTÉRISTIQUES DES PIEUX ET DU PLOT

Le plot d'essai est situé à proximité du futur terminus La Cadène sur un parking mis à disposition par la collectivité territoriale (Sicoval). Cette zone s'est révélée être représentative des horizons traversés tout au long du tracé du futur métro.

Le dimensionnement des pieux s'est articulé autour des quatre parties prenantes géotechniques du projet : Arcadis, Université Gustave Eiffel, Franki Fondation et Bureau Veritas. L'objectif principal étant d'atteindre la rupture géotechnique du sol et non celle du pieu. Ce dimensionnement a été établi à partir de cinq données :

- → Le CCTP qui demandait de réaliser des pieux d'essais de Ø 700 mm et des pieux de réaction de Ø 1 000 mm à 20 m de profondeur (soit, pour ces derniers, une géométrie similaire à ceux retenus pour le projet en phase PRO) ;
- → La campagne géotechnique préalablement évoquée ;
- → La capacité maximale du vérin utilisé pour l'essai (1 500 t) ;

→ Les résultats d'une première campagne d'essais dans la molasse réalisés également en tarière creuse juste avant les années 90 (Bustamante et al. 1989) ;
→ La connaissance empirique de la molasse basée sur les résultats du dimensionnement des pieux dans les molasses, dans des milieux marneux, et les résultats d'essais à la rupture obtenus dans le cadre de clous, tirants et micropieux.

Pour rappel, ce type d'essais de chargement consiste à appliquer une charge axiale croissante en tête de pieu et à mesurer le tassement résultant. Pour son exécution il nécessite alors un système de réaction servant d'ancrage au système de chargement (vérin) qui peut exercer, sans incertitude ni danger pour les opérateurs, la même force que celle appliquée sur le pieu objet du test qui est généralement surdimensionné. Cette approche a permis de sortir le dimensionnement suivant : des pieux d'essais de 11,50 m en Ø 720 mm, qui, à une charge maximale de 1 500 t, devaient atteindre la rupture géotechnique.

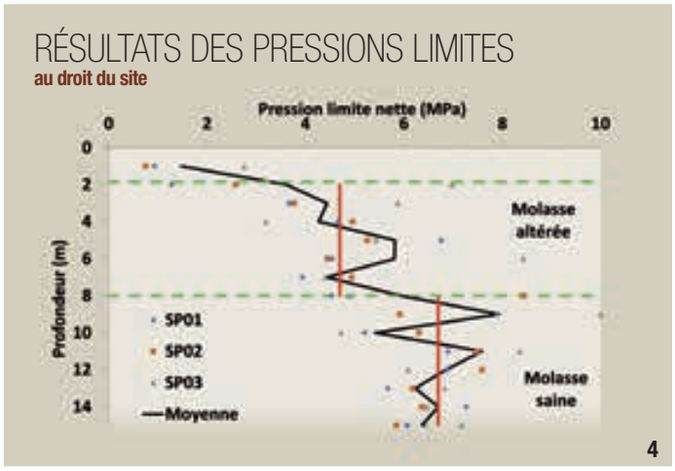
Le plot d'essai réalisé a donc comporté 6 pieux d'essais pour 12 pieux de réaction, chacun des pieux d'essais ayant besoin de 4 pieux de réaction pour être chargé.

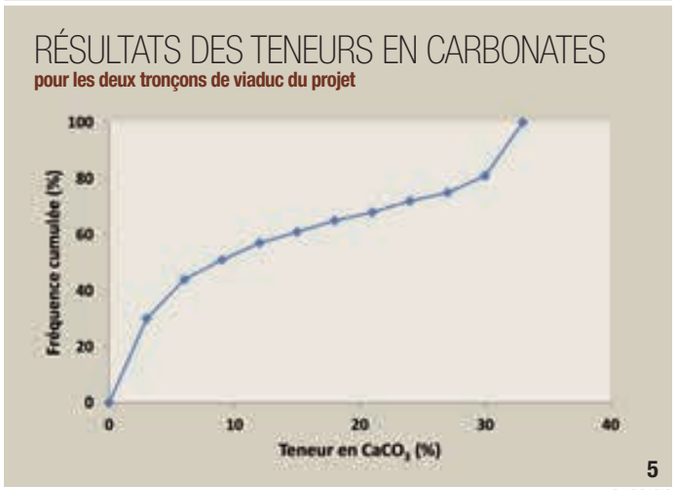
Lors de l'essai de chargement, le pieu chargé est en compression simple : cet effort est distribué aux pieux de réaction par un système de poutraisons qui met en traction ces derniers. C'est pourquoi les armatures principales des pieux de réaction ont été composées de barres types Gewi manchonnées sur toute la hauteur des pieux et raccordées au système de poutraison.

Afin d'analyser le chargement des pieux d'essais, 31 capteurs de déplacements et de déformations (4 en tête et 27 le long du fût en triplette) ont été fixés sur chacune des cages d'armatures (figure 6) : ces capteurs permettent une acquisition en temps réel des efforts distribués sur la longueur du pieu. C'est la présence de ces capteurs qui implique d'avoir une cage d'armature sur toute la hauteur du pieu d'essai. Pour le béton, le besoin était d'avoir une résistance mécanique du matériau supérieure à la contrainte maximum induite par le vérin (1 500 t), soit 37 MPa sur les pieux de Ø 720 mm. Le choix s'est donc orienté vers un C45/55.

Il faut souligner que ces essais, validés par la maîtrise d'ouvrage Tisseo Ingénierie sensible à leur réalisation dès la phase conception, ont pour vocation non seulement d'optimiser les systèmes de fondation mais encore d'alimenter les bases de données sur lesquelles se fondent les normes de dimensionnement de pieux. C'est pourquoi ces essais de chargements sont si essentiels à la compréhension du comportement du sol mais également à l'amélioration des caractéristiques de dimensionnement des pieux dans la norme.

Force est de constater que cette démarche de recherche est souvent exclue des marchés. Elle constitue pourtant un axe potentiellement important d'économie sur les chantiers de grande ampleur : en effet, ce test grandeur nature ouvre la porte à l'utilisation de techniques d'exécution plus rapides et plus économiques (comme cela est le cas sur le métro de Toulouse), mais aussi à des réductions de mise en œuvre de matière première. Cette démarche prend tout son sens dans le contexte économique et environnemental actuel.





© ARCADIS

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

4- Résultats des pressions limites au droit du site.
5- Résultats des teneurs en carbonates pour les deux tronçons de viaduc du projet.
6- Capteurs sur les cages d'armatures des pieux d'essais.

4- Limit pressure results on the site.
5- Carbonate content results for the two viaduct sections of the project.
6- Sensors on the test pile rebar cages.

TECHNIQUE ET RÉALISATION DU PLOT D'ESSAI

La technique de forage retenue pour ces essais est la tarière creuse continue. Le second objectif de la réalisation de ce plot était de valider que cette technique de foration pouvait être retenue dans les horizons molassiques, et ainsi constituer une optimisation sur les aspects planning et coût pour le projet de métro.

La particularité de cette technique réside dans le fait qu'une fois que le forage est terminé, le béton est directement coulé depuis la base de la tarière grâce à son acheminement à travers l'âme creuse de la tarière. Une fois que le béton est complètement coulé, l'armature est mise en place dans le béton frais : cela implique que les caractéristiques du béton à l'état frais soient excellentes pour pouvoir descendre une cage d'armature dans le béton.

Grâce à une expertise interne de Franki Fondation, toutes les formulations béton sont analysées au préalable des chantiers et sont testées aux premiers mètres cubes coulés : c'est ce travail qui a permis de descendre, sans aucune mise en vibration, les cages sur les 20 m de profondeur de pieux.

Le plot d'essai aura vu deux "types" de tarière creuse utilisés, en se référant au Fascicule 62 qui n'est aujourd'hui plus en vigueur (figure 7) :

→ La tarière creuse "type 2" qui implique que des enregistrements de paramètres soient présents dans la machine. Ce type correspond à un pieu de classe 2 - catégorie 6 de la NF P 94-262, soit ce que le marché demandait.

→ La tarière creuse "type 3" sous cahier des charges FrankiStar® : ces pieux hors marché représentent des essais de recherche, alimentant la base de données d'essais interne de Franki Fondation. Il constitue un des points majeurs de recherche et développement de Franki Fondation.

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

7- Tarières utilisées sur le chantier de pieux d'essais.

8- Virole métallique en tête de pieu.

7- Augers used on the test pile construction site.

8- Casing at head of pile.

Ce cahier des charges correspond à l'utilisation d'un outil spécifique de bétonnage qui permet d'insérer le béton frais lors du coulage du pieu 1 m sous le niveau du béton déjà coulé. Cet avantage technologique permet d'améliorer les conditions de bétonnage mais également les caractéristiques de portance des pieux par rapport à ce que propose la norme. Ce cahier de charges utilisé et certifié depuis plus de 10 ans est soumis à la validation par l'Université Gustave Eiffel et le Cerema via les EPG (évaluation des procédés géotechniques).

Au vu des bonnes caractéristiques géotechniques de la molasse avec présence possible de bancs rocheux, il a été nécessaire d'utiliser une machine de tarière creuse très puissante afin de pouvoir traverser les molasses saines (E_M jusqu'à 300 MPa).

Franki Fondation a mis à disposition une machine avec 30 tm de couple et 40 t de force d'appui sur l'outil nécessaires afin de pouvoir réaliser les pieux. Sans ces capacités importantes, il aurait été impossible de forer en diamètre 1 000 mm à 20 m. Cette machine s'est par ailleurs bien adaptée à l'exiguïté du site (600 m²) grâce à sa géométrie de déplacement et de mouvements. Outre le choix de machine, le choix d'outils spécialement préparés pour le chantier a également été un critère important de réussite du forage.

Afin d'accueillir le vérin et les efforts de chargement qu'il induit, les têtes de pieux ont été frettées avec une virole métallique (figure 8) : elle constitue la tête de pieu et permet d'avoir une arase parfaitement plane pour accueillir le vérin par la suite.

À un rythme moyen de trois pieux par jour, un peu moins de deux semaines de travaux auront été nécessaires pour s'installer sur le chantier, réaliser tous les pieux du plot d'essai et fermer le site en attente des essais.

Cette attente correspond au séchage du béton pour atteindre sa résistance maximale et à la cicatrisation du sol : c'est pourquoi 28 jours de repos sont nécessaires avant de pouvoir réaliser les essais de chargement.

Des points d'arrêt préalables à la mise en charge et essentiels afin de s'assurer de la pérennité de l'ouvrage ont été menés lors de cette attente :

→ Tous les pieux d'essai ainsi que deux pieux de réaction (armés toute hauteur avec des cages d'armatures et des barres de traction) étaient équipés de tubes soniques afin de vérifier la continuité intégrale et la qualité du bétonnage du pieu ;

→ Tous les pieux ont été testés en impédance.

Les 6 essais de chargement ont ensuite été menés en moins de deux semaines : ce délai, très court, est à souligner car jamais dans la profession il n'a été mené autant d'essais, à une charge aussi importante dans un délai aussi court. Cette rapidité a été rendue possible grâce à une conception du système de poutraison spécialement adaptée par Franki Fondation au chantier d'essai du métro de Toulouse (figure 9). Malgré la distance de plus de 10 m entre les pieux de réaction et son emprise au sol de 85 m², le système se veut tout de même simple, rapide à utiliser et efficace dans l'enchaînement de ce genre d'essai.

Tous les chargements ont dépassé les 800 t, pour atteindre un maximum de 1 200 t, ce qui n'avait été réalisé que peu de fois sur des pieux béton ces 10 dernières années : une vraie performance technique. ▷

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

Après 2 mois entre l'arrivée de la machine et la réalisation des essais, le site est alors remis en état avec le retrait des têtes de pieux pour que le site puisse retrouver ses fonctions originelles.

RÉSULTATS DES ESSAIS ET INTÉRÊTS POUR LE PROJET

Les essais de chargement de 800 à 1 200 t ont finalement permis de caractériser les paramètres géotechniques de la molasse tolosane grâce à l'analyse faite par l'Université Gustave Eiffel des capteurs installés dans les pieux d'essais.

Une pointe faible a été observée sur tous les résultats (k_p de l'ordre de 0,9), mais celle-ci n'a pas pour cause une mauvaise réalisation : en effet, des carottages béton sur toute la hauteur des pieux d'essai n'ont montré ni discontinuité de bétonnage, ni mauvais fond de pieu, ni différence entre chacun des pieux. Cela revient finalement à valider les essais soniques préalablement réalisés.

En revanche, un frottement très important (qs max = 265 kPa, soit près de 3 fois supérieur à celui que donne la norme pour un sol limoneux avec un qs max borné à 90 kPa) permet au global d'avoir une portance du pieu équivalente à celle que présente un pieu dans un horizon marneux. Cependant la transmission d'effort est bien plus grande en termes de frottement (environ 70 à 80 %) qu'en termes de pointe par rapport à ce qui était envisagé.

Le pieu ponctuellement le plus chargé à 1 200 t fait en quelque sorte exception : pour autant, de nouveaux sondages pressiométriques au droit du pieu n'ont montré aucune différence notable de nature et de caractéristiques de terrain par rapport aux sondages initiaux.

9

© PHOTOTHÈQUE FRANKI

9- Massif de chargement et vérin.

9- Loading foundation block and jack.

QUELQUES CHIFFRES

MONTANT TOTAL DES ESSAIS AVEC INTERPRÉTATIONS : 333 520 €
DURÉE DES ESSAIS : 4 mois sur site
DURÉE D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS ET INTÉGRATION AUX ÉTUDES PRO : 3 semaines
VOLUME DE BÉTON : 270 m³
VOLUME D'ACIER : 20 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Tisseo Ingénierie
MAÎTRE D'ŒUVRE : Arcadis
BUREAU DE CONTRÔLE : Bureau Veritas Construction
ENTREPRISE : Franki Fondation
PRESTATAIRE ESSAIS : Université Gustave Eiffel

Il est une nouvelle fois démontré que la géotechnique est un domaine où les incertitudes peuvent être réduites mais non totalement supprimées : malgré des essais nombreux, il s'avère impossible de garantir des dimensionnements sans la prise en compte de coefficients de sécurité dont la valeur est alors optimisée grâce à ces essais. □

ABSTRACT

STATIC LOAD TESTS ON PILES FOR TOULOUSE METRO LINE 3

CHARLOTTE COCHEZ, ARCADIS - EMILIEN MICHAUD, FRANKI FONDATION - JEAN-YVES DE LAMBALLERIE, TISSEO INGÉNIERIE

"Molasse tolosane" forms the substratum of the Toulouse region *in which numerous foundation systems are anchored. This formation of fluviatile origin, dating from the Oligocene-Miocene epoch, consists of several facies which may range from more or less sandy loams to fine to coarse sands, and even marly, calcareous and gravelly benches. Given the difficulty in assigning this heterogeneous material to a soil class as defined in French standard NF P 94-262, full-scale tests were planned in order to obtain the most accurate assessment. Based on these pile static load tests an evaluation was made of the bearing capacity and in particular the skin friction and peak forces.* □

PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA DE PILOTES PARA LA 3ª LÍNEA DE METRO DE TOULOUSE

CHARLOTTE COCHEZ, ARCADIS - EMILIEN MICHAUD, FRANKI FONDATION - JEAN-YVES DE LAMBALLERIE, TISSEO INGÉNIERIE

La *molasse tolosane* (molasa de la región de Toulouse) constituye el sustrato de esa región, *al que se anclan numerosos sistemas de cimentación. Esta formación de origen fluvial, del período del Oligoceno-Mioceno, está formada por varias facies, que van de limos más o menos arenosos a arenas finas a gruesas, y hasta bancos margosos, calizos y areniscosos. Dado que la conexión de este tipo de material heterogéneo a una clase de suelo como la definida en la norma NF P 94-262 es delicada, se han previsto pruebas a escala real para obtener la apreciación más exacta posible. Dichas pruebas de carga estática de pilotes han permitido realizar una evaluación de la capacidad portante y, en particular, de los esfuerzos de fricción lateral y del esfuerzo máximo.* □

BTP BANQUE
GROUPE CRÉDIT COOPÉRATIF
C'est le métier
qui parle
LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP
www.btp-banque.fr

1 © SFIE BATIGNOLLES FONDATIONS

DÉVIATION DE JARGEAU (45) - DES PIEUX DE FONDATIONS À L'ÉPREUVE DES KARSTS

AUTEURS : STÉPHANE GILBERT, INGÉNIEUR TRAVAUX, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - MANH HAI LE, INGÉNIEUR ÉTUDES / GÉOTECHNICIEN, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

LE DÉPARTEMENT DU LOIRET AMÉNAGE UNE DÉVIATION DE LA RD 921 ENTRE JARGEAU ET SAINT-DENIS-DE-L'HÔTEL. LES TRAVAUX SONT EN COURS. L'ENVIRONNEMENT PROTÉGÉ DE LA LOIRE COMBINÉ À LA PRÉSENCE DE CALCAIRES KARSTIQUES COMPLEXIFIE LA RÉALISATION DES FONDATIONS DE L'OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT DANS LE LIT MINEUR DE LA LOIRE, NÉCESSITANT D'ADAPTER LES TECHNIQUES DE CONCEPTION ET DE RÉALISATION DES PIEUX. L'INTÉGRATION COMPLÈTE DU RISQUE DE FONTIS DEMEURE UN ENJEU MAJEUR ET INCONTOURNABLE DU PROJET.

© GROUPEMENT

2

DESCRIPTION DU PROJET

Le pont de Jargeau est actuellement le premier ouvrage en amont de l'agglomération d'Orléans permettant de franchir la Loire. Il concentre les flux de plusieurs axes routiers structurants du département (D 2060 et D 960 au nord / D 951 et D 14 au sud de la Loire) et est emprunté par 15 000 véhicules / jour en moyenne, dont plus de 10 % de poids lourds. Afin de décongestionner et sécuriser les centres villes de Jargeau et Saint-Denis-de-l'Hôtel, une déviation de 14,7 km à 2 voies de circulation est en cours de construction. Cette déviation intègrera notamment un nouveau pont qui deviendra le seul franchissement non affecté par une crue de retour 200 ans de la Loire (figure 2).

1- Foreuse en position sur l'estacade.

2- Représentation en 3D du futur pont.

1- Drilling equipment in position on the temporary jetty.

2- 3D representation of the future bridge.

Le Département du Loiret, maître d'ouvrage du projet, a attribué le marché de franchissement de la Loire entre la D 951 et la D 960 sur une longueur de 4 180 m à un groupement de conception/réalisation. La conception est confiée à Strates, Sce, Secoa et Fondasol. La réalisation est assurée par Baudin Chateauneuf (Mandataire), Charier et Spie Batignolles Fondations (figure 3). Les travaux s'articulent principalement autour (figure 4) :

- → D'un ouvrage d'art franchissant la Loire, d'une longueur de 570 m. Cet ouvrage est composé d'un tablier mixte en caisson avec des travées principales de 115 m, reposant sur sept appuis construits en partie dans le lit mineur de la Loire et fondées chacune sur six pieux de diamètre 1 400 mm ;
- → D'un ouvrage de décharge, situé dans le lit endigué de la Loire, permettant d'atténuer les effets d'une crue exceptionnelle. Cet ouvrage, de longueur 75 m, est constitué de poutres en béton précontraint, reposant sur 4 appuis fondés sur des pieux de diamètre 1 400 mm ;
- → D'importants mouvements de terre permettant de connecter les ouvrages, en particulier le franchissement de la levée de la Loire, de rétablir la continuité paysagère et d'orienter les eaux du fleuve en cas de crue.

ENJEU ENVIRONNEMENTAL

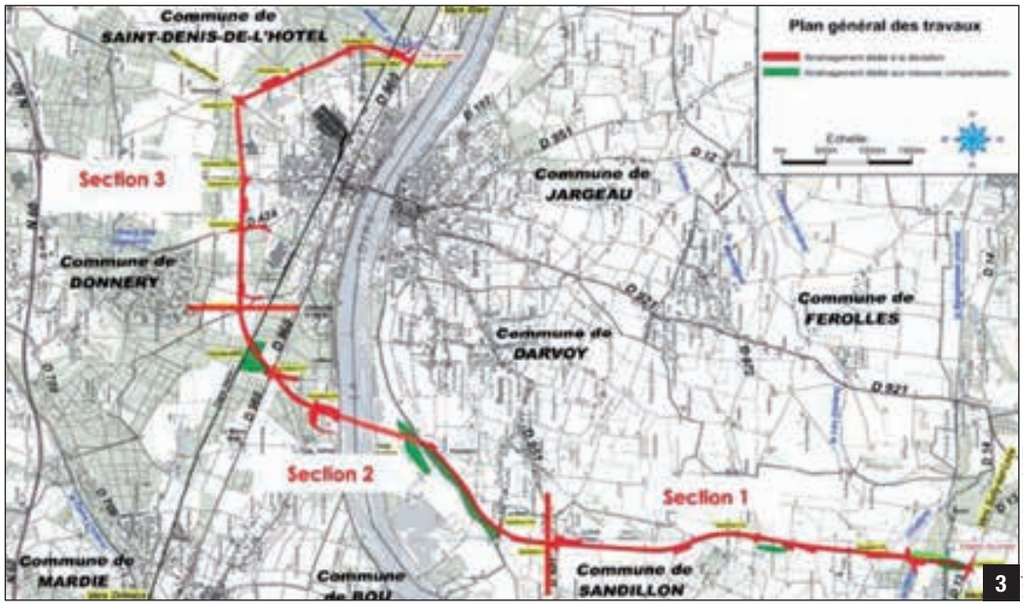
Le projet traverse un site classé Natura 2000, constitué notamment de plusieurs ZNIEFF (zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique) et protégé par deux directives européennes de type ZSC (Zone Spéciale de Conservation). L'enjeu environnemental est prégnant et modèle intégralement la conception et la construction de la déviation afin d'en limiter les effets sur l'environnement. ▷

3- Tracé de la déviation.

4- Position des ouvrages du projet.

3- Alignment of the diversion.

4- Position of the project works.



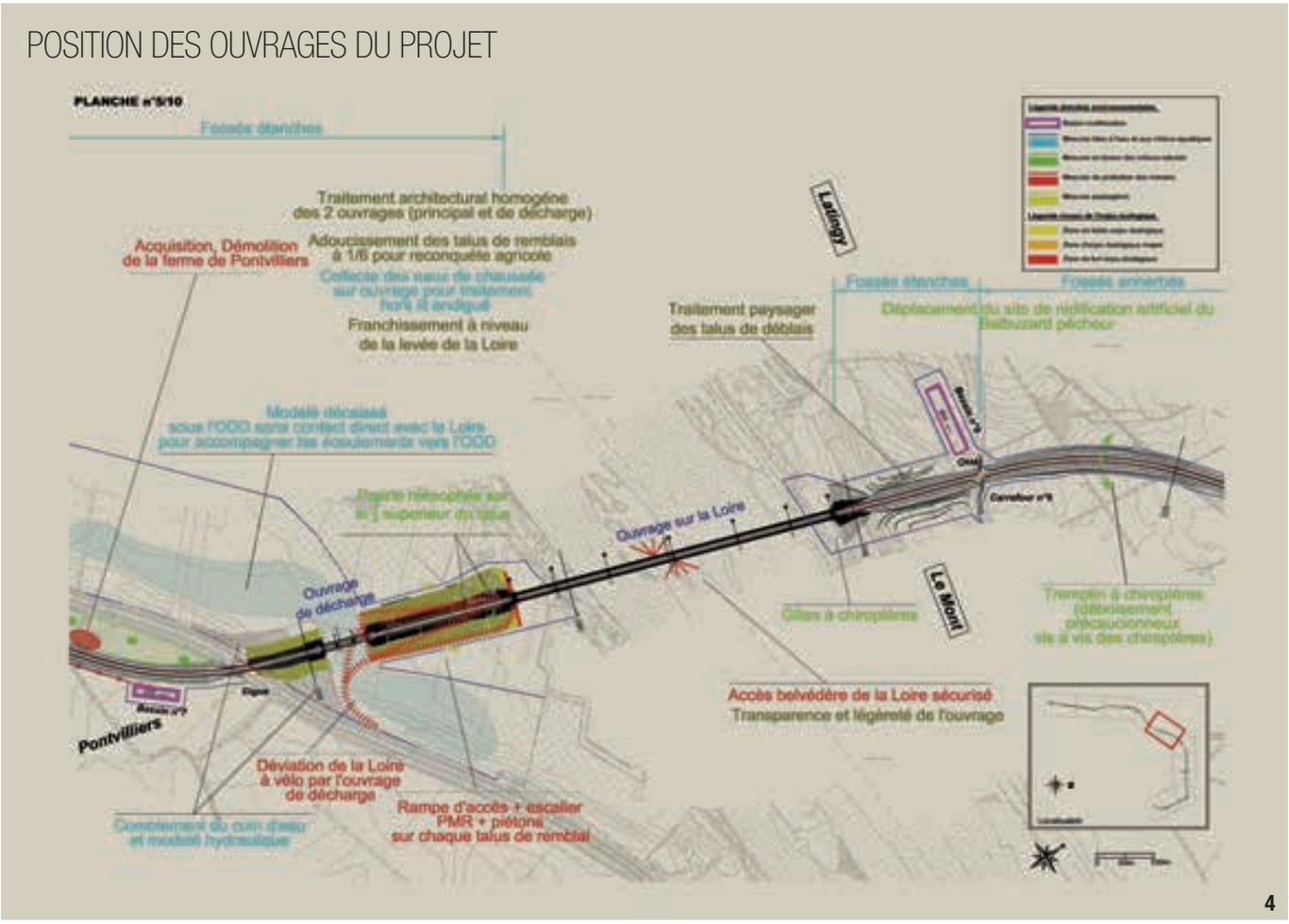
© DÉPARTEMENT DU LOIRET

Le Département du Loiret consacre un budget d'environ 10 M€ à des actions pour éviter, réduire et compenser l'impact sur l'environnement et la biodiversité sur l'ensemble du projet, soit près de 10 % de son coût.

La protection des espèces protégées est assurée, en phase travaux et en exploitation, par la reconstitution des habitats - plateforme à balbuzard -, par l'isolement du chantier vis-à-vis des amphibiens et de la petite faune - barrières à batraciens puis crapauducs -, ou encore par la création d'aménagements sécurisés pour les chauves-souris (figure 5).

La configuration des remblais permet, par le biais d'un modèle de modelé-décaissé, de restituer des zones humides pour préserver la biodiversité et d'adoucir les talus en lien avec le contexte écologique (continuité forestière, banquettes végétalisées ...). Le calendrier des travaux est ajusté au cycle de vie de la faune. En particulier, les travaux de fondations dans le lit mineur de la Loire ne sont pas possibles entre les mois de mars et juillet, nécessitant d'adapter le phasage du projet.

La ressource en eau est protégée des pollutions par la mise en place de rétentions provisoires en phase travaux, puis par la création de fossés étanches au droit des périmètres de protection des captages et par la création de



© DÉPARTEMENT DU LOIRET

bassins multifonctions pour piéger les pollutions issues des voies de circulation. Les écoulements naturels sont préservés par la réalisation de fossés ou ouvrages hydrauliques assurant la continuité des bassins versants, et par l'adaptation des fondations des ouvrages pour garantir les circulations souterraines.

CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Les pieux des ouvrages sont situés dans les lits majeur et mineur de la Loire.

Les formations géologiques traversées sont les alluvions de la Loire sur une épaisseur de 2 à 10 m, les calcaires de Pithiviers d'une épaisseur de 15 à 20 m, la molasse du Gâtinais sur une épaisseur de 5 m et le calcaire d'Étampes. Les calcaires de Pithiviers ont la particularité d'être vacuolaires. Au contact de l'eau chargée en acide carbonique, le carbonate de calcium de la roche se dissout puis est entraîné par la nappe, formant alors des cavités et des conduits : les karsts (figure 6). Ces karsts présentent une grande variabilité dans leurs dimensions (millimétriques à métriques) et peuvent être traversés par des écoulements hydrauliques rapides (100 à 200 m/h).

RISQUE GÉOTECHNIQUE

Ce contexte de calcaire karstifié est sensible pour les fondations des ouvrages, puisqu'il peut être à l'origine de l'apparition de fontis profonds et de grand diamètre, générés par des processus de rupture du toit calcaire ou par suffosion. La connaissance de ces karsts devient ainsi un enjeu géotechnique et structurel majeur dans toutes les phases du projet.

5

© DÉPARTEMENT DU LOIRET

5- Balbuzard.

6- Représentation des karsts.

5- Osprey.

6- Illustration of karsts.

À ce titre, la quantité de sondages géotechniques et d'investigations géophysiques est aussi indispensable qu'exceptionnelle.

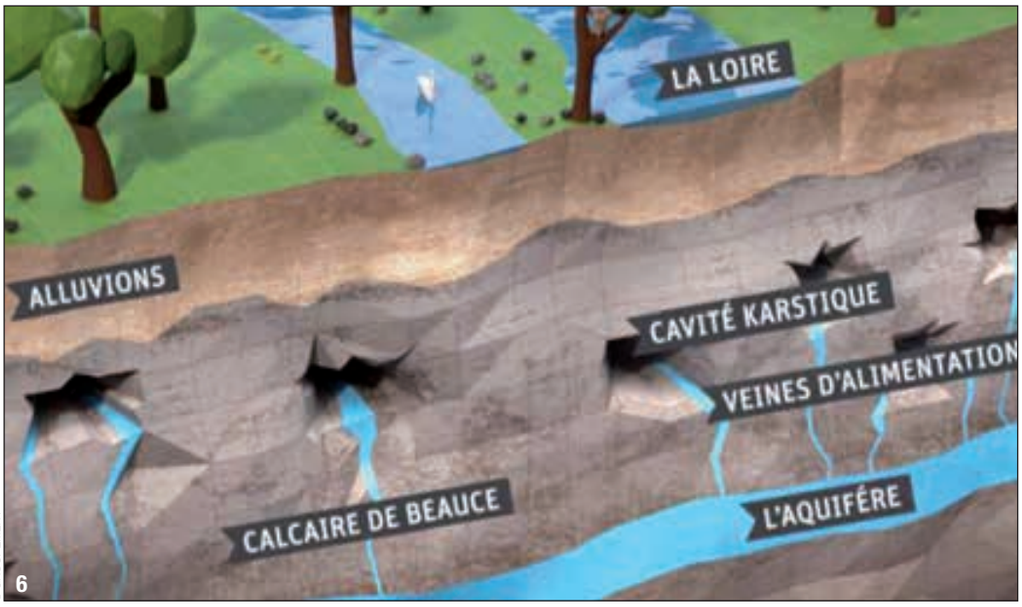
Plus de 100 sondages (pressiométriques, destructifs et carottés) quadrillent les 7 appuis du viaduc, pour une longueur totale de près de 4 km de forages. En rive gauche, une cinquantaine de sondages géotechniques quadrillent les 4 futurs appuis de l'ouvrage de décharge. Ces différentes investigations complètent la campagne géotechnique de la phase G2 AVP réalisée par le Brgm en rive gauche, qui se caractérise notamment par les résultats d'une centaine d'essais au pénétromètre statique ainsi que le résultat des investigations hydrogéotechniques et géophysiques pointues. On citera par exemple la réalisation de mesures par micro-gravimétrie via 2 000 stations (mesure des variations infimes du champ de pesanteur terrestre pour cartographier les zones de faible densité), de mesures par tomographie de résistivité électrique via 100 électrodes (mesure de la résistivité des terrains selon la profondeur pour déterminer les formations altérées), le survol aérien par drones pour identifier les zones de dépressions ou encore le traçage colorimétrique et par saumure des eaux de la nappe en complément des mesures piézomètres et essais au micro-moulinet.

PRÉSERVATION HYDROLOGIQUE

Le contexte hydrogéologique est particulièrement sensible. La Loire alimente en effet la majeure partie du système aquifère du Val d'Orléans. Au droit du projet notamment, une partie du débit de la Loire disparaît. Une fraction des eaux perdues réapparaît, via les conduits karstiques interconnectés, à la source du Bouillon située à une dizaine de kilomètres. Cette résurgence forme la rivière Loiret. Le maintien de ces conduits karstiques est donc essentiel, rendant impossible des injections de sol préalables.

L'identification fine des risques karstiques au droit de chaque pieu permet d'adapter la conception du projet. Par exemple, la réalisation d'un sondage destructif au droit d'un pieu d'une culée, couplé à un passage caméra et à une mesure échométrie sonar, a mis en évidence un conduit karstique d'une épaisseur de 1,80 m traversé par une forte circulation hydraulique. Afin de préserver ce conduit, une ligne de pieux a été déplacée.

Malgré l'ensemble de ces connaissances, la présence de conduits karstiques de petite taille reste possible au droit des pieux. Le fonctionnement en un système de conduits anastomosés nécessite de prendre des dispositions particulières lors de la réalisation des pieux des ouvrages, afin d'éviter des pertes massives de béton remplissant les conduits. Pour cette raison, les pieux des ouvrages sont réalisés à l'aide d'un système combiné d'une gaine métallique et d'une "chaussette" dans les zones d'aléas karstiques.



6

© GROUPEMENT

ÉTUDES DE CONCEPTION DES FONDATIONS

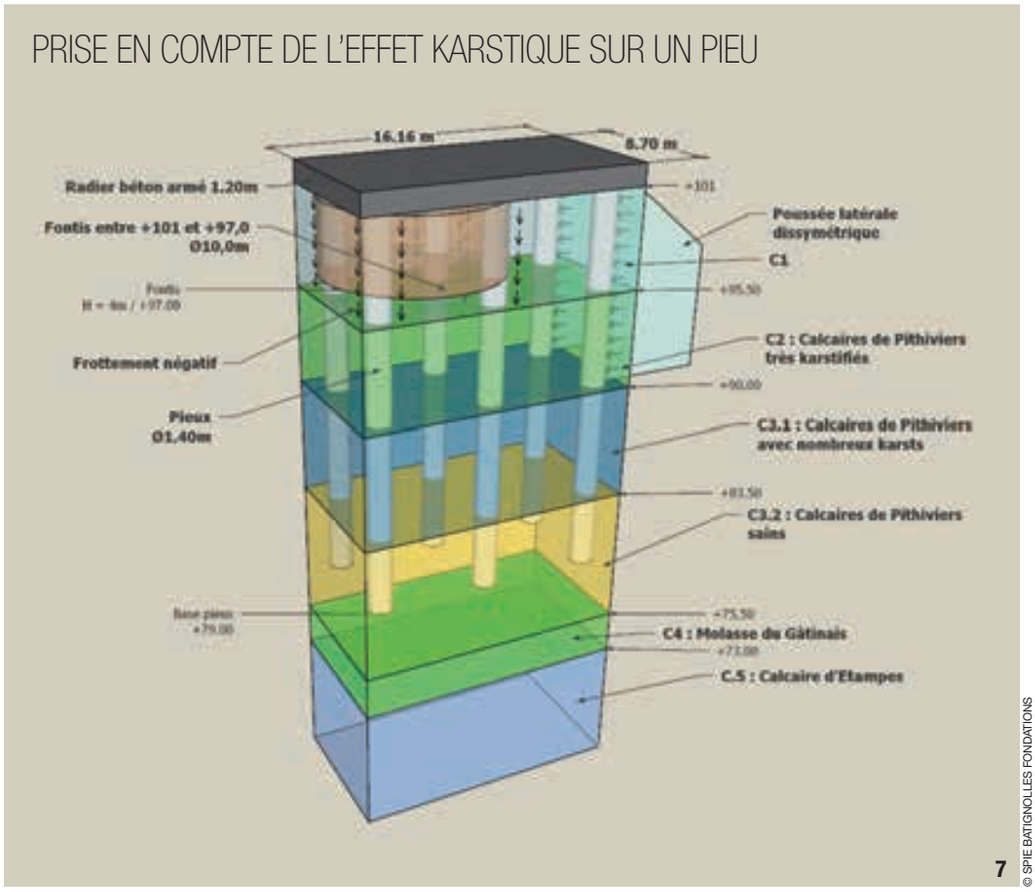
CONCEPTION DE FONDATION

Selon les résultats des travaux des investigations géotechniques et au vu de l'imprévisibilité de l'occurrence karstique à l'échelle de l'ouvrage, la solution de fondations sur pieux pour l'ensemble des appuis a été retenue dans les études de conception et de prédimensionnement menées par Fondasol, responsable des études géotechniques au sein du groupement d'entreprises. Les appuis seront fondés sur des pieux 1 400 mm de diamètre et ancrés dans les calcaires sains (calcaire de Pithiviers) au-delà de tout niveau karstique identifié dans les sondages. ▷

PRISE EN COMPTE DE FONTIS

Une des premières étapes dans les études de conception de fondation du projet a été de définir une action karstique accidentelle, représentative de l'aléa rencontré ; cette action n'est actuellement pas normalisée au sein de l'Eurocode 7 et les normes géotechniques nationales.

Les études approfondies menées par le Brgm pour le département du Loiret ont permis de proposer un aléa fontis de référence sectorisé, pouvant



7

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

7- Prise en compte de l'effet karstique sur un pieu.

8- Vue d'une des deux estacades - Bétonnage d'un pieu de pile.

7- Allowance for karstic effect on a pile.

8- View of one of the two jetties - concreting a pier pile.

8

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

9- Battage des gaines métalliques.
10- Bucket de forage.

9- Casings driving.
10- Drilling bucket.

considérer une cavité ou un effondrement jusque 11,5 m de diamètre et sur une profondeur de 7 m. Partant de cette hypothèse, la conception et le dimensionnement de la fondation des appuis de l'ouvrage devront prendre en compte la présence des terrains alluvionnaires sableux et de la couche très karstifiée sous-jacente, c'est-à-dire l'apparition d'un karst déstabilisant et générant des efforts parasites aux fondations.

COMBINAISON DE CHARGE AVEC FONTIS

La justification de l'ouvrage avec la prise en compte de l'apparition d'un fontis au droit de la semelle de l'appui est un cas de charge accidentel à vérifier ; il est donc nécessaire de garantir la robustesse suffisante de l'ouvrage pour la sécurité des usagers.

Les bureaux d'études du groupement ont défini une combinaison de charge karstique, de type accidentel, permettant de procéder à ces calculs de justification. La combinaison envisagée est la suivante : ELU accidentel type karst = ELS fréquent + Eak.

ELS fréquent : descente de charge de l'ouvrage sur l'appui. Cette action est définie par les calculs de structure de l'ouvrage.

Eak : la configuration karstique (vide sous la semelle) déterminée par les modèles de calculs géotechniques menés par Fondasol.

MODÈLE DE CALCUL

Les semelles en béton armé des appuis ont des dimensions de 7 m de largeur et de 11 m à 16 m de longueur et reposent sur 6 pieux de 1400 mm de diamètre et espacés de 4,2 m minimum. Ce phénomène de karst peut se produire n'importe où. Les études de Fondasol ont envisagé les situations différentes afin de définir les sollicitations les plus défavorables possibles dans les pieux (figure 7).

9
© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

10
© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

Par exemple pour la culée C6, 4 configurations ont été considérées :

1- Le fontis s'ouvre à l'opposé du remblai ;

2- Le fontis vide le centre de la semelle englobant les 6 pieux ;

3- Le fontis intéresse le bord de semelle englobant seulement 4 pieux ;

4- Le fontis vide le pied des remblais au droit de 3 pieux.

Dans chaque configuration de calculs, une dégradation des paramètres mécaniques de terrain des couches superficielles est considérée. Concrètement, dans le modèle de calcul de pieux, l'action parasite de l'apparition du fontis sur les pieux se manifeste en i) un effort de frottement négatif dus au déplacement des sols vers le bas ii) une dissymétrie de poussée latérale des terres appliquées sur le pieu.

La prise en compte de fontis au droit des appuis de l'ouvrage est menée pour chaque appui dans des modèles de calcul spécifiques. Pour donner un exemple, au droit des culées C0 et C6, les efforts parasites dus au fontis sont très importants : l'effort du frottement négatif peut aller jusqu'à 200 t et un moment de flexion en tête du pieu peut dépasser 500 t.m pour un pieu.

11

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

En service, un pieu reprend un effort axial compressif de 700 t environ selon les appuis.

RÉALISATION DES TRAVAUX

TRAVAUX SUR ESTACADE

Le premier défi à relever est d'accéder à chaque appui afin de réaliser les pieux, les semelles et les piles. Pour limiter l'impact sur l'écosystème, sécuriser les travaux avec un niveau de la Loire variable et se prémunir des risques de fontis en phase travaux, deux estacades de longueur totale 250 m et de largeur 7,80 m sont

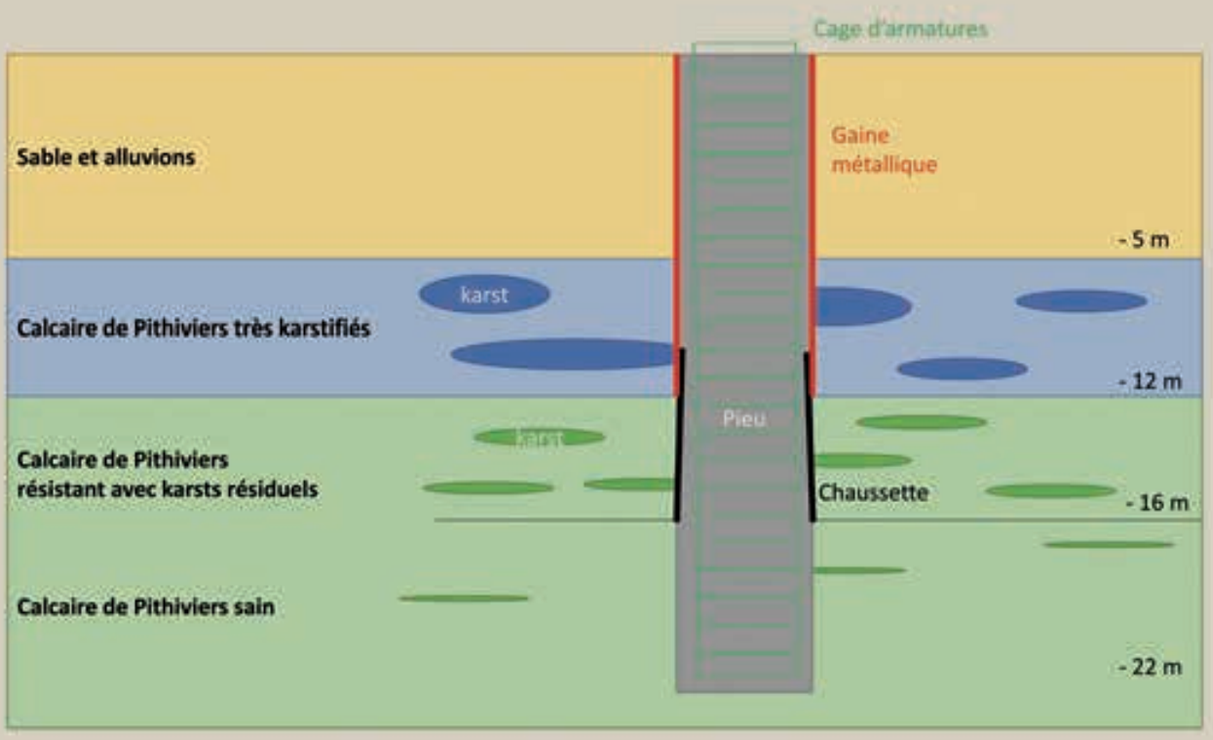
11- Pieu d'essai équipé d'une " chaussette ".

12- Équipement du pieu en fonction de la géologie.

11- Test pile fitted with a "sock".

12- Pile equipment according to the geology.

ÉQUIPEMENT DU PIEU EN FONCTION DE LA GÉOLOGIE



12

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

construites dans le lit mineur du fleuve depuis chaque rive, parallèlement au futur pont (figure 8).
Ces estacades sont fondées sur 52 tubes de diamètre 813 mm, vibrofoncés et battus, ancrés dans le calcaire de Pithiviers. L'alignement et la régularité des espacements entre tubes sont assurés par l'utilisation d'un guide tiroir, qui coulisse sous l'estacade en cours de construction et qui permet ensuite de poser chaque travée de manière sécurisée. Au droit de chaque appui du futur pont, des antennes secondaires sont édifiées via la mise en fiche de 6 tubes de diamètre 914 mm.
Des batardeaux de 7 x 11,5 m sont réalisés à l'aide de rideaux de palplanches AU18, soutenus par des liernes de type HEB550 et équilibré hydrauliquement par un bouchon immergé en béton d'une épaisseur de 2 m. Ils permettent de réaliser les phases de recépage des pieux et d'édification des semelles et piles à l'abri du fleuve.

RÉALISATION DES PIEUX

La vaste campagne d'essais géotechniques permet d'identifier les épaisseurs de calcaire de Pithiviers très karstifiées. Pour intégrer le risque d'effondrement par fontis sur l'épaisseur de cet horizon, des tubes métalliques de diamètre 1 420 mm et de longueur variable adaptées aux zones karstiques (13 m à 22 m) sont vibrofoncés puis battus à l'aide d'un marteau hydraulique d'énergie maximale 70 kNm (figure 9).
Les pieux de fondations sont ensuite réalisés à l'abri de ce tubage définitif, par la technique du foré simple. D'une longueur de 20 m à 35 m, les pieux sont ancrés dans le calcaire de Pithiviers sain ou dans le calcaire d'Etampes. Localement, les pieux peuvent être approfondis en cas de mise en évidence, lors du forage, de terrains très fracturés. Le forage est effectué principalement par l'utilisation d'un bucket double à dent rocher, de diamètre 1 350 mm (figure 10). Ponctuellement, une tarière double à dent rocher et un carottier peuvent être utilisés. Ces outils sont montés sur une foreuse de forte puissance (Bauer BG40) développant un couple de rotation de 390 kNm (figure 1).
Lorsque la profondeur de forage est atteinte, la base du pieu est nettoyée à l'aide d'un bucket de curage, puis la cage d'armatures est mise en œuvre avant de procéder au bétonnage du pieu à l'aide d'une colonne de bétonnage. La hauteur de la gaine métallique permet d'éviter les pertes de béton et les remplissages des conduits karstiques sur les terrains les plus fracturés. Sous la base du tube, une frange de terrain présente encore des conduits karstiques. Afin de ne pas les combler, un géotextile à base de polyamide, appelé chaussette à béton, est mis en place autour de la cage d'armatures sur la hauteur du calcaire de Pithiviers moyennement karstifié. Cette gaine est attachée sur la cage d'armatures à l'aide de sangles en tissu (figure 11). L'enrobage est assuré par des écarteurs positionnés entre la cage d'armatures et la chaussette à béton. Sur sa base, un joint torique est enroulé autour du géotextile et permet d'éviter le contournement du béton dans l'espace annulaire résiduel entre la chaussette à béton et le nu du forage. Avec la charge du béton lors du bétonnage du pieu, la gaine s'étend pour se coller au diamètre du forage. L'élasticité du tissu étant limitée, les vides résiduels ne sont alors pas comblés.

PRINCIPALES QUANTITÉS

NOMBRE D'APPUIS : 11
NOMBRE DE PIEUX : 54
DIAMÈTRE DES PIEUX : 1400 mm
PROFONDEUR DES PIEUX : 20 à 35 m
VOLUME BÉTON : 2 200 m³
POIDS D'ARMATURES : 150 t
LONGUEUR DE CHAUSSETTES : 400 m
LONGUEUR DE GAINES MÉTALLIQUES : 950 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Département du Loiret
ASSISTANT MAÎTRISE D'OUVRAGE : Arcadis / Aei
MAÎTRISE D'ŒUVRE INTÉGRÉE AU GROUPEMENT :
Sce / Secoa / Fondasol / Strates
CONSTRUCTEURS :
Baudin Châteauneuf / Charier TP / Spie Batignolles Fondations

Afin de valider et d'industrialiser ce système de chaussettes à béton pour l'ensemble du projet, un essai de pieu préalable est réalisé, dans les mêmes conditions qu'un pieu de l'ouvrage. Sur la hauteur gainée, la surconsommation béton est inférieure à 12 %, avec une mise en œuvre simple sur le chantier. Le système est alors adopté pour la suite du projet (figure 12).

PHASAGE DES TRAVAUX

Le phasage général des travaux de pieux s'articule autour du lancement de la charpente métallique (sens nord -> sud), des contraintes écologiques (interruption des travaux entre le 15 mars et le 1er août sur le lit mineur de la Loire) et des contraintes géotechniques (intervention après stabilisation des remblais de pré-chargement sur l'ouvrage de décharge).
La distance entre chaque appui est importante (plus de 80 m) et ne permet pas de réaliser les pieux simultanément sur deux appuis. Sur chaque appui de 6 pieux, les pieux sont réalisés successivement, sans recouvrement d'une phase forage d'un pieu et de bétonnage d'un autre pieu. En effet, les estacades secondaires sont étroites et ne permettent pas la superposition des tâches. Il faut d'ailleurs déplacer des plateaux lourds pour chaque ligne de pieux (3 lignes). Surtout et malgré un espacement entre pieux supérieur à 3 diamètres, le risque de communication du béton par le biais d'un karst avec un pieu en cours de forage reste possible dans les couches de calcaire sain.

POINT D'ÉTAPE

Les travaux de pieux de fondations sont presque terminés. La construction des piles se poursuit et le lancement du tablier a démarré. L'ouverture de la déviation est prévue pour début 2025. □

ABSTRACT

JARGEAU DIVERSION - KARST-RESISTANT FOUNDATION PILES

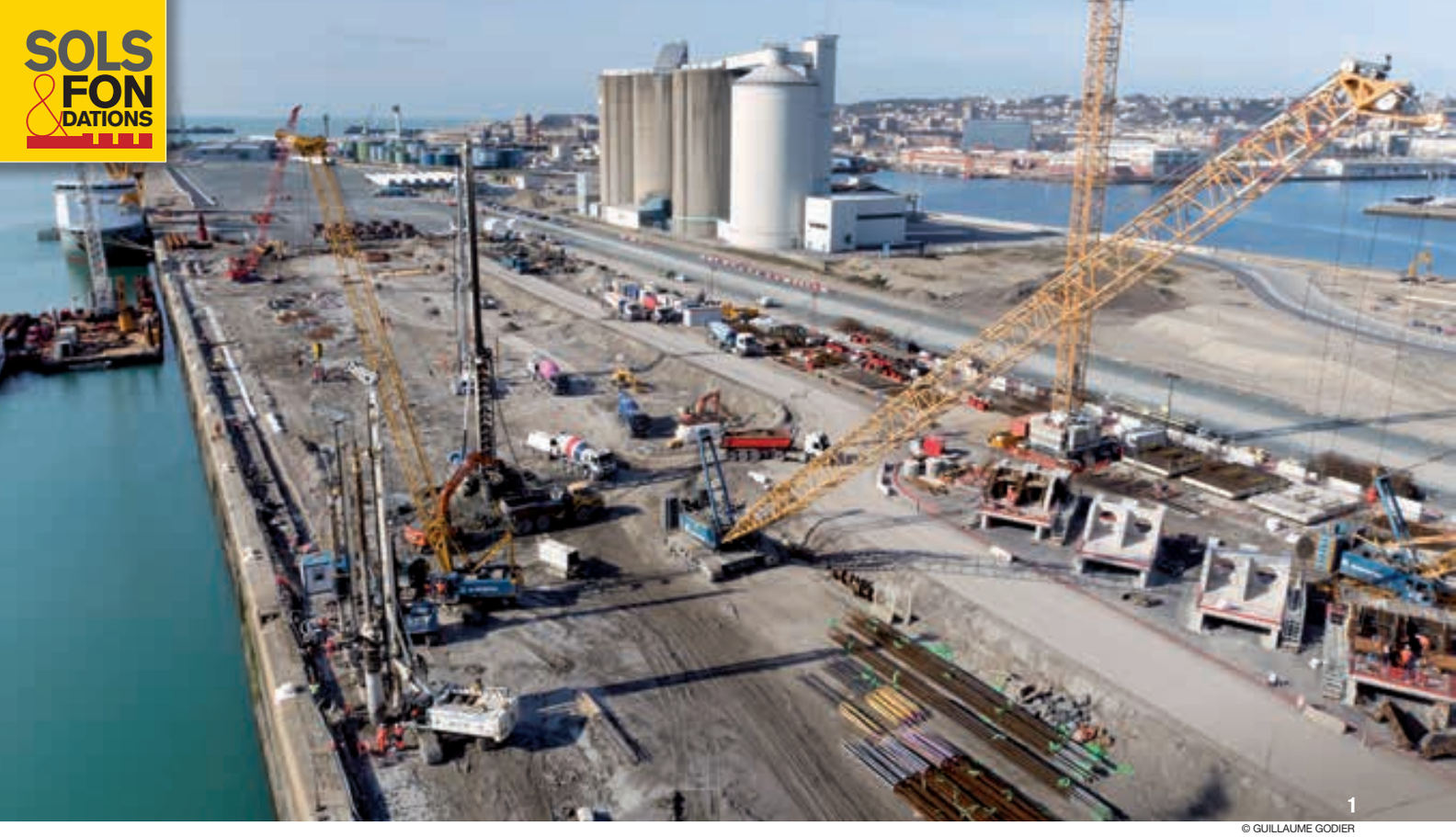
STÉPHANE GILBERT, INGÉNIEUR TRAVAUX, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - MANH HAI LE, INGÉNIEUR ÉTUDES/GÉOTECHNICIEN, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

A new bridge is being built over the Loire River east of Orléans, *in a protected environment. The 54 foundation piles, 1400 mm in diameter, pass through Pithiviers limestones which are karstified. This geological horizon represents a major risk of collapse due to subsidence cavity, causing a risk of structure failure. The bridge must not disturb underground hydraulic flows. The design engineering takes into account these risks in the calculations and in defining methods. The piles are executed sheltered by a steel casing on the most fractured horizons, and using a polyamide sheath in moderately fractured horizons.* □

DESVIACIÓN DE JARGEAU (45) - PILOTES DE CIMENTACIÓN A PRUEBA DE KARSTS

STÉPHANE GILBERT, INGÉNIEUR TRAVAUX, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - MANH HAI LE, INGÉNIEUR ÉTUDES/GÉOTECHNICIEN, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

Se está construyendo un nuevo puente en el Loira, al este de Orleans, *en un entorno protegido. Los 54 pilotes de cimentación, de 1400 mm de diámetro, atraviesan los terrenos calcáreos de Pithiviers, que están karstificados. Este horizonte geológico presenta un grave riesgo de hundimiento por socavón, lo que implica un riesgo de ruptura de la construcción. La obra no debe perturbar los flujos hidráulicos subterráneos. Los estudios de diseño incluyen estos riesgos en los cálculos y en la definición de los métodos. Los pilotes se realizan protegidos por un entubado metálico en los horizontes más fracturados y utilizando un revestimiento de poliamida en los horizontes medianamente fracturados.* □



© GUILLAUME GODIER

QUAI JOANNÈS COUVERT AU HAVRE - RENFORCEMENT D'UN QUAI DE 400 m DANS LE CADRE D'UN PROJET ÉOLIEN

AUTEURS : PHILIPPE LEGRAND, DIRECTEUR BUREAU D'ÉTUDES, NGE FONDATIONS - THOMAS LE COR, RESPONSABLE ÉTUDES PRINCIPAL, NGE FONDATIONS - ARNAUD L'HUISSIER, RESPONSABLE D'EXPLOITATION, NGE FONDATIONS

LE PROJET DE RENFORCEMENT DU QUAI JOANNÈS COUVERT AU HAVRE S'INSCRIT DANS LE CADRE DE L'ACCUEIL D'ACTIVITÉS EN LIEN AVEC L'INSTALLATION DE PARCS ÉOLIENS OFFSHORE. LES TRAVAUX, QUI S'ÉTALERONT JUSQU'À DÉBUT 2023, COMPRENNENT LA RÉALISATION DE DEUX QUAIS D'ENVIRON 200 m DE LONG CHACUN S'APPUYANT SUR LA STRUCTURE DE QUAI EXISTANTE. NGE FONDATIONS INTERVIENT POUR LA RÉALISATION DES PIEUX DE FONDATION DU PROJET AINSI QUE POUR LA RÉALISATION DES INCLUSIONS RIGIDES NÉCESSAIRES AU RENFORCEMENT DE LA PLATEFORME D'ÉVOLUTION DES GRUES D'EXPLOITATION.

PRÉSENTATION DU PROJET

Dans le cadre du développement des activités liées à l'éolien offshore en France, des travaux de renforcement du quai Joannès Couvert (figure 2) ont été attribués par Haropa Port - Le Havre à un groupement d'entreprises composé d'Eiffage Génie Civil (mandataire), Etpo, Etmf, Nge Fondations et Sdi. Le projet consiste à renforcer environ 400 m de quai existant en maçonnerie, dans un état plus ou moins altéré, afin de le rendre apte à recevoir des opérations de chargement/déchargement de composants d'éoliennes (colis et grues lourdes de manutention).

Le projet se décompose en deux zones liées aux futures opérations d'exploitation :

- → Un quai dit "Jack-Up", sur environ 200 m, dédié à l'accueil des navires auto-élévateurs (prenant appui au fond de la mer) et équipés de grues à bord permettant le chargement de composants lourds d'éoliennes ;
- → Un quai dit "Lo-Lo", sur environ 200 m également, permettant le chargement de différents composants via des grues lourdes sur le quai.

Chaque quai se décompose en deux zones (figure 3). Une zone dite "Maritime" qui consiste en une structure tablier-poutres fondée sur pieux (réalisés selon différentes techniques) et prenant partiellement appui sur le quai existant. Une zone dite "Terrestre" qui consiste à renforcer le sol en place avec un réseau d'inclusions rigides surmonté d'une plateforme de transfert de charges (PFTC) de 2,5 m d'épaisseur en matériau granulaire armée par géogrilles.

1- Vue d'ensemble des travaux de fondations.

1- General view of foundation works.

Les études d'exécution du projet sont réparties entre plusieurs intervenants : le bureau d'études interne d'Eiffage (Biep) réalise les études de structure de la zone maritime, Fugro (géotechnicien du groupement) réalise les études géotechniques, le bureau d'études interne Nge Fondations réalise les plans d'exécution des pieux et les études du renforcement par inclusions rigides (études confiées à Egis géotechnique

© IGN, RÉGION NORMANDIE

2

en sous-traitance) et enfin le bureau d'études Geomod réalise une modélisation 3D éléments finis d'une tranche de 60 m du quai Jack-Up.

L'intégralité des travaux de fondations du projet, à l'exception de la file de pieux maritimes (réalisée par Etpo/Etmf), est réalisée par Nge Fondations. La suite présente les spécificités des travaux de fondations du projet en suivant la structure du quai, de la zone maritime vers la zone terrestre.

2- Vue satellite de la zone du projet.

3- Coupe type du projet.

2- Satellite view of project area.

3- Typical cross section of the project.

FONDATIONS PROFONDES DE LA ZONE " MARITIME "

FILE MARITIME : TRAITEMENT DE TERRAIN

La succession lithologique type du projet est visible sur le tableau 1, avec pour particularité la présence sur une partie du quai Lo-Lo d'une couche de Silts présentant de moins bonnes qualités mécaniques et intercalée entre les Sables Gris Verts et les Graves du Fond (horizons porteurs).

La portance des fondations s'en trouve réduite. Les pieux métalliques ouverts de la file maritime sont mis en œuvre par battage et ancrés dans les Graves de Fond. Ils ont été équipés d'un diaphragme ouvert afin d'améliorer la portance. Afin de pallier un risque de caractéristiques moins bonnes ponctuellement dans les Graves et donc un défaut de portance, des plots d'essai de jet grouting et d'injection ont été réalisés afin de permettre et valider une amélioration de la résistance de pointe de cet horizon.

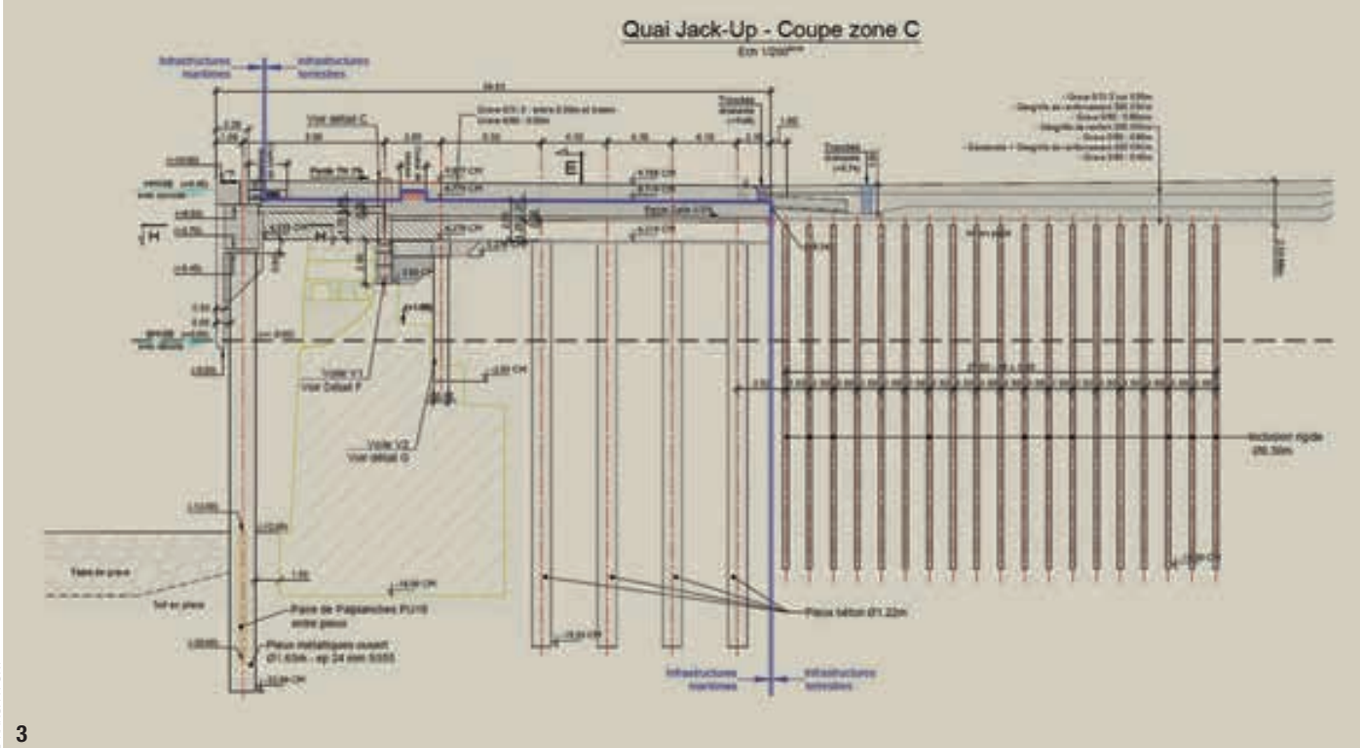
Pour la bonne exécution au travers du tube mis en place, un dispositif de guidage a été spécialement conçu pour le chantier afin de s'assurer du passage du diaphragme situé à 32 m de profondeur (figure 4). La zone concernée par cette problématique n'a pas encore été réalisée.

VOILES V1 ET V2 : PIEUX FORÉS TUBÉS

Dans la conception initiale du projet, deux voiles (V1 et V2 sur la figure 3), supportant la nouvelle structure de quai et s'appuyant sur le quai existant en maçonnerie, prévus réalisés en génie civil.

En phase d'appel d'offres et en cours d'exécution, du fait des contraintes fortes de réalisation de ces voiles, ▷

COUPE TYPE DU PROJET



© HAROPA PORT

3

sous le niveau de la mer une grande partie du temps, leur mise en œuvre a été intégralement variantée en pieux forés tubés à l'avancement de diamètre 900 mm (figure 5).

Le tube est mis en place jusqu'à s'ancrer dans la maçonnerie où le forage est poursuivi au kelly seul. L'intégralité des pieux a été équipée de tubes d'auscultation sonique et de tubes de carottage, le caractère aléatoire de la maçonnerie a pu être maîtrisé grâce à la réalisation d'essai de compression sur des carottes prélevées en fond de pieu. Cela a permis de s'assurer que la maçonnerie présentait des caractéristiques mécaniques suffisantes pour supporter la charge apportée par la nouvelle structure.

Le quai Joannès Couvert a été fortement endommagé lors de la seconde guerre mondiale et, malgré des travaux de reconstruction entrepris depuis, des zones fortement dégradées subsistent. Ceci induit un risque de départ de fines et donc d'affouillement sous la nouvelle structure avec l'assaut des marées. Pour limiter ce phénomène, une paroi de pieux sécants forés à la tarière creuse est réalisée contre les pieux du voile V1. Ces pieux viennent s'ancrer de quelques dizaines de centimètres dans la maçonnerie du quai permettant ainsi de bloquer les départs de fines sous le quai.

Les pieux du voile V2 sont réalisés selon la même méthodologie que ceux du voile V1 (figure 6). Il est composé d'une succession de groupes de 3 pieux, chaque groupe supportant une poutre principale de la structure. Plus de 2 m d'ancrage dans la maçonnerie se sont révélés nécessaires afin d'éviter des phénomènes de rupture localisée de la maçonnerie du quai existant.

PIEUX FORÉS À LA TARIÈRE CREUSE

Le reste de la nouvelle structure de quai est fondée, au-delà du quai existant, par trois à quatre files de pieux Ø 1 220 mm, positionnées au droit des poutres principales et réalisés à la tarière creuse.

La conception et la réalisation de ces pieux s'est révélée complexe à plusieurs égards. Tout d'abord, afin de limiter la longueur des fondations, des essais de traction préalables ont été réalisés dans les remblais afin d'intégrer un frottement sur la hauteur de cet horizon dans le dimensionnement des pieux. Par ailleurs, Nge Fondations qui réalisait en parallèle les travaux de fondations du quai Hermann du Pasquier (HDP), à proximité immédiate du quai Joannès Couvert, a pu bénéficier du retour d'expérience de ce chantier dans la réalisation des pieux tarière creuse à grande profondeur et dans les terrains du Havre. A été mise en évidence une problématique de pression exercée par le terrain empêchant d'assurer une parfaite mise en œuvre du béton dans le pieu et conduisant à la problématique d'enfoncement de cage toute hauteur. La procédure de réalisation des pieux tarière creuse sur le chantier de JCV a donc été rédigée naturellement en conséquence et dans ce sens afin de bénéficier des essais réalisés sur HDP.

TABLEAU 1 : LA STRATIGRAPHIE DU PROJET

Terrain	Quai Jack-Up Base Couche [CMH]	Quai Lo-Lo Base Couche [CMH]
PFT	+8,50	+8,50
Remblais	+0,50	+0,50
Grève de Galets	-1,40	-1,30
Dépôts Récents Silteux	-9,00	-9,60
Sables Gris Vert	-17,60	-19,20
Silts Inférieurs	-	-24,40
Graves de Fond	-24,20	-29,00
Argiles de Villerville	Au-delà	Au-delà

© NGE FONDATIONS

Il a également fallu revoir la conception des cages d'armatures afin de garantir leur bonne mise en œuvre sur des hauteurs de plus de 25 m. Pour cela, l'enrobage des parties basses des cages des pieux tarière creuse a été porté à 15 cm contre 10 cm en tête. Ce parti-pris d'avoir un enrobage variable sur la hauteur de la cage d'armature a complexifié leur fabrication mais a permis de ne pas majorer les quantités d'armatures mises en œuvre puisque l'enrobage était minimal en tête de pieux permettant ainsi un meilleur travail de la section béton armé là où les efforts étaient les plus importants. D'autre part, l'enrobage majoré sur la partie basse a permis de limiter le risque de refus lors de la mise en place des cages dans les pieux bétonnés.

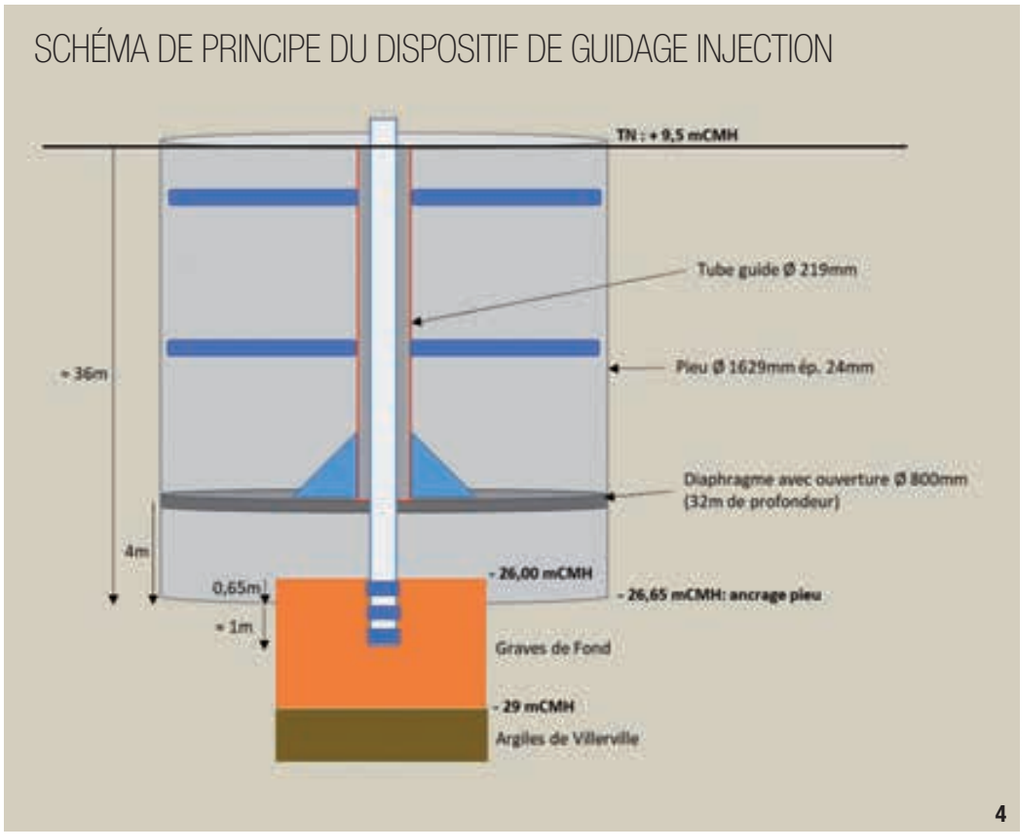
Du fait des sollicitations importantes en provenance du quai, les cages d'armature des pieux tarière creuse présentaient néanmoins des masses très élevées, de l'ordre de 2 à 5 t, nécessitant le recours à des moyens de levage conséquents pour leur mise en œuvre (figure 7).

Rappelons que, au-delà des grands enjeux sociologiques, pour optimiser le taux de réussite d'exécution, il s'agit aussi de raccourcir les cages d'armatures en fond de pieux lorsque non nécessaires pour la structure.

La réalisation des pieux de la zone maritime a mobilisé des moyens humains (jusqu'à 30 personnes) et matériels importants avec jusqu'à 2 ateliers de

4- Schéma de principe du dispositif de guidage injection.

4- Schematic diagram of the grouting guide system.



© NGE FONDATIONS

tarière creuse, 3 ateliers de kelly et 3 grues de manutention de 60 à 180 t en simultané sur une zone assez restreinte du fait du phasage général du chantier qui avançait parallèlement au quai en allant de Jack-Up vers Lo-Lo (figure 8).

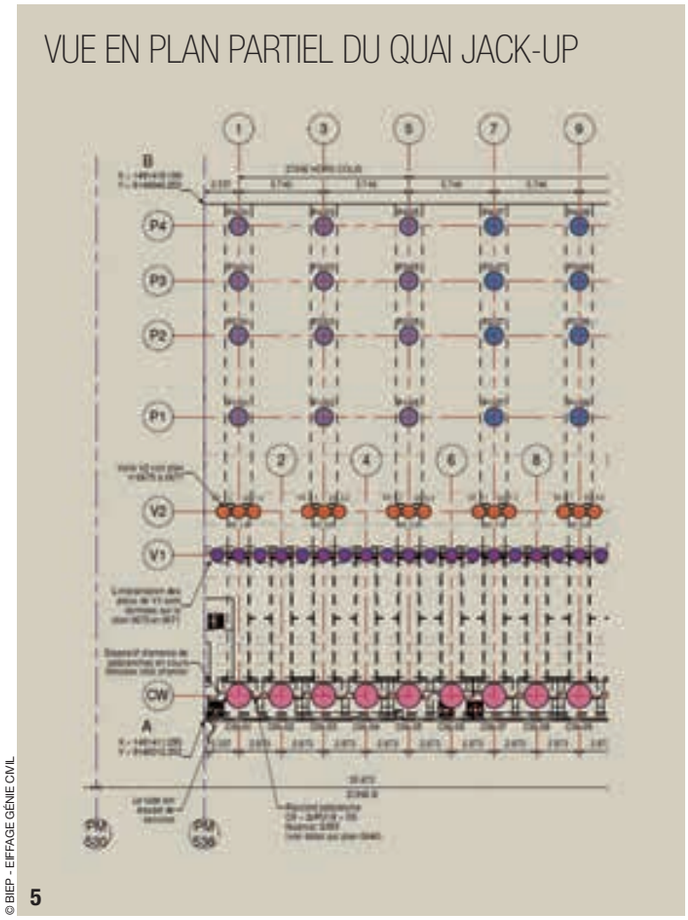
En effet, la réalisation des fondations s'est intercalée entre des travaux de terrassement étendus avec la substitution d'une partie des remblais très hétérogènes et renfermant de nombreux obstacles (blocs de béton, ferrailles en tout genre ...) et les travaux de génie civil du quai réalisés dans la continuité immédiate de ceux des pieux.

5- Vue en plan partiel du quai Jack-Up.

6- Forage avec tubage à l'avancement des pieux de V1.

5- Partial plan view of the jack-up quay.

6- Drilling of V1 piles with tubing.



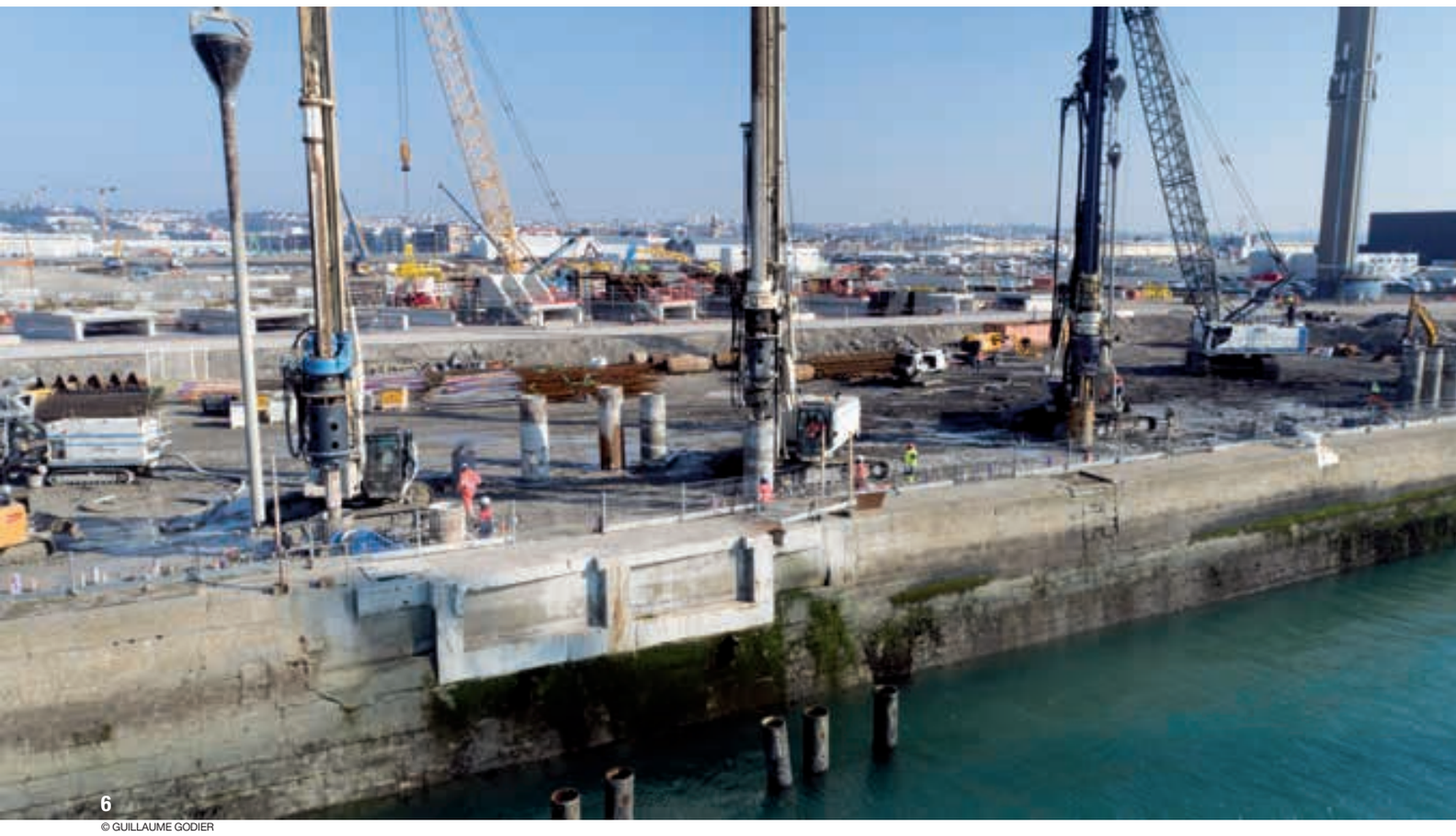
5

© BIEP - EIFFAGE GÉNIE CIVIL

INCLUSIONS RIGIDES DE LA ZONE "TERRESTRE"

VARIANTE À LA CONCEPTION DCE : INCLUSIONS RÉDUITES ET MAILLE RESSERRÉE

La zone dite terrestre, située à l'arrière de la nouvelle structure de quai, a fait l'objet d'un renforcement de sol en vue d'être apte à supporter les charges de colis pouvant être stockés dans cette zone, d'une part, et la circulation des grues lourdes (type équivalent à Liebherr 11350) qui les manutentionnent, d'autre part. Cette zone spécifique du projet a fait l'objet d'une variante importante de la part du groupement au stade de l'appel d'offre. En effet, la conception initiale prévoyait la réalisation d'un renforcement de sol par "inclusions" de diamètre 1 220 mm selon une maille de 3,6 m x 3,6 m et surmontée d'une plateforme de transfert de charges de 2,5 m d'épaisseur armée par trois nappes de géogrilles. La solution qui a été proposée par le groupement et retenue pour la réalisation du projet a été le remplacement des inclusions de 1 220 mm par des inclusions de 300 mm de diamètre et selon une maille resserrée de 1,5 m x 1,5 m soit un total d'environ 3 400 inclusions d'une vingtaine de mètres de longueur chacune. ▷



6

© GUILLAUME GODIER

ÉTUDES D'EXÉCUTION DU RENFORCEMENT DE SOL

Les études d'exécution des inclusions rigides ont été pilotées au sein de la direction technique de Nge Fondations et réalisées par les équipes d'Egis Géotechnique basées à Grenoble. Comparativement à un projet de renforcement de sol "courant", le niveau de contrainte sous les chenilles des grues en phase exploitation, donc en tête de plateforme de transfert de charges (PFTC), atteignait des valeurs très élevées sur le projet avec un pic à près de 800 kPa en extrémité de chenille. Le CCTP fixait par ailleurs un critère de tassement différentiel sous chenille de seulement 3 cm. Ces deux éléments ont constitué les principales contraintes conditionnant les études d'exécution des inclusions rigides et ont nécessité le recours à une modélisation numérique sophistiquée.

En effet, afin de correctement appréhender la réponse du massif de sol renforcé à ces sollicitations hors normes, une modélisation aux différences finies sous le logiciel Flac 3D® a été entreprise par Egis avec le support d'Itasca. Le modèle élaboré a permis de modéliser une chenille complète de grue (11,4 m x 1,80 m), la PFTC (y compris les trois nappes de géogrilles) ainsi que le massif de sol renforcé comprenant 200 inclusions rigides, soit un modèle de 30 m de long par 15 m de large par 40 m de hauteur (figure 9). La définition des nombreux paramètres nécessaires au modèle, notamment au niveau des interfaces entre structures et terrain, ainsi que le calage du modèle ont fait l'objet de riches échanges avec la maîtrise d'œuvre d'Haropa Port et son assistance à maîtrise d'ouvrage Terrasol. Les études d'exécution ont permis de

© NGE FONDATIONS

7- Levage d'une cage d'armature de pieu tarière creuse.

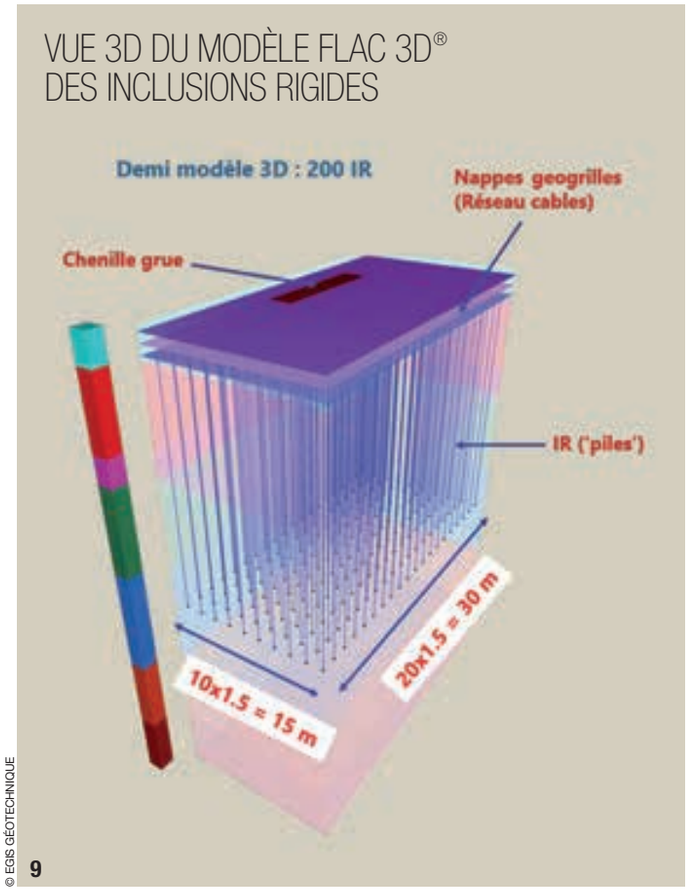
8- Vue d'ensemble quai Lo-Lo - Pieux tarière creuse.

7- Lifting rebar cage of a hollow flight auger pile.

8- General view of Lo-Lo quay - Hollow flight auger piles.

© GUILLAUME GODIER

justifier du respect du critère de tassement différentiel sous chenille tout en mettant en évidence le faible taux de travail des géogrilles qui ont néanmoins été conservées d'avantage en tant que disposition constructive que de nécessité structurelle.
Seules les inclusions situées en rive, côté terre-plein, ont été armées avec des cages structurelles pour la reprise des efforts de flexion générés par le tassement de la zone de terre-plein (non renforcée) sous l'action des charges d'exploitation. Ces inclusions ont vu leur diamètre augmenté à 400 mm pour des raisons de mise en œuvre des cages sur chantier. Toutes les autres inclusions ont été équipées de cages de principe en tête sur 2 m dans le but de protéger les têtes d'inclusions lors des phases de terrassement et recépage (niveau de recépage situé environ 1,30 m sous la plateforme de travail).



© EGIS GÉOTECHNIQUE

9- Vue 3D du modèle FLAC 3D® des inclusions rigides.

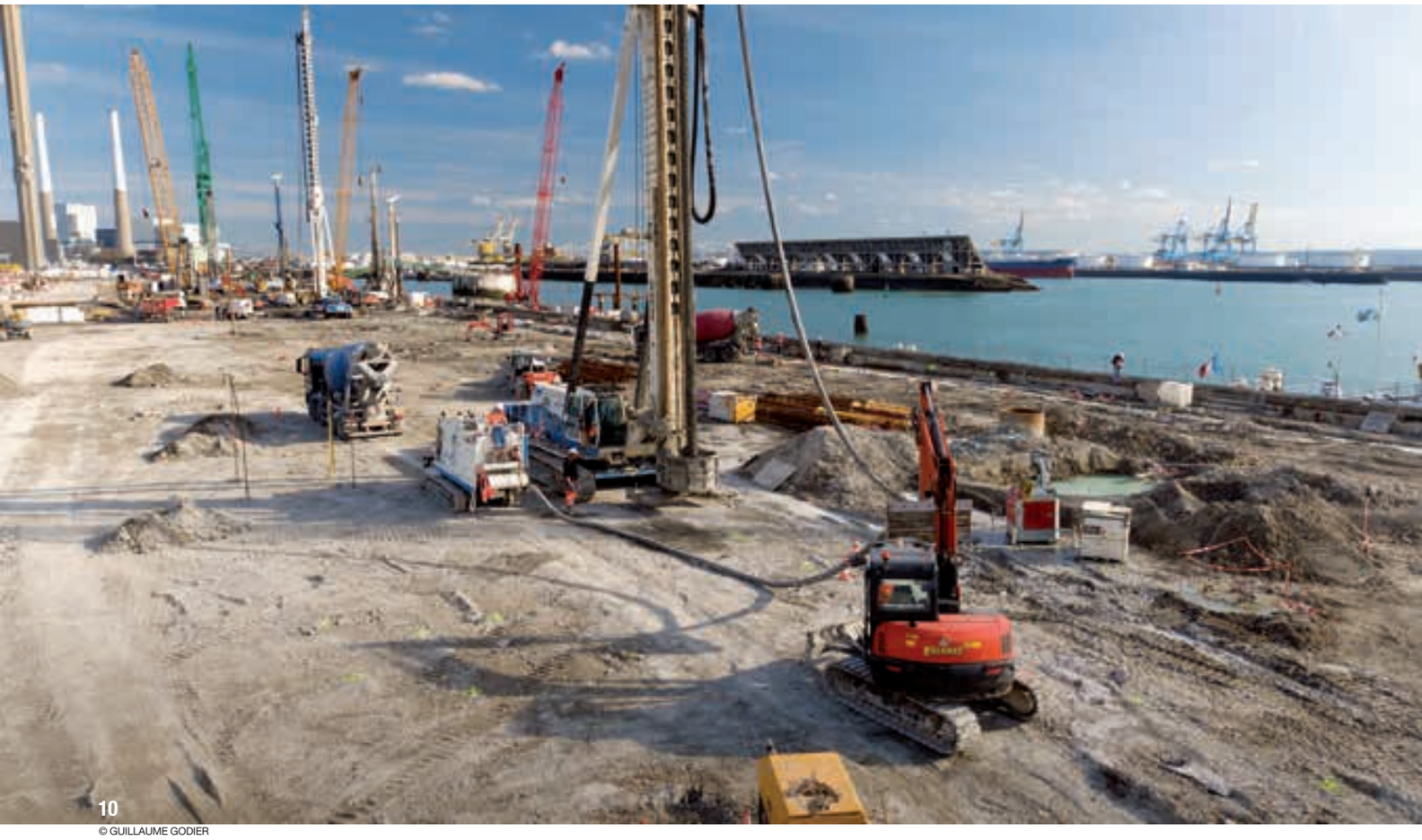
10- Réalisation d'une inclusion rigide par refoulement.

9- 3D view of the FLAC 3D® model of rigid inclusions.

10- Execution of rigid inclusion by discharge.

TRAVAUX D'INCLUSIONS

La totalité des inclusions rigides a été réalisée via la technique "forée tarière creuse avec refoulement de sol" (au sens des recommandations ASIRI) qui présente le double avantage de limiter très fortement le volume de déblais généré par le forage tout en consolidant le sol environnant l'inclusion (figure 10). Afin de garantir le refoulement des sols en place, notamment les Sables Gris Verts de bonne compacité, deux foreuses de forte puissance (Llamada P230 et P160) ont été mobilisées sur chantier. Avec une cadence moyenne de 20 u/j, le délai de réalisation des fondations a été ainsi assuré permettant aux travaux de génie civil de disposer d'une libération d'emprise importante. ▷



© GUILLAUME GODIER

© A. NOGUES - EIFFAGE GÉNIE CIVIL

11

11- Essai de chargement sur inclusion.

11- Loading test on inclusion.

Conformément aux recommandations ASIRI, des essais de chargement d'inclusions rigides ont été réalisés sur certaines inclusions de l'ouvrage. Les charges d'essais importantes (de l'ordre de 70 t) ont nécessité l'emploi d'un bâti spécifique et l'utilisation des inclusions situées de part et d'autre de celle testée avec massif de réaction (figure 11).

PLANCHE D'ESSAI

Dans le cadre du projet et s'inscrivant par ailleurs dans le projet de recherche national ASIRI+, une planche d'essai composée de 30 inclusions rigides (dimensions de la planche : 6 m par 7,5 m) intégrée à l'ouvrage était prévue au marché. Une instrumentation spécifique est mise en œuvre par Sixense dans la plateforme de transfert de charge et dans les inclusions : capteurs de pression totale et capteurs de tassement au droit d'inclusions ainsi qu'en inter-mailles, fibres optiques dans la PFTC et certaines inclusions. Un essai de chargement visant à reproduire l'intensité des charges de grue d'exploitation (700 kPa de contrainte au sol) et à s'assurer de la bonne réponse du système de renforcement sera mené avant l'achèvement du chantier. L'instrumentation sera par ailleurs maintenue en phase d'exploitation et permettra d'alimenter en données le projet ASIRI+. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PIEUX TARIÈRE CREUSE : 266 pieux Ø 1 220 mm, longueur 33 m maxi
INCLUSIONS RIGIDES : 2 940 unités Ø 300 mm et 470 unités Ø 400 mm, longueur 21 m
PIEUX FORÉS TUBÉS : 500 pieux Ø 900 mm, longueur 12 m maxi
PIEUX SÉCANTS : 450 pieux Ø 620 mm, longueur 10 m maxi

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Haropa Port - Le Havre
MAÎTRISE D'ŒUVRE : Haropa Port - Le Havre
ASSISTANCE MAÎTRISE D'OUVRAGE : Setec-Terrasol
GÉOTECHNICIEN PHASE G2 : Terrasol
GÉOTECHNICIEN PHASE G3 : Fugro
GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Eiffage Génie Civil (mandataire) - Etpo - Nge Fondations - Eiffage Etmf - Sdi

ABSTRACT

JOANNES COUVERT QUAY IN LE HAVRE - STRENGTHENING OF A 400-METRE QUAY FOR A WIND-POWER PROJECT

PHILIPPE LEGRAND, NGE FONDATIONS - THOMAS LE COR, NGE FONDATIONS - ARNAUD L'HUISSIER, NGE FONDATIONS

The project for strengthening Joannès Couvert Quay in the port of Le Havre, *with a view to developing offshore wind power in France, benefited, in both the design stage and in management of worksite contingencies, from the broad range of foundation techniques mastered at NGE Fondations (hollow flight auger, cased bored, hollow flight auger with discharge pile techniques, and ground treatment). Overall, for execution of nearly all the project foundations, up to 50 people from NGE Fondations worked on this complex project in terms of work sequencing and scheduling. The foundation works extended over slightly less than one year, from November 2021 to September 2022.* □

MUELLE JOANNES COUVERT EN EL HAVRE - REFUERZO DE UN MUELLE DE 400 M EN EL MARCO DE UN PROYECTO EÓLICO

PHILIPPE LEGRAND, NGE FONDATIONS - THOMAS LE COR, NGE FONDATIONS - ARNAUD L'HUISSIER, NGE FONDATIONS

La obra de refuerzo del muelle Joannès Couvert en el puerto de El Havre, *pensada para desarrollar la energía eólica offshore en Francia, ha podido aprovechar, tanto en su diseño como en su gestión de las contingencias de obra, el importante conjunto de técnicas de cimentación en las que está especializada la sociedad Nge Fondations (pilotes de barrena continua, perforados entubados, de barrena continua con descarga, tratamiento del terreno). En total, para la realización de la casi totalidad de los cimientos del proyecto, Nge Fondations ha movilizado hasta 50 empleados, que han intervenido en la planificación y el diseño del calendario de ejecución de esta obra compleja. Las obras de cimentación se llevarán a cabo a lo largo de algo menos de un año, de noviembre de 2021 a septiembre de 2022.* □

1

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

LA RENAISSANCE D'UN PALACE À NICE : LE PARK HÔTEL

AUTEURS : STÉPHANE GILBERT, INGÉNIEUR TRAVAUX, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - ALI KOSSARI, RESPONSABLE DU BUREAU D'ÉTUDES, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - MANH HAI LE, INGÉNIEUR ÉTUDES / GÉOTECHNICIEN, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

À L'EMPLACEMENT DE L'ANCIEN PARK HÔTEL, LOCALISÉ AU CŒUR DU CARRÉ D'OR DE NICE, UN PROJET DE RESTRUCTURATION ET D'EXTENSION EST DÉVELOPPÉ PAR L'ASSOCIATION DES MAÎTRES D'OUVRAGE CITY MALL MANAGEMENT FRANCE ET MAH NICE VICTORIA BUILDING. CET ENSEMBLE PROPOSERA 12 BOUTIQUES DE LUXE ET UN RESTAURANT EN PIED D'IMMEUBLE, SUR UNE SUPERFICIE TOTALE DE PLUS DE 4 300 m². UN HÔTEL 5 ÉTOILES DE 140 CHAMBRES OCCUPERA LES ÉTAGES SUPÉRIEURS. L'ENSEMBLE DES TRAVAUX A ÉTÉ CONFIÉ AU GROUPEMENT EIFFAGE CONSTRUCTION ALPES MARITIMES POUR LE GROS ŒUVRE ET SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS POUR LES FONDATIONS SPÉCIALES.

DESCRIPTION DU PROJET

Le projet prévoit la réalisation de 3 niveaux de sous-sols à l'abri d'une enceinte en parois moulées.

Les 2 niveaux inférieurs seront occupés par des parkings alors que le premier niveau sera réservé au spa de l'hôtel. L'accès à cette zone enterrée nouvellement créée à l'aplomb de la façade Nord se fera via une tranchée couverte passant en dessous du bâtiment Park Hôtel et dont l'entrée se situera au droit du Jardin d'Arménie (façade Sud). Dans le cadre de ce projet, il est fait appel à différentes spécialités de fondations spéciales : parois moulées, barrettes de fondations, injections solides, pieux sécants et mise en place des butons précontraints. La réalisation des travaux s'inscrit dans un contexte urbain dense et à proximité de bâtiments existants dont certains possèdent des murs mitoyens à la parcelle (figure 2). Ce voisinage a imposé des contraintes particulières en phase d'exécution avec notamment l'instrumentation des avoisinants, la mise en place de profilés HEB dans les murettes guides elles-mêmes isolées des mitoyens par du polystyrène, une déviation de réseaux phasée pour l'exécution de la tranchée couverte, la réalisation préalable d'un portique en béton armé de renforcement pour l'accès, l'utilisation de foreuses d'injection à gabarit réduit et centrale à boue dissociée. L'exiguïté de l'enceinte disponible a par ailleurs imposé le déplacement du dessableur et des fosses à déblais en cours de production (figure 3).

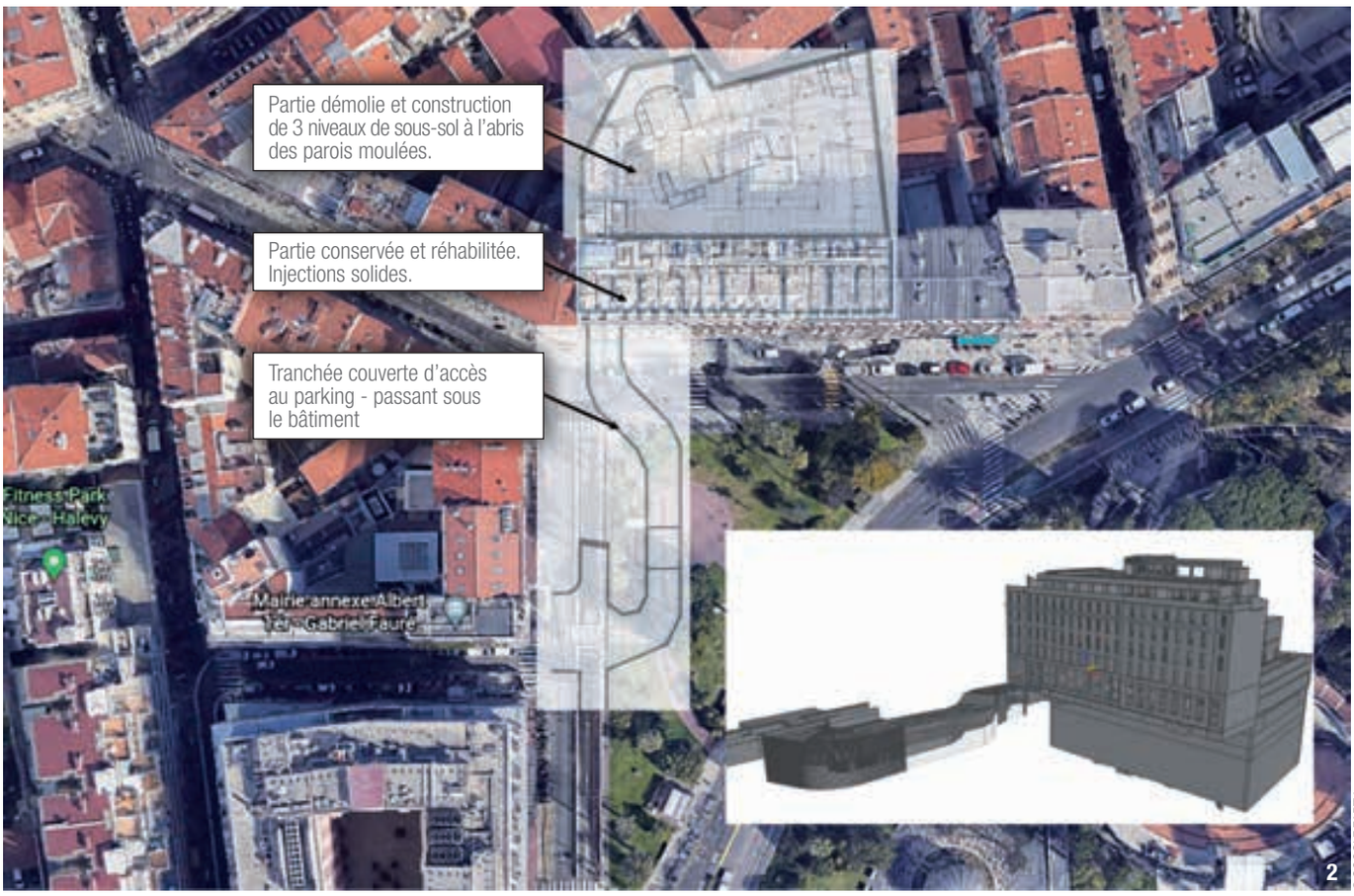
1- Vue d'ensemble du projet.

1- Overall view of the project.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Le terrain du projet est situé dans une zone de substratum marno-gypseux d'âge triasique surmonté par des dépôts alluvionnaires de nature variable. Les études de reconnaissance de sol ont été conduites en 2017 par Sol Essais. Elles comprenaient des sondages carottés, des essais pressiométriques, des essais au carottier dynamique type SPT, des sondages destructifs avec enregistrement de paramètres ainsi qu'un essai de pompage et les mesures piézométriques associées. Ces reconnaissances de sol ont mis en évidence les formations suivantes depuis le terrain naturel :

- → Les remblais sur une épaisseur de 2 m environ sous le terrain naturel situé à 3,5 NGF environ ;
- → Une formation graveleuse à galets sur 6-7 m présentant des caractéristiques relativement compactes ;
- → Une couche silteuse limoneuse avec des caractéristiques plus faibles, descendue jusqu'à 14 m de profondeur environ ;
- → Une formation argileuse présentant des caractéristiques mécaniques meilleures que celles de la couche silteuse ; cette formation est identifiée jusqu'à 30 m de profondeur environ ;
- → Un substratum de nature gypseuse/marneuse, compact globalement avec de très bonnes valeurs pressiométriques.



© GOOGLE EARTH

Des essais de laboratoire (type identification des sols et essais mécaniques) ont complété les campagnes d'investigation in situ.

CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Le site est localisé à environ 250 m de la mer. Les niveaux de nappe phréatique observés lors de la campagne de reconnaissance sont généralement situés entre +0,0 et +1,0 NGF. Le soutènement périphérique en parois moulées devait s'ancrer dans la formation argileuse de faible perméabilité. L'essai de pompage réalisé lors de la phase G2 AVP par Sol-Essais au moyen d'un puits de 29 m de profondeur, crépiné de 20 à 29 m et associé à 3 piézomètres de suivi avait donné un débit de 0,6 m^3/h environ pour un rabattement de 10 m dans le puits. La perméabilité des argiles déduite de cet essai était ainsi de l'ordre de 10^{-6} m/s. L'estimation du débit d'exhaure en phase provisoire a été faite en considérant une valeur prudente de 2.10^{-6} m/s.

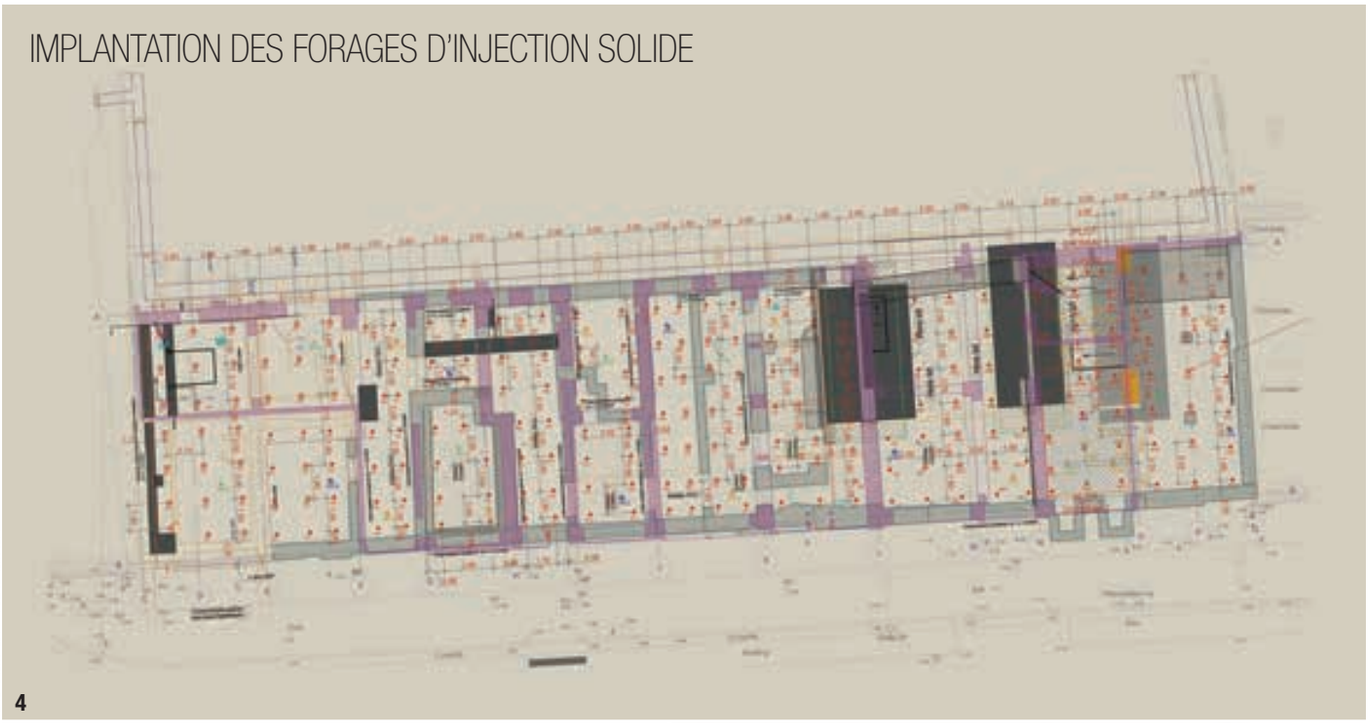
INJECTIONS SOLIDES

Les études de sols préliminaires avaient mis en évidence un risque de liquéfaction des terrains de fondation des semelles existantes de l'hôtel et la nécessité de réduire ce risque par un traitement de sols approprié. Les remblais, les alluvions de couverture et les silts ont donc été traités par injection solide. Un plot d'essai associé à des sondages de contrôle a été réalisé afin de valider le maillage et d'ajuster la méthodologie d'exécution. La technique d'injection solide consiste à incorporer dans un terrain un mortier de consistance assez ferme sous une pression relativement élevée ; l'apport de ce mortier permet une diminution de l'indice des vides du sol traité. Le volume de matériau injecté forme une masse homogène qui s'engraisse tout au long de l'incorporation sans se mélanger avec le sol. L'amélioration des caracté-

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

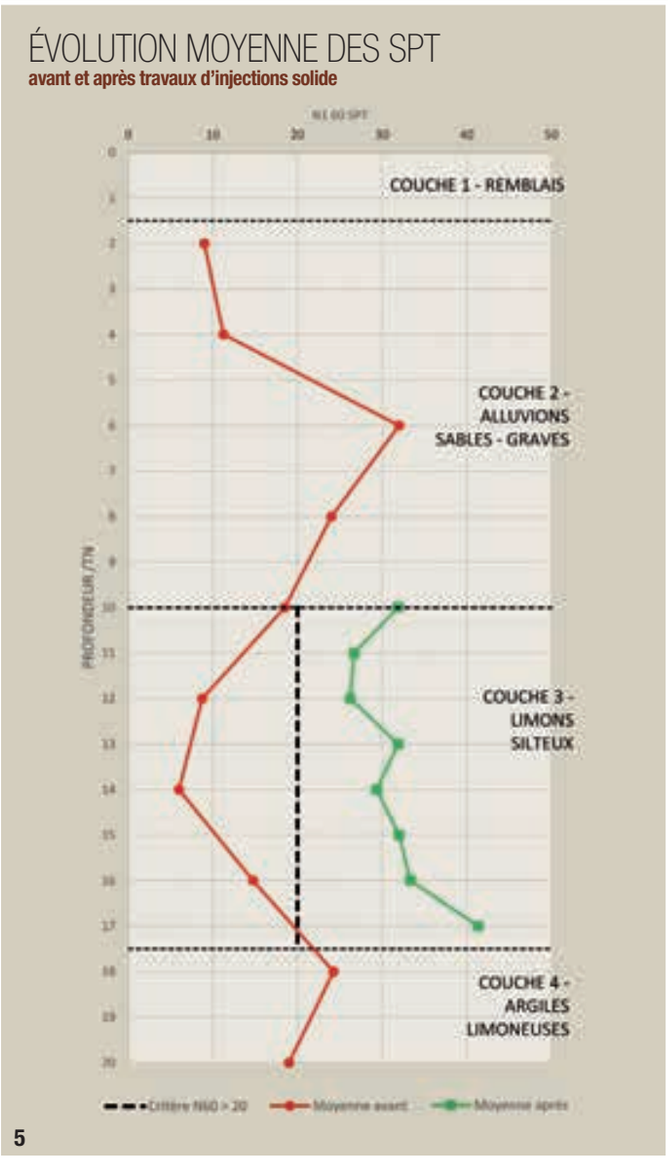
2- Vue d'ensemble du projet.
3- Vue du chantier durant le forage des parois moulées.

2- Overall view of the project.
3- View of the project during diaphragm wall drilling.



4

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS



5

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

6

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

4- Implantation des forages d'injection solide.

5- Évolution moyenne des SPT avant et après travaux d'injections solide.

6- Forages d'injection solide dans l'existant.

4- Layout of boreholes for solid grout injection.

5- Average change in SPTs before and after solid grout injection works.

6- Drill holes for solid grout injection in the existing environment.

ristiques d'un sol par injection solide est le résultat de deux effets principaux :

→ Un effet de compactage du sol entre les points de traitement correspondant aux déplacements du terrain natif provoqués par l'introduction du mortier injecté ;

→ Un effet d'incorporation (3 %) d'un matériau complémentaire de meilleures caractéristiques que le sol en place.

Au total, ce sont 218 forages totalisant 3710 m qui ont été réalisés à la maille de 2 m x 2 m (figures 4 et 6).

À la fin des travaux, une campagne de sondages de contrôle par des essais pressiométriques et des essais SPT a été menée ; elle conclut à une amélioration des pressions limites des alluvions de 25 % et pour les silts de plus de 15 %. ▷

Par ailleurs les SPT fournissaient un terme (N1)60 moyen supérieur à 20 permettant de conclure à l'absence du risque de liquéfaction de cette couche (figure 5).

PIEUX

Dans le cadre du marché, les soutènements provisoires de la tranchée couverte d'accès au parking souterrain ont été réalisés en pieux sécants. Cette tranchée couverte passe sous l'avenue de Suède et le Jardin d'Arménie. Ce sont 286 pieux en tarière creuse de diamètre 620 mm espacés de 500 mm qui ont été réalisés, avec des longueurs de forage entre 8 m et 11 m environ (figure 7). Un pieu sur deux est équipé d'une cage d'armatures afin de reprendre les sollicitations de poussée des terres en phase de travaux. Ces pieux sont maintenus en tête par un lit de butons métalliques provisoires associés à des liernes continues. Par la suite, l'entreprise de gros œuvre réalisera un cadre en béton armé définitif, venant se substituer aux pieux.

PAROIS MOULÉES ET BARRETTES

Le projet comprend un parking souterrain de 3 niveaux en sous-sol à réaliser à l'abri d'une paroi moulée périmétrique de 186 m de linéaire en épaisseur 62 cm et 82 cm (figure 8). Cette paroi se compose de 31 panneaux de 23 m de profondeur ancrés de 8 m dans les argiles peu perméables ; le fond de fouille général est à 11,5 m de profondeur par rapport au niveau du TN, soit environ -8 NGF (figures 9 et 10).

Les études de dimensionnement des parois moulées ont été faites par la méthode aux éléments finis. En effet, les fondations superficielles de l'hôtel R+6 induisant jusqu'à 1,5 bars de contrainte au sol présentent une dissymétrie marquée de chargement sur les soutènements et ont nécessité une estimation précise des déplacements des ouvrages. Plusieurs coupes de calculs ont donc été étudiées conjointement par Spie Batignolles Fondations et Eiffage Construction grâce aux logiciels Plaxis 2D et 3D (figure 11). Ces calculs ont permis de démontrer que les déplacements du soutènement restaient inférieurs aux critères de déplacement autorisés dans ce contexte urbain dense. En complément des parois moulées, vingt-trois barrettes de fondation ont été réalisées en arase basse depuis le terrain naturel. D'une section de 2,8 m x 0,82 m, elles sont équipées d'armatures sur toute leur hauteur utile ; les longueurs de fiche varient de 8 m à 25,3 m selon la descente de charges. Les efforts exercés sur les barrettes ont été définis via un calcul itératif entre le bureau d'études de structure et celui de Spie Batignolles Fondations. Ces barrettes ont été calculées au séisme en intégrant la neutralisation d'une frange de terrain de 3,0 m d'épaisseur sous le fond de fouille afin de s'affranchir des problématiques de liquéfaction du terrain.

ALÉA GÉOLOGIQUE

La stabilité hydraulique du fond de fouille (vérifications de la boulance mais aussi du renard solide) de même que le non-soulèvement de l'ouvrage sous l'effet de la sous-pression s'exerçant sous le radier sont assurés par un ancrage de 5 m de la paroi moulée dans les argiles. Lors de l'excavation des parois moulées, un paléo-talweg non reconnu dans la mission géotechnique G2 a été identifié par l'entreprise suivant une direction a priori Nord/Sud traversant la fouille sur une largeur d'une quinzaine de mètres. Ce paléo-talweg se caractérise par des graves sableuses et galets, avec quelques passages argileux de faible épaisseur. Compte tenu des risques hydrauliques inhérents à ce projet, le maître d'œuvre, immédiatement informé, a validé, en accord avec l'entreprise, un approfondissement local de la paroi moulée jusqu'à une profondeur de 38 m (soit un allongement de la fiche de 15 m par rapport à la base perforation théorique). Cet approfondissement n'a cependant pas permis d'ancrer la paroi moulée dans une matrice argileuse et de réaliser la fiche hydraulique espérée.

RECONNAISSANCES COMPLÉMENTAIRES

Afin de caractériser l'étendue de ce paléo-talweg et de connaître ses caractéristiques hydrauliques et mécaniques, une campagne d'essais complémentaires a alors été menée par le bureau d'études de sol Sol Essais dans le cadre d'une mission G5. Cette mission a consisté à réaliser 1 forage carotté de corrélation de 45 m de profondeur, 1 forage destructif avec enregistrement de paramètres de 40 m de profondeur avec essais pressiométriques,

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

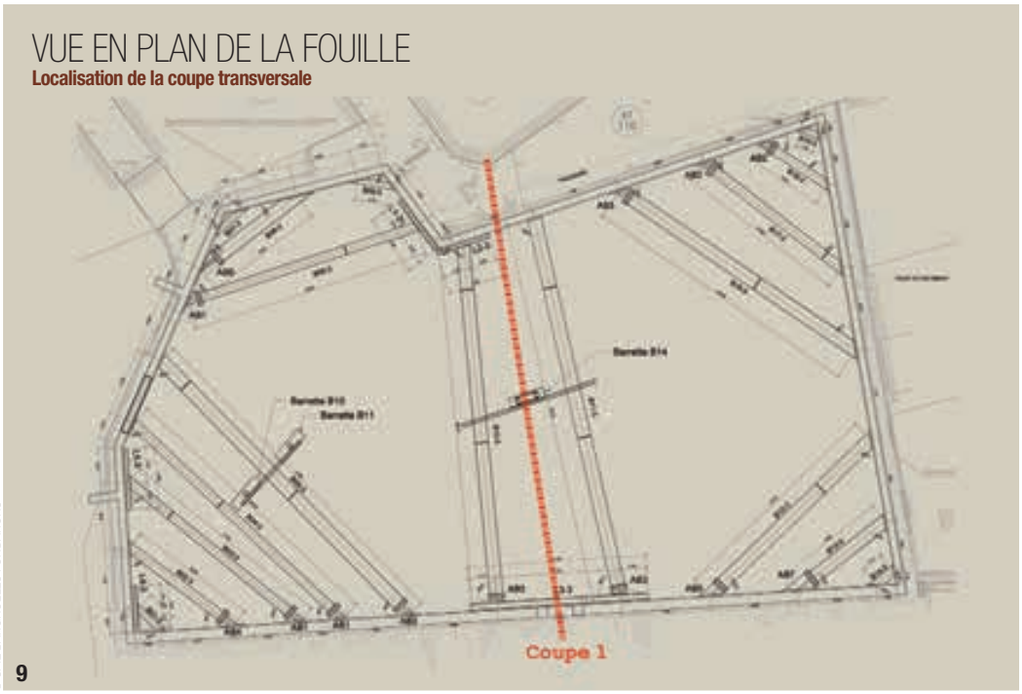
7- Forage des pieux de la tranchée couverte et tranchée excavée.

8- Forage des parois moulées.

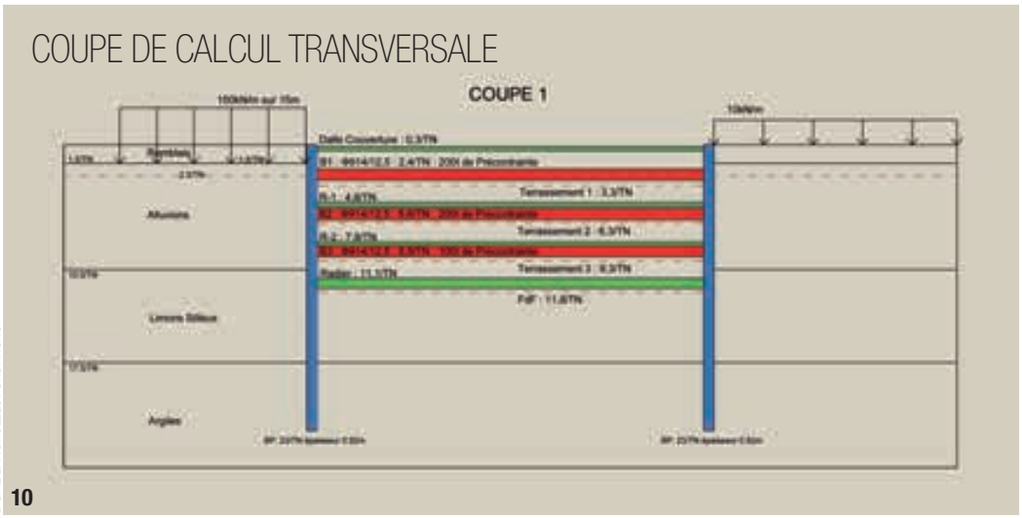
7- Pile drilling for the cut-and-cover tunnel and excavated trench.

8- Drilling the diaphragm walls.

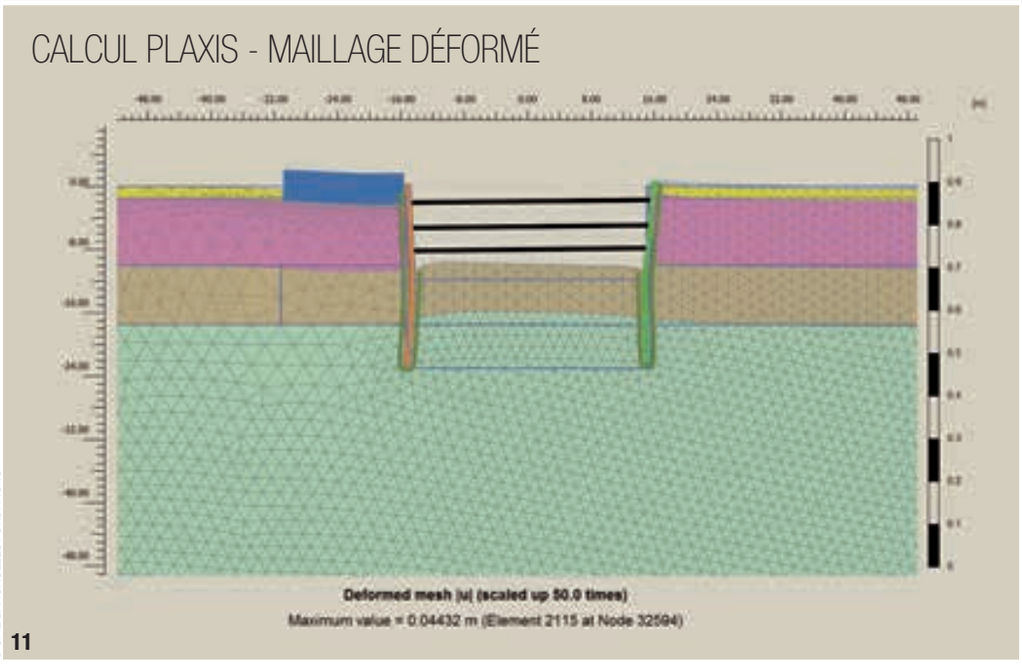
© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS



9



10



11

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS
© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS
© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

9- Vue en plan de la fouille - Localisation de la coupe transversale.

10- Coupe de calcul transversale.

11- Calcul Plaxis - Maillage déformé.

9- Plan view of excavation - Location of the cross section.

10- Calculation cross section.

11- Plaxis calculation - Deformed meshing.

8 forages destructifs avec enregistrements de paramètres de 24 m de profondeur. Ces essais ont été complétés par la réalisation de 3 forages piézométriques à 24 m de profondeur, 1 puits de pompage de 24 m, 1 essai de pompage sur 4 jours avec essai au micromoulinet et essais Lefranc. L'ensemble des données recueillies a ensuite été interprété par Sol Essais et par le bureau d'études d'hydrogéologie Eau & Perspectives (figure 13). Le rapport d'étude G5 établit que le paléo-talweg présente des caractéristiques mécaniques satisfaisantes (pL > 3,7 MPa, Em > 35 MPa) au regard des hypothèses de dimensionnement des parois moulées mais qu'à l'inverse une alimentation importante au-delà de 36 m de profondeur conduit à une perméabilité de l'ordre de 3.10^{-4} m/s. Cette perméabilité entraînait un débit de pompage d'environ 200 m^3/h en phase de terrassement, bien supérieur au débit de moins de 20 m^3/h initialement prévu. Théoriquement, les risques associés à cette forte perméabilité sont l'apparition du phénomène de boulance, la survenance d'un renard hydraulique pouvant conduire au soulèvement ou à la rupture du fond de fouille mais également à l'apparition d'un phénomène de rabattement de nappe à l'extérieur de l'ouvrage susceptible de générer un tassement des fondations superficielles des avoisinants.

Concrètement, la non-identification de ce paléo-talweg lors de l'excavation des parois moulées aurait fait courir un risque majeur à la structure de l'ouvrage ainsi que celui d'un incident grave lors du terrassement de l'ouvrage et de dommage important sur les avoisinants situés à moins de 50 cm des parois moulées. ▷

12- Localisation des barrettes.

13- Emprise au sol de la zone d'anomalie sous le fond de fouille.

14- Buton pré-contraint avec dispositif de remise en charge.

12- Location of barrettes.

13- Ground area covered by the anomaly under the bottom of cut.

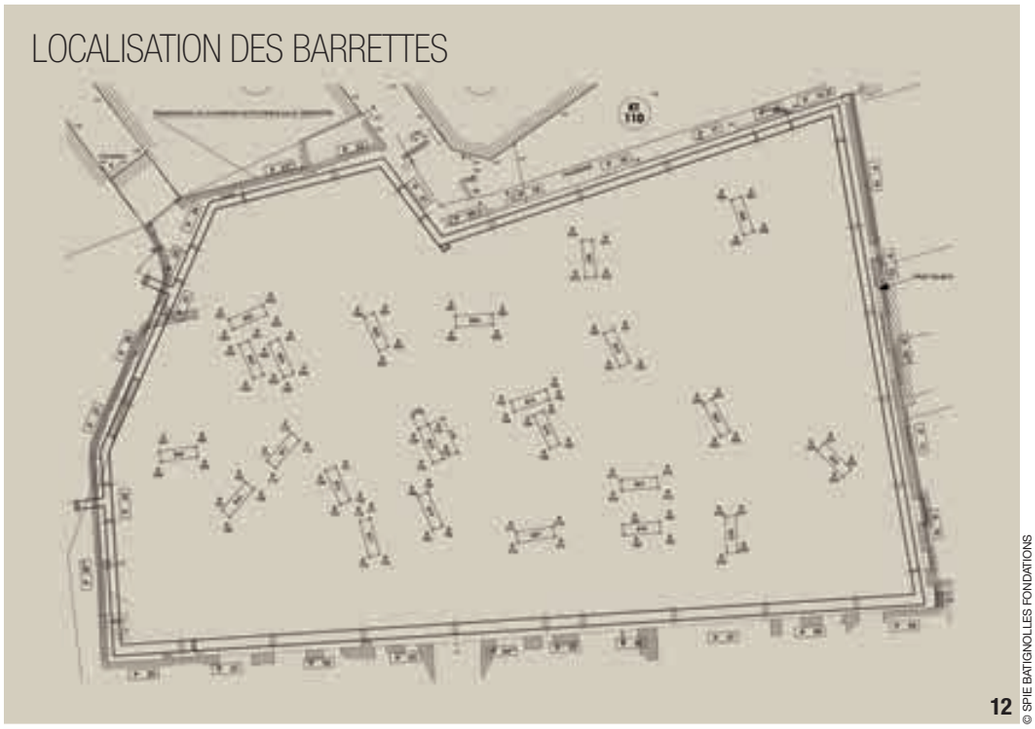
14- Prestressed strut with reloading system.

CONSÉQUENCES DE CET ALÉA GÉOLOGIQUE

La campagne d'analyse complémentaire réalisée et son interprétation ont démontré que l'approfondissement des parois moulées n'était pas une disposition suffisante pour supprimer les risques hydrauliques et structurels. Il était pourtant impératif que ce risque soit traité, Spie Batignolles Fondations et Tractebel Engineering ont alors proposé la réalisation d'un bouchon injecté sous le fond de fouille en pied de parois moulées. Ce bouchon injecté a été confié à l'entreprise Vippell, sous-traitant d'Eiffage Construction Alpes maritimes. Il a consisté à réaliser des colonnes de jet-grouting sécantes sur l'ensemble de la surface de la fouille (1 800 m^2). Ces colonnes, d'une épaisseur de 2,50 m et de 22 m de profondeur, ont été réalisées entre octobre 2020 et juillet 2021 à l'aide de 3 foreuses, soit un décalage de planning de presqu'un an pour le terrassement de l'ouvrage. Ce rallongement de délais est la conséquence de la détection de mouvements importants sur les avoisinants nécessitant des arrêts et reprise de travaux fréquents pendant la réalisation de ces travaux. Afin de valider la bonne réalisation du bouchon, un essai de pompage mené en août 2021 a donné un débit d'environ 12 m^3/h.

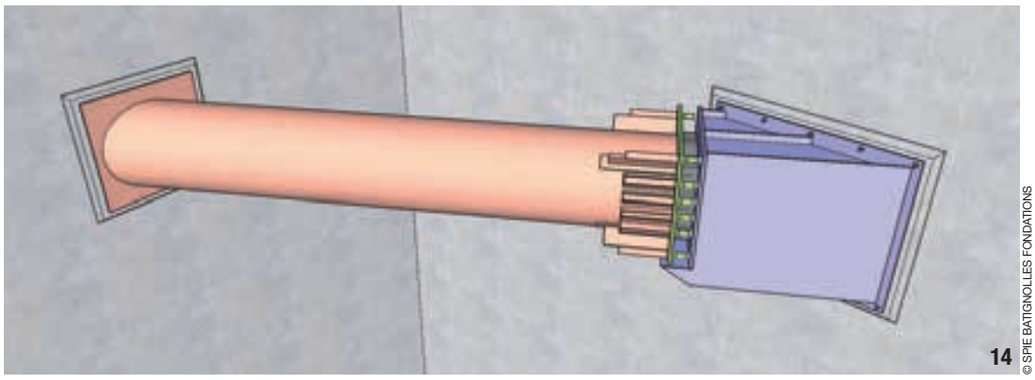
BUTONS MÉTALLIQUES

Une fois le fond injecté réalisé, les terrassements ont démarré. Les parois de soutènement sont maintenues par 3 lits de butons métalliques précontraints, mis en place au fur et à mesure des terrassements. La mise en précontrainte de ces appuis assure une meilleure maîtrise des déplacements des ouvrages

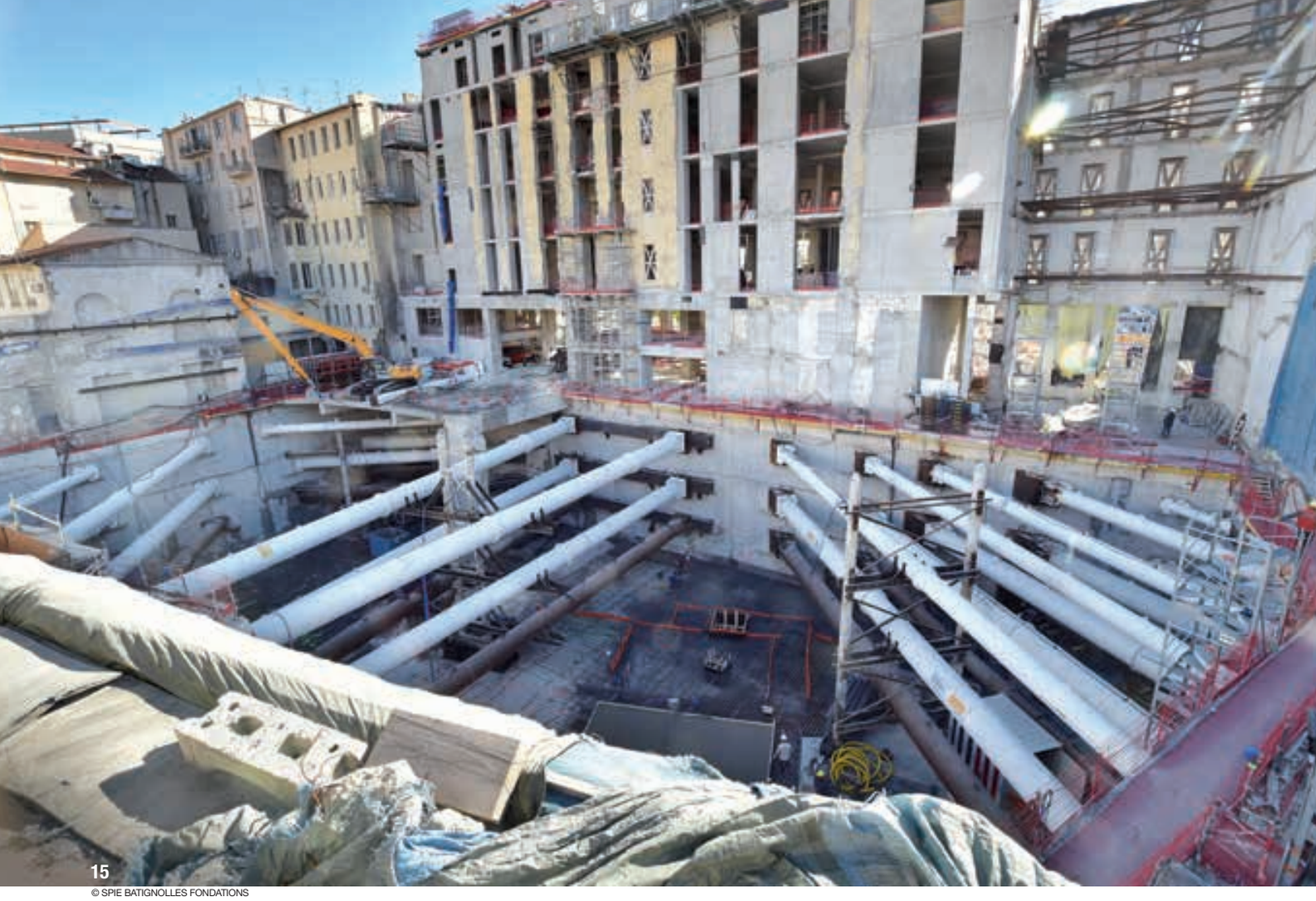


12 © SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

13 © TRACTEBEL



14 © SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS



15

© SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

15- Fouille excavée.

15- Completed excavation.

de soutènement mais également des mitoyens proches. Les efforts de précontrainte issus des différents modèles de calcul de ce soutènement, variant de 285 KN/m à 430 KN/m, ont conduit à des efforts de précontrainte unitaire par buton de 5150 KN maximum.
Le cahier des charges imposant la nécessité de pouvoir remettre en charge les butons, les extrémités de ces derniers sont pourvues de barres filetées de gros diamètre permettant un recalage du vérin et une remise en charge des butons (figure 14).

PRINCIPALES QUANTITÉS

- **Parois moulées : 4400 m² en épaisseur 62 cm et 82 cm**
- **23 barrettes de fondations**
- **286 pieux Ø 62 cm**
- **250 colonnes d'injection solide**
- **3 lits de butons précontraints totalisant 470 t**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRES D'OUVRAGE : City Mall Management France et MAH Nice Victoria Building
ARCHITECTE : JP Gomis
ASSISTANT MAÎTRISE D'OUVRAGE : Stern et White
MAÎTRE D'ŒUVRE : Tractebel Engineering
CONSTRUCTEURS : Eiffage Construction Alpes maritimes / Spie Batignolles Fondations

Tous les butons précontraints seront équipés d'un capteur de force permettant un suivi des efforts en continu (figure 15).
Après les mouvements importants des mitoyens constatés durant les travaux de jet grouting, les déplacements des mitoyens, parois moulées ainsi que les efforts dans les butons ont été contrôlés pendant les phases de terrassement et sont restés en dessous des valeurs admissibles.

CONCLUSIONS

Les travaux spéciaux sont terminés et ceux de gros œuvre sont en cours pour une livraison du palace prévue en 2023. Les travaux de parois moulées ont été réalisés en partie durant la période de la crise sanitaire liée à la Covid-19. □

ABSTRACT

THE RENAISSANCE OF A LUXURY HOTEL IN NICE: THE PARK HOTEL

STÉPHANE GILBERT, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - ALI KOSSARI, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - MANH HAI LE, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

The structural re-engineering works on the Park Hôtel luxury hotel in Nice *accumulated numerous problems due to a highly urbanised and sensitive environment on a constraining small land area. The complex hydro-geotechnical context was aggravated by the discovery, during drilling of the diaphragm walls, of a deep paleo-thalweg which had not been detected during preliminary reconnaissance. After treatment, the earthworks were carried out sheltered by the walls, with no particular problems or impacts on the neighbouring area.* □

EL RENACIMIENTO DE UN PALACIO EN NIZA: EL PARK HÔTEL

STÉPHANE GILBERT, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - ALI KOSSARI, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS - MANH HAI LE, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS

La obra de reestructuración del palacio Park Hôtel de Niza *ha acumulado numerosas dificultades relacionadas con un entorno fuertemente urbanizado y sensible, en un reducido emplazamiento que impone limitaciones. El complejo contexto hidrogeotécnico se ha visto agravado por el descubrimiento, durante la perforación de las pantallas de hormigón, de una profunda paleo-vaguada no detectada durante los reconocimientos preliminares. Tras su tratamiento, las obras de movimiento de tierras se han llevado a cabo protegidas por las pantallas, sin dificultades particulares ni impactos en las zonas circundantes.* □

1
© NGE

STEP DES TROIS RIVIÈRES À CLERMONT-FERRAND - UN CHANTIER DE FONDATIONS SPÉCIALES MULTI-TECHNIQUES EN CONCEPTION-RÉALISATION

AUTEURS : ROBIN PRUNEL, DIRECTEUR D'AGENCE, NGE FONDATIONS - RÉMI CHABANE, INGÉNIEUR D'AFFAIRES, NGE FONDATIONS - JOAO NUNES, RESPONSABLE D'EXPLOITATION, NGE FONDATIONS

LE PROJET DE MODERNISATION ET D'EXTENSION DE LA STEP DES TROIS RIVIÈRES À CLERMONT-FERRAND S'INSCRIT DANS UNE DÉMARCHE DE RÉDUCTION DES REJETS DANS LE MILIEU NATUREL TOUT EN PRODUISANT DU BIOGAZ. LE MARCHÉ COMPREND LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION DE NOMBREUX OUVRAGES, IMPLANTÉS SUR LE SITE ACTUEL EN EXPLOITATION. NGE FONDATIONS INTERVIENT POUR LA RÉALISATION DE L'ENSEMBLE DES FONDATIONS SPÉCIALES DU PROJET, NÉCESSITANT LA MISE EN ŒUVRE DE MULTIPLES TECHNIQUES : PAROIS MOULÉES, POTEAUX PRÉFONDES, BUTONNAGES, PIEUX DE FONDATION ET MICROPIEUX D'ANCRAGE DE RADIER.

PRÉSENTATION DU PROJET

La station d'épuration des Trois Rivières, d'une capacité de 425 000 équivalents habitants, traite les eaux usées de la Métropole de Clermont-Ferrand ainsi qu'une partie des eaux pluviales mélangées aux eaux usées dans les réseaux unitaires, afin de rejeter dans le milieu naturel une eau de qualité conforme aux normes européennes.

Dans le cadre du schéma directeur d'assainissement, un marché de conception-réalisation pour la modernisation et l'extension de cette station (figure 3) a été attribué par Clermont Auvergne Métropole à un groupement d'entreprises composé de Suez-Degrémont (mandataire), Nge GC, Chm Architectes, Scate Automation et Safège Ingénieurs Conseils.

Ce projet qui favorise la transition écologique et la valorisation énergétique, prévoit de diminuer de moitié les rejets d'eaux dans le milieu naturel lors d'évènements pluvieux, tout en intégrant la transformation des boues de la station en gaz naturel. Il consiste en la réalisation de nombreux ouvrages neufs ou rénovés qui sont implantés sur le site actuel de la station en continuité d'exploitation.

Les principaux ouvrages à construire impliquant des travaux de fondations spéciales dans le cadre du projet sont les suivants :

→ Un bassin enterré circulaire de stockage-restitution (BSR) de 21 000 m³ ;

© NGE

1- Atelier de forage des micropieux au fond du bassin de stockage-restitution.

2- Vue aérienne du bassin de stockage-restitution en phase fond de fouille.

1- Micropile drilling rig at the bottom of the storage-release tank.

2- Aerial view of the storage-release tank in the bottom of excavation phase.

→ Un ouvrage enterré rectangulaire de dégrillage implanté à proximité du bassin ;

→ Divers ouvrages neufs en superstructure fondés profondément sur pieux, pour le traitement de l'eau et la valorisation énergétique des boues par la production de méthane (digesteurs, gazomètre, dégrillage, désodorisation, Sédipac, bâtiment d'exploitation, ...).

Le bassin enterré concentre la majorité du volume des travaux et des problématiques géotechniques du projet. Il nécessite la réalisation d'un ouvrage de soutènement étanche définitif en paroi moulée circulaire autostable forée à la benne sur une grande profondeur dans le substratum marneux, associé à des techniques de fondations profondes à l'intérieur de cette structure pour la confection des poteaux préfondés de grande hauteur de type pieux forés au kelly, ainsi que pour les ancrages du radier de type micropieux réalisés en fond de bassin.

L'ouvrage annexe de dégrillage est également réalisé à l'abri d'un soutènement étanche définitif en paroi moulée forée à la benne, avec une profondeur terrassée plus modeste dans la hauteur des terrains alluvionnaires de couverture. La configuration géométrique en paroi plane impose toutefois la mise en œuvre d'un niveau d'appui provisoire constitué de butons métalliques pour permettre les terrassements jusqu'au fond de fouille, avant le coulage des structures intérieures horizontales.

Les autres ouvrages neufs concernent des structures superficielles en béton armé, sans partie enterrée sous le niveau de la nappe, qui nécessitent la mise en œuvre d'un grand nombre de fondations profondes de type pieux forés à la tarière creuse ancrés dans le toit du substratum marneux.

L'intégralité de ces travaux de fondations spéciales est réalisée par Nge Fondations. On propose dans cet article de présenter la diversité des méthodes déployées sur ce chantier, dont les choix ont été orientés par les options techniques qui ont été retenues par le groupement dans le cadre de son marché de conception-réalisation. ▷

3

© AXESSDRONE

L'ORGANISATION DES ÉTUDES

Les études de conception puis d'exécution des différents ouvrages du projet se sont déroulées sur près de 18 mois à partir du lancement de l'opération à l'été 2020.

Ces études sont réparties entre plusieurs intervenants sous le pilotage de Safège, maîtrise d'œuvre intégrée au groupement : Itc réalise les études de structure comprenant la modélisation globale des ouvrages, Sol Solution (partenaire du groupement pour les missions G2 et G3) réalise les études géotechniques, le bureau d'études interne de la Direction Technique Nge Fondations réalise l'intégralité des études et des plans d'exécution des soutènements définitifs en parois moulées, des poteaux préfondés du bassin ainsi que des fondations profondes des différents ouvrages.

L'ensemble des ouvrages fait l'objet d'une modélisation 3D globale sur maquette numérique en coordination avec les différents intervenants, afin de permettre l'intégration du concepteur, du réalisateur et de l'exploitant-mainteneur dès le démarrage de la phase d'études. Ce projet d'intégration de la maquette numérique pour un ouvrage de traitement de l'eau et de valorisation constitue une innovation, récompensée lors de la cérémonie des BIM d'or 2021 (figure 4).

La phase de conception a permis au groupement d'affiner les hypothèses de calcul et de valider les principes constructifs qui avaient été retenus au stade de l'appel d'offres, en intégrant notamment la mise à jour des modèles géotechniques au droit de chaque ouvrage, la prise en compte de la problématique spécifique du gonflement des marnes pour les dispositions constructives à l'interface radier/micropieux du BSR, ainsi que la gestion des interactions sol-structure pour les pieux des différents bâtiments sous sollicitations statiques et sismiques.

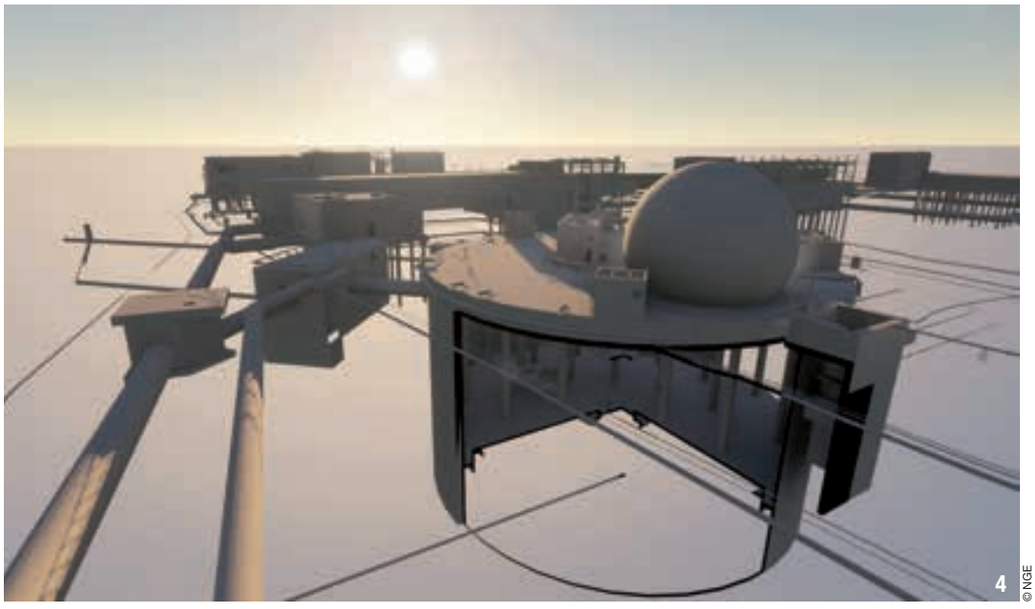
Le BSR a par ailleurs fait l'objet d'une modélisation globale complexe et itérative avec prise en compte des raideurs verticales de l'ensemble des éléments de fondations (paroi moulée, micropieux, poteaux préfondés), afin d'appréhender la juste distribution des efforts de compression et de traction dans chacun des ouvrages, sous les différentes configurations de chargement du projet.

3- Vue aérienne d'ensemble du projet.

4- Maquette numérique du projet.

3- General aerial view of the project.

4- Digital mock-up of the project.



4

© NGE

5

© NGE

LE CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Le site de la STEP présente une altimétrie globalement plane et constante sur l'ensemble du projet, avec une succession lithologique relativement homogène. On relève la présence d'un horizon superficiel alluvionnaire constitué de matériaux argilo-marneux et argilo-sableux surmonté par une couche de remblais d'aménagement du site, puis la présence du substratum marneux compact de l'Oligocène, rencontré à faible profondeur entre 5 m et 10 m sous le niveau du terrain actuel.

Le substratum marneux (figure 5) présente des caractéristiques mécaniques très élevées (Pl* > 5 MPa et Em > 100 MPa), une faible perméabilité de l'ordre de 2.10^{-6} m/s, ainsi qu'un risque potentiel de gonflement.

Le site est classé en zone 3 (aléa modéré) vis-à-vis du risque sismique. Du point de vue hydrogéologique, les sondages et suivis piézométriques réalisés confirment la présence d'une nappe à environ 2 m de profondeur sous le niveau du terrain actuel.

LE BASSIN ENTERRÉ : UNE CONCEPTION GLOBALE OPTIMISÉE

LA PAROI MOULÉE

Le bassin de stockage-restitution de capacité 21 000 m³ est un ouvrage enterré circulaire de diamètre intérieur 45 m, avec une profondeur excavée variable entre 18,50 m (au droit du radier de la zone centrale) et 21,50 m (approfondissement au droit de la cunette périphérique et de la fosse). Le soutènement périphérique étanche est constitué d'une enceinte en paroi moulée définitive d'épaisseur 62 cm et de longueur forée maximale 25,80 m, dont le comportement est assimilé à un anneau autostable, bénéficiant d'une rigidité cylindrique sur toute sa hauteur. Le calepinage du bassin, associé au petit ouvrage rectangulaire adossé en excroissance dit "pot de purge", est constitué d'un total de 25 panneaux de longueur unitaire courante 6,62 m et équipés chacun de 3 cages d'armatures sur toute leur hauteur.

Pour chaque phase de calcul, la vérification structurelle de la contrainte maximale de compression dans la section de béton est vérifiée en considérant l'épaisseur réduite de l'anneau inscrit de la paroi moulée, qui tient compte de la géométrie "en facettes" de ce type de soutènement, ainsi que des tolérances d'implantation (1 cm) et de verticalité du forage (0,5 cm/m) imposées dans le cadre du cahier des charges du projet. La paroi moulée est profondément ancrée dans le substratum marneux compact et semi-imperméable, avec une fiche mécanique minimum de 4,25 m sous le niveau du fond de fouille, permettant de justifier les différents critères de dimensionnement géotechniques usuels pour ce type d'ouvrage (butée, renard solide, boulance et portance), tout en vérifiant un débit d'exhaure théorique inférieur à 20 m³/h, estimé selon la méthode de Davidenkoff pour la phase provisoire de mise à sec de l'enceinte étanche en phase de travaux.

Le forage de la paroi moulée a nécessité une très forte mobilisation de moyens matériels (figures 6 et 7) avec 2 ateliers de production en continu sur une durée de 12 semaines (1 atelier avec benne à câbles et 1 atelier avec benne hydraulique), constitués pour chacun d'un porteur principal équipé de son outil de forage, ainsi que d'un engin de manutention de forte capacité de type grue à flèche treillis sur chenilles pour l'équipement des panneaux, avec la mise en œuvre sur toute la hauteur forée des porte-joints waterstop, des cages d'armatures et des colonnes de bétonnage.

L'ouvrage annexe de dégrillage (figure 8), qui présente une géométrie en "L" de dimensions 9 m x 40 m, a été réalisé dans la continuité des travaux du BSR implanté à proximité immédiate, avec la mobilisation des mêmes moyens humains et matériels.

La conception du soutènement en paroi moulée définitive, pour cet ouvrage courant faiblement enterré sous nappe, a été retenue dans une logique d'harmonisation des modes constructifs, de mutualisation des installations présentes sur site et d'optimisation du planning de réalisation des structures de génie civil verticales.

Le forage est exécuté à la benne en épaisseur 52 cm avec une longueur forée maximale de 12,00 m et un ancrage dans le toit du substratum marneux. La profondeur terrassée est comprise entre 6,00 m et 8,50 m et concerne uniquement la hauteur des terrains alluvionnaires de couverture. La phase de terrassement au fond de fouille nécessite la mise en œuvre d'un lit de butons métalliques provisoires, ▷

5- Substratum marneux en cours de terrassement.

6- Ateliers de forage multi-techniques au droit du bassin de stockage-restitution.

5- Marly substratum during earthworks.

6- Multi-technique drilling rigs near the storage-release tank.

© NGE 6

dont la dépose est programmée juste après le coulage du radier, afin de permettre la réalisation sans encombrement des structures intérieures en élévations.

LES POTEAUX PRÉFONDÉS

La dalle supérieure du bassin est portée par 22 poteaux intérieurs circulaires de grande hauteur en béton armé, qui permettent de reporter les charges verticales appliquées en surface de l'ouvrage jusqu'au substratum marneux sous le radier. Dès la phase d'appel d'offres, le groupement a mené une réflexion de conception générale pour trouver une solution technique alternative à la tâche de coffrage et de coulage traditionnel en place de ces poteaux, initialement prévue à la remontée depuis le fond de fouille du bassin et qui se situe sur le chemin critique du planning d'exécution. Il a ainsi été envisagé de réaliser des poteaux de type préfondés, exécutés de façon anticipée depuis la plateforme de travail haute par la technique de pieux forés au kelly sous boue bentonitique, afin de bénéficier de la mutualisation des installations de centrale à boue déjà prévues pour la réalisation de la paroi moulée.

Les pieux sont forés en diamètre 1 000 mm sur une longueur totale de 23,40 m, avec un ancrage minimal de 5,00 m sous le fond de fouille dans le substratum marneux compact.

Un tubage métallique provisoire est mis en œuvre en tête de forage, sur la hauteur des horizons superficiels alluvionnaires potentiellement instables. Les pieux sont équipés d'une cage d'armatures sur toute leur hauteur, dimensionnée par le BET Structure dans une configuration de poteau vertical vérifié au flambement, avec prise en compte d'un excentrement de la charge axiale du fait des tolérances d'exécution spécifiquement liées au mode de réalisation en pieux forés. Des scellements sont ensuite réalisés en pied de poteaux lors de la phase de terrassements au fond de fouille pour permettre la connexion avec le radier (figure 9).

Ce choix technique de pieux-poteaux préfondés présente une optimisation significative pour le phasage général du BSR et la sécurisation des délais, puisqu'il intègre la confection de l'intégralité des poteaux intérieurs en temps masqué du forage du soutènement périphérique, tout en permettant une anticipation des travaux de Génie Civil de poutraisons en tête de l'ouvrage avant le démarrage des terrassements.

7 © NGE

Il offre également la possibilité de débuter la réalisation de la dalle supérieure sans impact sur le chemin critique du planning, pendant le forage des micropieux en fond de bassin.

LES MICROPIEUX

Le radier du BSR est partiellement fondé sur un réseau de 265 micropieux, qui s'inscrit en complément des appuis rigides verticaux porteurs en béton armé déjà constitués par la paroi moulée périphérique et les 22 pieux des poteaux préfondés.

7- Atelier de forage de la paroi moulée type benne à câbles.

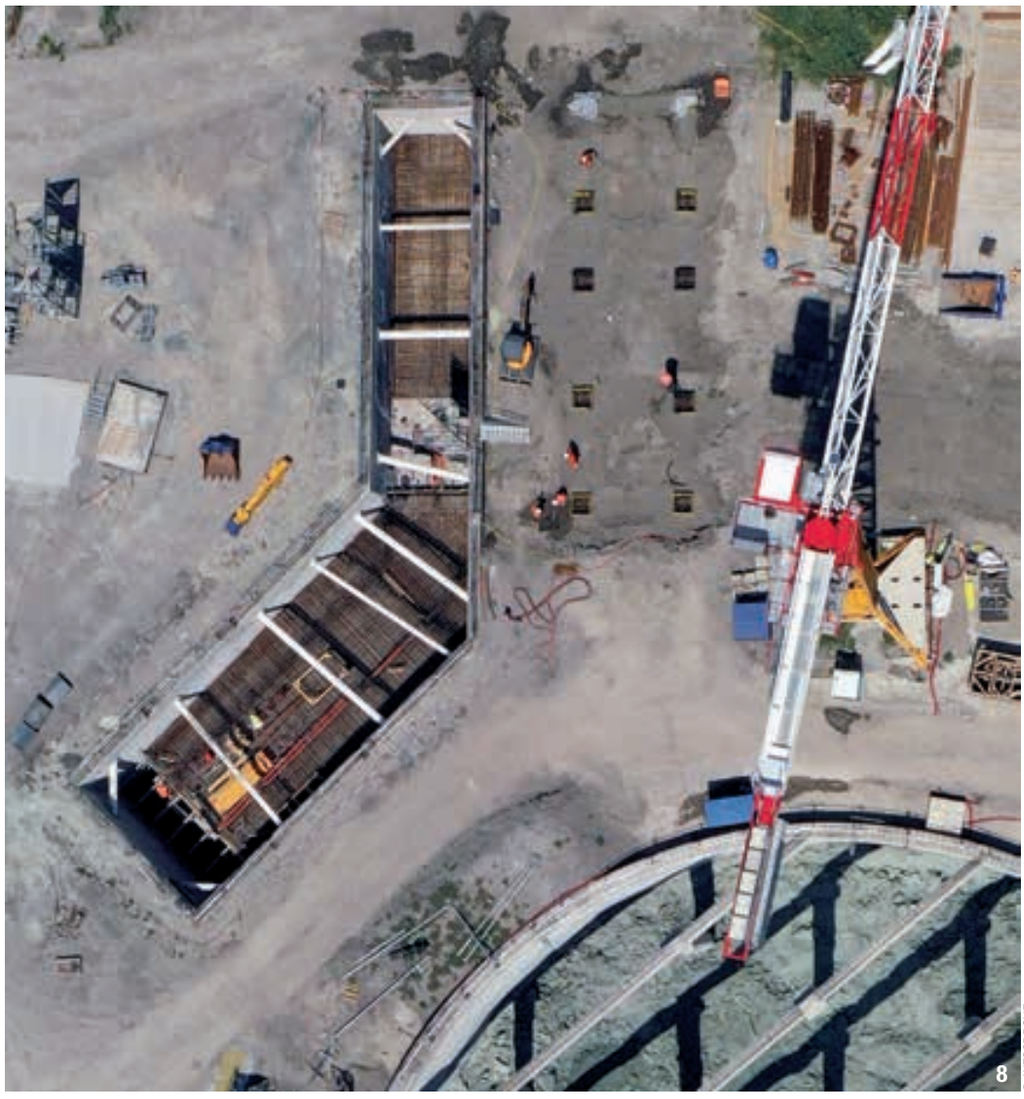
8- Ouvrage de dégrillage avec butons provisoires.

7- Diaphragm wall drilling rig of the cable grab type.

8- Screen cleaning structure with temporary struts.

Les micropieux sont de type III avec un maillage général homogène de 2,00 m x 2,00 m, un diamètre de forage de 200 mm et une longueur de 19,50 m. Ils sont forés à l'air avec un outil trilame et sont ancrés sur toute leur longueur dans le substratum marneux compact. Les micropieux sont réalisés depuis le fond du bassin, nécessitant le grutage des 2 ateliers de forage de 15 t équipés chacun d'un barillet (figure 1).

Afin de s'affranchir des effets du gonflement des marnes, qui constitue un cas de charge de soulèvement très péna-



8 © AXESSDRONE

9

© NGE

10

© NGE

9- Pieux-poteaux préfondés.

10- Atelier de forage des pieux de fondation à la tarière creuse.

9- Plunge column piles.

10- Hollow flight auger foundation pile drilling rig.

lisant pour le dimensionnement des micropieux et du radier, le groupement a retenu une solution technique alternative avec la création d'une couche fusible de polystyrène en sous-face du radier, mise en œuvre après la réalisation des micropieux et avant le coulage du béton de propreté. Le radier présente ainsi un fonctionnement mécanique en dalle portée, sans prise en compte de la raideur verticale du sol d'assise. Les micropieux sont donc sollicités à la fois par des charges de traction (configuration bassin vide) et de compression (configuration bassin plein), avec des ordres de grandeur respectifs globalement équivalents, compris entre +/- 40 à 90 t à l'ELS selon la localisation et les combinaisons de charges.

Les pieux-poteaux, qui constituent des points d'appui très raides dans la modélisation globale du BSR, du fait d'un contraste de raideur élevé apporté par l'effet de pointe, concentrent quant à eux des charges de compression portées jusqu'à 400 t à l'ELS, tandis que leurs charges de traction restent sensiblement équivalentes à celles des micropieux avec une sollicitation moyenne de 50 t.

LES PIEUX DE FONDATION

En parallèle des travaux multi-techniques du BSR et de l'ouvrage de dégrillage, une équipe a été mobilisée en continu avec un atelier de forage à la tarière creuse (figure 10) pour la réalisation de l'ensemble des 321 pieux de fondation du projet, répartis sur 11 ouvrages. Ces fondations courantes de diamètre 42 cm à 62 cm et de longueur variable jusqu'à 13 m maximum, avec mise en œuvre de cages d'armatures, sont systématiquement ancrées dans le toit du substratum marneux. Les études d'exécution ont nécessité l'intégration de problématiques spécifiques liées au contexte sismique, avec application des préconisations du Cahier Technique 38 de l'Afps : modélisations globales itératives des raideurs de pieux en interaction avec le BET Structure et prise en compte ponctuelle du phénomène de liquéfaction des sols ainsi que des efforts de frottement négatif associés. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROIS MOULÉES :
255 m - 4 670 m² - Longueur max 25,80 m

PIEUX FORÉS-BOUE - POTEAUX PRÉFONDÉS :
22 unités Ø 1 000 mm - Longueur 23,40 m

MICROPIEUX - ANCRAGE RADIER :
265 unités Ø 200 mm - Longueur 19,50 m

PIEUX TARIÈRE CREUSE - FONDATIONS :
321 unités Ø 420 à 620 mm - Longueur max 13 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Clermont Auvergne Métropole
ASSISTANT À MAÎTRISE D'OUVRAGE : Cabinet Merlin / Artelia
CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Qualiconsult
GÉOTECHNICIEN PHASE G4 : Hydrogéotechnique
GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Suez-Degrémont (mandataire) - Nge GC - Chm Architectes - Scate Automation
MAÎTRISE D'ŒUVRE GROUPEMENT : Safège Ingénieurs Conseils
BET STRUCTURE GROUPEMENT : Itc
GÉOTECHNICIEN GROUPEMENT : Sol Solution

ABSTRACT

TROIS RIVIERES SEWAGE TREATMENT PLANT IN CLERMONT-FERRAND - A MULTI-TECHNIQUE SPECIAL FOUNDATIONS DESIGN AND BUILD PROJECT

ROBIN PRUNEL, NGE FONDATIONS - REMI CHABANE, NGE FONDATIONS - JOAO NUNES, NGE FONDATIONS

The project for modernisation and extension of the Trois Rivières sewage treatment plant in Clermont-Ferrand *forms part of an overall approach to reducing discharges into the natural environment while ensuring the production of biogas. This Design and Build project enabled the NGE Fondations teams to deploy multiple techniques for execution of all the project's special foundations, on the various structures to be built on the premises of the current site in operation (diaphragm walls, slurry bored piles, continuous flight auger piles and micropiles). At peak production, up to 30 personnel and 5 drilling rigs were operating simultaneously on the site. The foundation works took place over a period of one year between November 2021 and November 2022.* □

PTAR DE TROIS RIVIERES EN CLERMONT-FERRAND - UNA OBRA DE CIMENTACIÓN ESPECIAL MULTI-TÉCNICAS EN DISEÑO-REALIZACIÓN

ROBIN PRUNEL, NGE FONDATIONS - REMI CHABANE, NGE FONDATIONS - JOAO NUNES, NGE FONDATIONS

El proyecto de modernización y ampliación de la planta depuradora de Trois Rivières, en Clermont-Ferrand (Francia), *se inscribe en una política global de reducción de los residuos en el medio natural, produciendo a mismo tiempo biogás. Esta obra de diseño-realización ha permitido a los equipos de Nge Fondations desplegar múltiples técnicas para la realización de la totalidad de los cimientos especiales del proyecto en las distintas construcciones previstas en la superficie del emplazamiento actual en explotación (pantallas de hormigón, pilotes perforados en lodo, pilotes de barrena continua y micropilotes). En el pico de producción, han intervenido simultáneamente en la obra hasta 30 personas y 5 unidades de perforación. Las obras de cimentación se han desarrollado a lo largo de un año, entre noviembre de 2021 y noviembre 2022.* □

© CÉDRIC HELSLY

DE LA BIOMINÉRALISATION POUR SÉCURISER LE PONT RENÉ THINAT À ORLÉANS

AUTEURS : VINICIUS GARCIA DE OLIVEIRA, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - ANNETTE ESNAULT FILET, CHEF DE PROJET BIOCALCIS®, SOLETANCHE BACHY

LES TRAVAUX D'INJECTION AU NIVEAU DU PONT RENÉ THINAT À ORLÉANS REPRÉSENTENT UNE PREMIÈRE MONDIALE DE RENFORCEMENT D'UN OUVRAGE EXISTANT À L'AIDE D'UN PROCÉDÉ BIOLOGIQUE. LA MISE EN ŒUVRE DE CE NOUVEAU PROCÉDÉ, APPELÉ BIOCALCIS®, EST PARTICULIÈREMENT ADAPTÉE AUX OUVRAGES FRAGILISÉS, EN RAISON DE L'ABSENCE DE RISQUE DE MONTÉE EN PRESSION, DANS UN TERRAIN PRÉSENTANT UNE GÉOLOGIE ET UNE RÉPARTITION GRANULOMÉTRIQUE FAVORABLES À LA BIOMINÉRALISATION.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Le pont René Thinat (figure 1), construit en 1974, est un axe de circulation majeur composé de 4 voies de circulation routière et d'une piste cyclable permettant le franchissement de la Loire. Sa culée Nord, située à Orléans, est constituée d'un mur en remblais renforcés : chacune des écailles en béton, de format cruciforme et de dimensions 1,5 m x 1,5 m et d'épaisseur 18 ou 22 cm, était originalement ancrée au sol par au moins 4 renforcements métalliques de type lisse de section 80 x 3 mm et 50 x 5 mm en acier E24 galvanisé de longueur variable.

La rampe est soutenue par deux murs en retour (murs n°1 et n° 2), et un mur de front. Les deux murs en retour, n°1 et 2, font respectivement 106,7 m et 108,2 m de longueur, dont une partie est complètement enterrée sur un linéaire d'environ 15 m. Leur hauteur maximale est de 7,48 m. Le mur de front fait 32,8 m de longueur et atteint une hauteur maximale de 8,61 m. Une campagne de sondages menée par le pôle Ouvrages d'Art d'Orléans Métropole en 2019 a mis en évidence

1- Vue globale du pont René Thinat pendant les travaux.

1- Overall view of René Thinat Bridge during the works.

© CÉDRIC HELSLY

© SOLETANCHE BACHY

2- Carottage des écailles réalisé sur le mur n°2 et sur le mur de front pour les travaux de clouage.

3- Renforcement par clouage à l'aide d'une pelle-glissière.

2- Core sampling of facing panels performed on wall No. 2 and on the front wall for nailing work.

3- Strengthening by nailing using a sliding shovel.

une corrosion avancée sur les renforcements en acier de l'ouvrage. Ainsi, des travaux de renforcement se sont avérés nécessaires pour sécuriser un des plus importants axes de circulation d'Orléans.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET SOLUTIONS MISES EN ŒUVRE

Les travaux de réparation consistent en un renforcement par clouage et en une réparation par injection sur une partie du mur de front où le clouage ne peut être exécuté à cause de l'existence du tablier de pont devant le mur de front.

→ Renforcement de clouage (figures 2 et 3).
Environ 350 clous forés en diamètre 115 mm, constitués d'une barre en acier de 35 mm de diamètre, avec une longueur maximale de 6,70 m dans le sol, sont mis en place au centre de chaque écaille. La profondeur et l'emplacement de certains clous sont adaptés afin de préserver les divers réseaux en fonctionnement traversant longitudinalement l'ouvrage (télécommunications et eau pluviale en diamètre 1 000 mm) et les arbres existants devant l'ouvrage.

→ Injections Biocalcis®.
Une réparation par injection à la rencontre du mur de front et mur n°1 est mise en œuvre, car un renforcement par clouage n'est pas envisageable. En effet, l'exécution des clous dans cette zone engendrerait la création d'ouvertures qui pourraient fragiliser le tablier du pont reprenant les efforts liés à la circulation.

Un phasage précis est déployé, afin de permettre la réalisation des travaux en sécurité depuis les voies routières en gardant un itinéraire continu dans les deux sens de circulation pendant toute la durée du chantier (figure 4).

En raison des caractéristiques du terrain en place (remblais techniques) et de la fragilité de l'ouvrage, la mise en œuvre du Biocalcis® se montre plus adaptée que les méthodes traditionnelles de renforcement de sol comme les injections de ciment ou de résine. En effet, les pressions d'injection sont limitées, ce qui diminue significativement le risque de mouvement des écailles.

Le procédé Biocalcis® est un procédé d'injection par biominéralisation, processus par lequel des organismes vivants sont capables de produire des dépôts minéraux. Il repose sur l'utilisation de bactéries calcifiantes conduisant à la formation d'un biominéral à base de carbonate de calcium $CaCO_3$ sous forme de calcite. De nombreux procédés de biominéralisation ont été développés dans différentes industries ces dernières années, l'un des avantages étant l'obtention de composés généralement beaucoup plus résistants mécaniquement que leur homologue purement minéral obtenu par voie chimique.

Le procédé Biocalcis® a fait l'objet de nombreuses évolutions depuis les premiers essais sur site au cours de ces 5 dernières années. La qualité mécanique du biominéral formé repose sur les propriétés et la stabilité des bactéries produites à l'échelle industrielle, ainsi que sur la maîtrise du procédé de mise en œuvre. On soulignera notamment l'importance de la composition de la solution calcifiante et des paramètres d'injection qui doivent être systématiquement et spécifiquement adaptés au milieu à traiter et aux objectifs visés.

RAPPEL DES PRINCIPES GÉNÉRAUX DE BIOCALCIFICATION

La cimentation biologique est obtenue grâce à une réaction enzymatique conduisant à la formation de calcite in situ. Cette réaction est catalysée par une bactérie non pathogène et naturellement présente dans les sols - *Sporosarcina pasteurii* - en présence d'une solution calcifiante composée d'urée et d'un sel de calcium (figure 5).

Le procédé Biocalcis®, développé et breveté par Soletanche Bachy, est mis en œuvre pour des applications sous nappe statique ou hors nappe, pour des applications très variées telles que des traitements contre la liquéfaction, la réduction de poussée active (remblais renforcés, quais), la stabilisation de talus, la restauration de monuments historiques, ...

Lors de la mise en œuvre dans un massif de sol, l'injection s'effectue en deux phases. Une suspension de bactéries est tout d'abord injectée ; les bactéries sont ensuite laissées au repos quelques heures pour favoriser leur fixation dans le sol. La solution calcifiante est injectée dans un deuxième temps ; elle est également laissée au repos pendant environ 12 heures, le temps que les réactions d'hydrolyse de l'urée et de précipitation de calcite opèrent. ▷

4

© CÉDRIC HELSLY

Selon la quantité de calcite recherchée, le cycle d'injection de solution calcifiante et de bactéries peut être répété plusieurs fois. Les propriétés physiques et mécaniques du sol traité sont atteintes en un ou deux jours à l'issue du traitement et n'évoluent plus dans le temps.

La calcite correspond à une forme minérale très stable de carbonate de calcium $CaCO_3$. Les cristaux formés vont lier physiquement les grains de sol entre eux et considérablement augmenter la cohésion et la résistance mécanique du milieu traité. Le matériau obtenu est assimilable à un grès calcaire dont la résistance mécanique peut atteindre en quelques jours - en fonction des paramètres du traitement- quelques centaines de kPa (comme une argile dure) à plusieurs MPa (comme un béton). On soulignera que ces très fortes résistances mécaniques sont obtenues en multipliant les cycles d'injection et que ces applications ne sont pas visées par le procédé Biocalcis®.

Soletanche Bachy dispose d'une expérience et d'un savoir-faire importants dans le domaine de la biocalcification. Ainsi, pour chaque projet, il est possible de s'appuyer sur une base de données constituée à partir d'essais de laboratoire et d'essais Pilote, ainsi que des mises en œuvre sur sites réels. Préalablement à un chantier, la réalisation d'essais en laboratoire est cependant également préconisée.

OBJECTIFS DE TRAITEMENT

Avant le démarrage des travaux à Orléans, des échantillons du terrain ont donc été prélevés pour la réalisation des essais en laboratoire et la détermination des critères d'injection nécessaires pour atteindre des caractéristiques mécaniques suffisantes pour justifier la stabilité de l'ouvrage.

On recherche en effet la création d'un massif cohésif autostable, en considérant qu'après traitement le remblai aura un comportement composé, à la fois frottant et cohésif.

Les dimensions, ainsi que la cohésion ciblée du massif traité, ont été justifiées selon deux approches complémentaires :

→ Annulation de la poussée active sur les écailles du mur en remblais renforcés ;

→ Vérification de la stabilité du massif traité par Biocalcis® en considérant ce massif comme un mur poids.

Les calculs ont donc permis de déterminer que le traitement Biocalcis® doit élever la cohésion des remblais en place, originairement nulle, à 50 kPa.

Les essais de laboratoire, réalisés en colonnes reconstituées à partir du remblai prélevé en place, ont permis de valider le taux de calcite à atteindre pour garantir cette cohésion, ainsi que les paramètres d'injection (concentration des bactéries - nature et concentration de la solution calcifiante - débits d'injection).

4- Travaux Biocalcis® sur le pont René Thinat conservant une circulation permanente dans les deux sens.

5- Précipitation de calcite obtenue par réaction des bactéries avec une solution nutritive calcifiante.

4- Biocalcis® work on René Thinat Bridge maintaining a constant traffic flow in both directions.

5- Calcite precipitation obtained by reaction of the bacteria with a calcifying nutrient solution.

PLOT D'ESSAIS CHANTIER

Une fois sur place, et compte tenu de l'hétérogénéité des remblais, un plot d'essai in situ a été réalisé pendant le mois d'avril.

L'objectif est de valider les caractéristiques mécaniques du terrain après les injections par rapport aux hypothèses initiales, c'est-à-dire l'obtention de la cohésion de 50 kPa en place.

Les contrôlés retenus consistent en la réalisation d'un essai au pressiomètre et un essai CPT, sur la base de corrélations couramment pratiquées dans des sols analogues. On recherchera donc une pression limite supérieure à 1,5 MPa.

Le plot d'essais (figure 6) a été réalisé sur une surface de l'ordre de 25 m². Il a consisté en l'implantation

PRÉCIPITATION DE CALCITE OBTENUE PAR RÉACTION DES BACTÉRIES

avec une solution nutritive calcifiante

5

© SOLETANCHE BACHY

© CÉDRIC HELSLY

6

6- Injection de la suspension bactérienne pour confortement de culée Nord du pont.

7- Comparaison de pressions limites nettes obtenues via des essais pressiométriques avant et après injections Biocalcis®.

6- Injection of the bacterial suspension to consolidate the northern abutment of the bridge.

7- Comparison of net limit pressures obtained via pressure meter tests before and after Biocalcis® injections.

de 14 forages à 5 m de profondeur, équipés de tubes à manchettes scellés au terrain par un coulis de gaine à base de ciment. Ce plot d'essais a été réalisé avec les moyens usuels du chantier, à savoir :

- → Pour la préparation des bactéries, un cubitainer équipé d'une pompe et d'un bac de reprise pour la réhydratation des bactéries par batch de 1 m^3 ;
- → Pour la préparation de la solution calcifiante, une centrale de préparation de type MP 1000 pour la dissolution des produits de base livrés en sacs de 25 kg ;
- → Pour les injections, un système automatisé de type Spice pour les consignes en matière de pression, volume et débit (l'injection des bactéries et des solutions calcifiantes a été réalisée à l'aide de pompes de type PH2x5 par passes remontantes de 1 m) (figure 6).

Ce plot d'essais a permis de valider les critères d'injection retenus via des essais pressiométriques et au pénétromètre statique (CPT). Il a été constaté une nette amélioration des pressions limites du sol (Pl*), avec une augmentation moyenne des Pl* de 3 fois (figure 7) par rapport aux valeurs initiales avant injection et une réduction de la profondeur de refus à l'essai CPT. En complément de ces caractérisations mécaniques, des images au Microscope Electronique à Balayage (MEB) ont démontré la présence de cristaux de calcite néoformés sur des échantillons prélevés dans la partie supérieure du traitement.

LES TRAVAUX DÉFINITIFS

Les travaux définitifs (hors plot d'essai - figure 8) ont consisté en :

- → La réalisation de 53 forages verticaux et inclinés ;
- → L'équipement des forages avec des tubes à manchettes ;
- → La mise en œuvre d'un volume total de 170 m^3 de bactéries *Sporosarcina pasteurii* et de solution calcifiante.

Les injections de bactéries et de solution calcifiante sont réalisées à l'aide d'une centrale automatisée permettant d'optimiser les volumes et d'avoir un contrôle en temps réel des pressions, les paramètres d'injection ayant pu être affinés à l'issue du plot d'essais.

Aucune difficulté particulière n'a été rencontrée lors des travaux qui se sont donc déroulés de manière conforme au plot d'essai (figure 9). On soulignera cependant qu'au moment des journées de canicule du mois de juin, au cours desquelles les températures extérieures sont montées jusqu'à 40°C, il a été nécessaire d'adapter légèrement les protocoles. Les adaptations ont principalement porté sur un ajustement de la concentration de la suspension bactérienne afin que la réaction ne soit pas impactée par la chaleur.

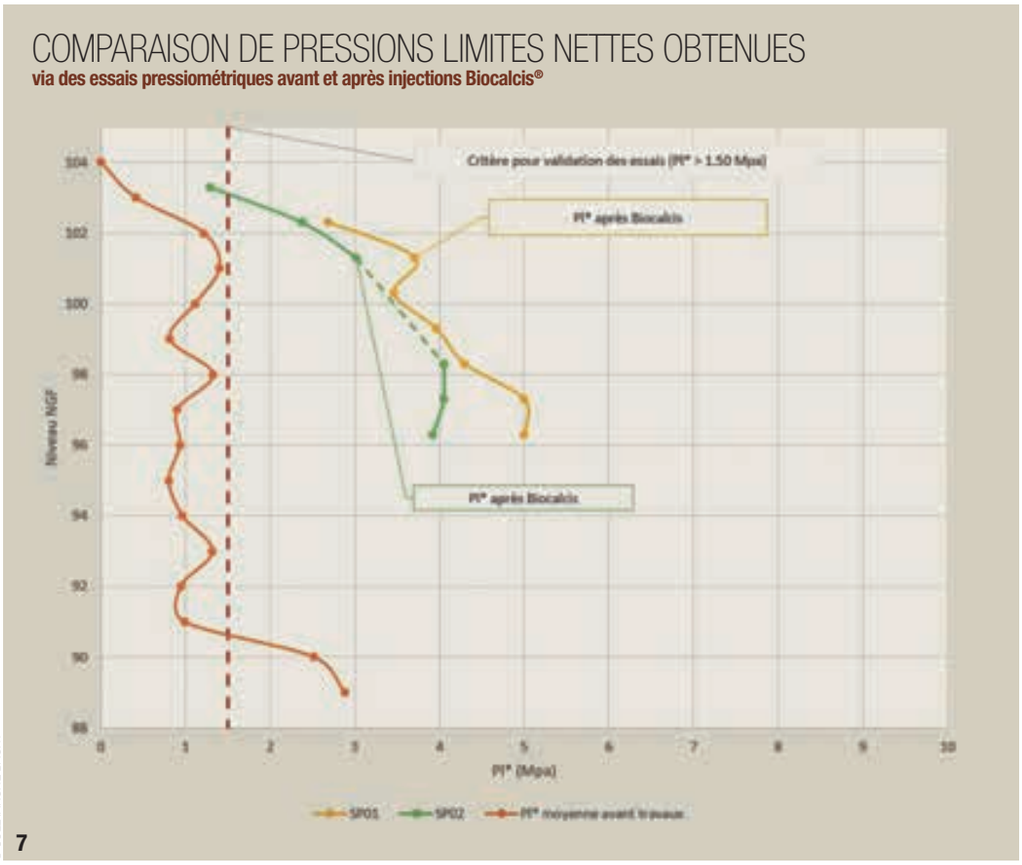
Les contrôles post-traitement ont consisté en des essais pressiométriques, qui ont démontré que la pression limite de 1,50 MPa était bien atteinte, ce qui a permis de valider l'ensemble du traitement de bio-consolidation.

CONCLUSION

Le procédé Biocalcis® offre une alternative très intéressante pour le renforcement de terrains sableux dans des zones particulièrement sensibles à des montées en pression.

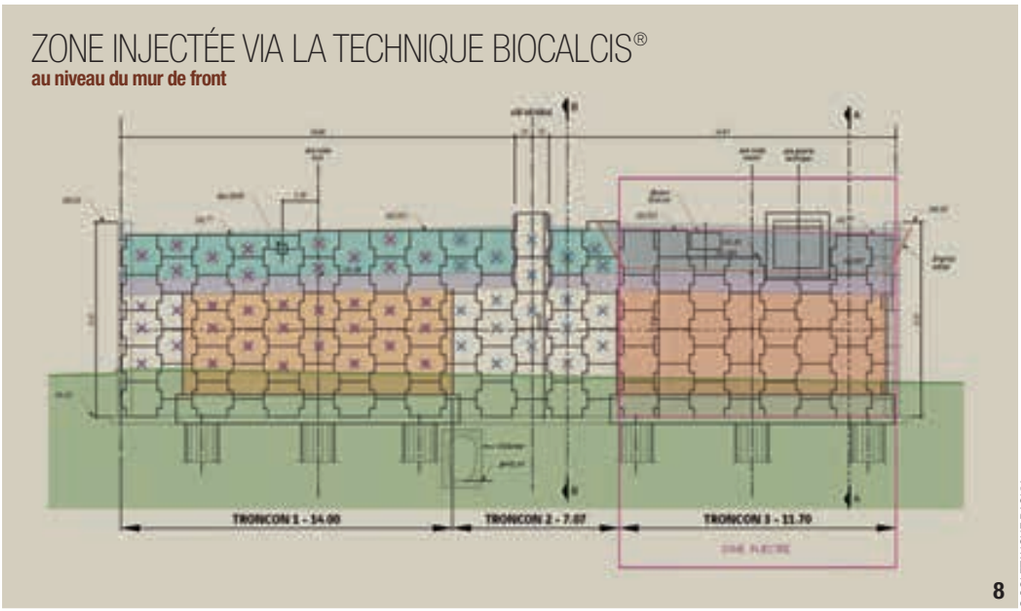
L'application au pont René Thinat a démontré l'intérêt technique de la solution qui a été mise en œuvre en respectant l'ensemble des contraintes de chantier. La rapidité de la réaction permet de réaliser les contrôles dans des délais très courts, dans les jours qui suivent la fin du traitement.

Appliqué au renforcement de murs en remblais renforcés dont l'action stabilisatrice des armatures n'est plus assurée en raison des problèmes de corrosion, le traitement permet donc de les rendre autostables et de garantir leur pérennité. ▷



© SOLETANCHE BACHY

7



8

© SOLETANCHE BACHY

8- Zone injectée via la technique Biocalcis® au niveau du mur de front.

9- Interface entre la zone renforcée par les injections Biocalcis® et celle par les travaux de clouage sur le mur n°1.

8- Area injected via the Biocalcis® technique at the front wall level.

9- Interface between the area strengthened by Biocalcis® injections and that strengthened by nailing work on wall No. 1.

9

© SOLETANCHE BACHY

Biocalcis® complète avantageusement la gamme des procédés proposés par Soletanche Bachy dans le domaine des injections des sols de faible perméabilité, en offrant un traitement particulièrement efficace dans les sables fins, mais également dans des matériaux de granulométrie plus étalée respectant les critères d'injectabilité. □

RÉCAPITULATIF DES QUANTITÉS

TRAVAUX DE CLOUAGE :
- **360 clous, dont 15 témoins de durabilité**
- **1 600 m perforés**

BIOCALCIS® (hors plot d'essai) :
- **54 forages totalisant 532 m perforés**
- **170 m³ injectés (bactéries *Sporosarcina pasteurii* et solution calcifiante)**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Orléans Métropole - Pôle Ouvrages d'Art
MAÎTRISE D'ŒUVRE : groupement Ingérop / Geos
ENTREPRISE PRINCIPALE : Soletanche Bachy France

ABSTRACT

BIOMINERALISATION TO IMPROVE THE SAFETY OF RENE THINAT BRIDGE IN ORLEANS

VINICIUS GARCIA DE OLIVEIRA, SOLETANCHE BACHY FRANCE - ANNETTE ESNAULT FILET, SOLETANCHE BACHY

To improve the safety of René Thinat Bridge in Orléans, *strengthening work was required on the reinforced fill wall. To perform the works, a combination of two techniques was needed, one of which was conventional nailing. Before the front wall, due to the presence of the bridge deck, it was an extremely innovative solution that was adopted with the implementation of a new process of grouting by biomineralisation (biogrouting). The Biocalcis® grouting process, emulating a natural process of calcification, proved very effective in making the wall free-standing in this area, without presenting a risk for the stability of the bridge during its execution.* □

BIOMINERALIZACIÓN PARA ASEGURAR EL PUENTE RENE THINAT EN ORLEANS

VINICIUS GARCIA DE OLIVEIRA, SOLETANCHE BACHY FRANCE - ANNETTE ESNAULT FILET, SOLETANCHE BACHY

Para asegurar el puente René Thinat en Orleans, *ha sido preciso llevar a cabo obras de refuerzo del muro de terraplenes reforzados. Para efectuar dichas obras, se han tenido que combinar dos técnicas, una de ellas tradicional por claveteado. Sin embargo, delante del muro frontal, dada la presencia del tablero del puente, se ha elegido una solución muy innovadora, que ha consistido en aplicar un proceso de inyección por biomineralización. El proceso de inyección Biocalcis®, que imita un proceso natural de calcificación, ha resultado muy eficaz para lograr la autoestabilidad del muro en esa zona, sin riesgos para la estabilidad de la construcción en el momento de su puesta en práctica.* □

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

OFFRE SPÉCIALE*

www.revue-travaux.fr

PAR NUMÉRO : 15€ AU LIEU DE 25€

*Offre valable jusqu'au 30/06/23

BON DE COMMANDE ▪ REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

À renvoyer à : Com et Com - Service Abonnements TRAVAUX - Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot - 92350 Le Plessis-Robinson
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) :

☐ 967 x___	☐ 972 x___	☐ 977 x___
☐ 968 x___	☐ 973 x___	☐ 978 x___
☐ 969 x___	☐ 974 x___	☐ 979 x___
☐ 970 x___	☐ 975 x___	☐ 980 x___
☐ 971 x___	☐ 976 x___	☐ 981 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 30/06/23 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 peut s'exercer auprès du service abonnements. Ces données peuvent être communiquées à des organismes extérieurs. 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

1

© CÉDRIC HELSLY

RÉAMÉNAGEMENT DU RONDEAU, UNE TRANCHÉE COUVERTE ROUTIÈRE STRATÉGIQUE POUR L'AGGLOMÉRATION GRENOBLOISE

AUTEUR : PIERRE-BENOIT PASSOT, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE

DANS LE CADRE D'UN PROJET ROUTIER GLOBAL VISANT À AMÉLIORER LES CONDITIONS DE CIRCULATION ET DE DESSERTE DE L'AGGLOMÉRATION GRENOBLOISE, LA DREAL AUVERGNE RHÔNE-ALPES RÉAMÉNAGE L'ÉCHANGEUR DU RONDEAU, NŒUD DE CIRCULATION CONNECTANT LA RN 87 " ROCADE SUD " AVEC L'AUTOROUTE URBAINE A 480. DANS CE SECTEUR URBANISÉ, LA CONSTRUCTION D'UNE TRÉMIE ROUTIÈRE EN PAROI MOULÉE ET LA RÉVISION DU SCHÉMA DE CIRCULATION DOIT PERMETTRE LA FLUIDIFICATION DU TRAFIC ET LE RÉTABLISSEMENT D'UNE CONTINUITÉ URBAINE. POUR L'EXÉCUTION DE CES TRAVAUX À FORTE COMPOSANTE GÉOTECHNIQUE, L'ENJEU PRINCIPAL CONSISTE À CONSTRUIRE LA NOUVELLE INFRASTRUCTURE EN MINIMISANT LES PERTURBATIONS SUR LA CIRCULATION QUOTIDIENNE DES QUELQUES 100 000 USAGERS QUI EMPRUNTENT CET AXE.

UN PROJET STRUCTURANT A L'ÉCHELLE DE L'AGGLOMÉRATION

La circulation routière de transit et de desserte de l'agglomération grenobloise s'organise autour de deux axes principaux. D'une part l'autoroute urbaine A 480 (axe Lyon-Sisteron), construite pour les jeux olympiques de 1968 et désormais exploitée par AREA (groupe APRR) à 2 x 2 voies. D'autre part, la RN 87 ou rocade Sud, appartenant aux services de l'état et ouverte en 1985. Cette voirie également à 2 x 2 voies s'étend vers l'est en direction de Chambéry. Ces deux axes convergent au niveau de l'échangeur du Rondeau, qui dessert également la RD 6, en direction des villes périphériques de l'ouest de la métropole, via un ouvrage d'art sur la rivière Drac.

Ces infrastructures s'avèrent aujourd'hui saturées et inadaptées face à l'augmentation du trafic routier, entraînant des congestions et un report de charge sur les axes urbains. Dans ce contexte, Area et l'État procèdent à la restructuration globale de ces axes comprenant l'élargissement à 2 x 3 voies sur 7 km de l'A480 (opération sous maîtrise d'ouvrage Area entamée en 2019 et sur le point de s'achever) et le réaménagement de l'échangeur du Rondeau (figure 3). Ce second volet de l'opération est réalisé sous maîtrise d'ouvrage Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Auvergne Rhône-Alpes. Il est cofinancé par l'État, le département de l'Isère, Grenoble Alpes Métropole

© CÉDRIC HELSLY

2

et la Région Auvergne Rhône-Alpes. La conception du projet et la maîtrise d'œuvre de l'opération est assurée par la Direction Interdépartementale des Routes Centre Est (DIR-CE), qui est également exploitant de la voirie.

SÉPARER LES FLUX POUR FLUIDIFIER LA CIRCULATION

La situation actuelle de l'échangeur du Rondeau à l'extrémité Ouest de la RN87 se caractérise par la distribution du trafic via un point triple (intersection avec l'A480 Nord, l'A480 Sud et le RD6) et par la présence d'un échangeur avec un boulevard urbain majeur (RD1075, cours de la Libération) situé 300 m en amont de l'échangeur principal. Cette proximité entre les deux nœuds se traduit par un effet de cisaillement du trafic sur une très courte distance, générant congestions et risques accrus pour la sécurité des usagers.

1 & 2- Vue générale du chantier.

3- Périmètre du projet A480-Rondeau.

1 & 2- General view of the site.

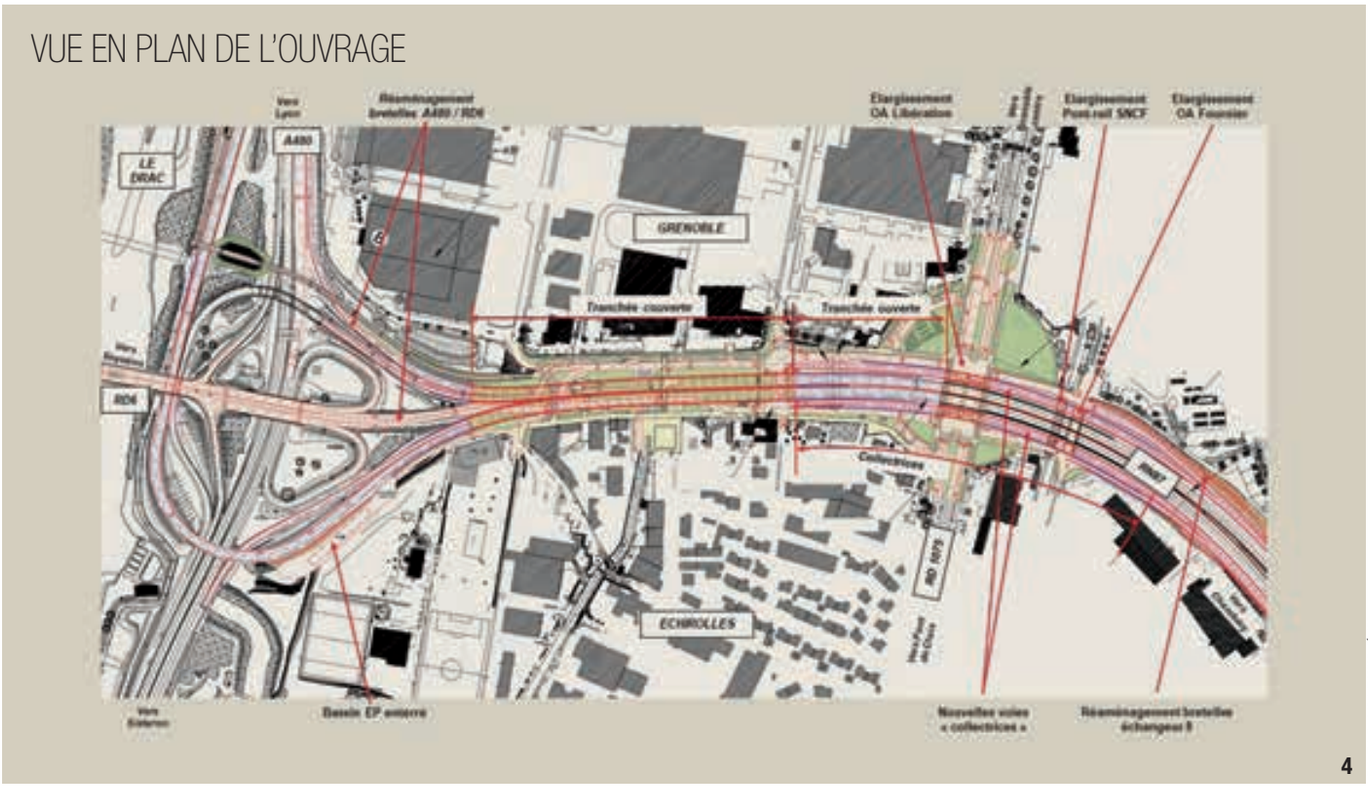
3- Area of the A480-Rondeau project.

La philosophie du projet vise à séparer les flux principaux de transit circulant sur l'axe Lyon-Chambéry ou Sisteron-Chambéry, des flux locaux entre le cours de Libération et la RD6. Pour ce faire, les axes de circulation principaux A480-RN87 sont amenés en souterrain dans une tranchée couverte de 300 m de longueur environ. La dalle supérieure de la tranchée accueille, quant à elle, les échanges locaux entre le cours de la Libération orienté nord-sud et la RD6 qui dessert la rive Ouest du Drac. Cette dalle fait l'objet d'un aménagement urbain soigné sous forme de parvis végétalisé, pour rétablir la continuité urbaine entre la ville d'Echirolles au sud et celle de Grenoble au nord (figure 4). Pour raccorder la RD6 située en surface, à la RN87 en contrebas, deux voies latérales dites "collectrices" sont construites de part et d'autre de la rocade existante et permettront d'accéder au parvis ou de s'insérer sur la rocade. La création de ces nouvelles voies requiert d'élargir trois ouvrages d'art existant : la RD1075 - Cours de la Libération, le pont Fournier et un pont-rail SNCF sur l'axe ferroviaire à voie unique Grenoble-Veynes. Cette dernière prestation fait l'objet d'un marché à part entière, sous maîtrise d'ouvrage SNCF Réseau.

Le projet poursuit également des objectifs environnementaux au sens large du terme, comprenant une meilleure intégration paysagère, la modération des émissions acoustiques, l'amélioration du traitement des eaux pluviales et la création de continuités cyclables en site propre. ▷

© APRR - DREAL

3



4

© DIR-CE SREI DE CHAMBÉRY

CONTEXTE ET CHOIX DE CONCEPTION

Ces nouvelles infrastructures s'inscrivent dans un environnement urbain dense avec peu d'emprise disponible au-delà des infrastructures routières existantes. Il est également nécessaire d'abaisser les profils en long des axes routiers sous le niveau de la nappe. De ce fait, des soutènements relativement étanches sont à créer pour abriter les nouvelles chaussées.

Géotechniquement, le projet s'inscrit dans le bassin alluvial du Drac constitué essentiellement de graves sableuses qui règnent sur l'ensemble du projet. Ces matériaux de bonne qualité présentent des caractéristiques géotechniques relativement élevées (angle de frottement de 35° à 38° et pression limite nette entre 3 et 4 MPa), offrant des butées et frottements intéressants pour optimiser les ouvrages.

Du point de vue hydrogéologique, le projet est baigné par la nappe d'accompagnement du Drac qui s'écoule du sud vers le nord à travers les alluvions quaternaires perméables (de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-4} m/s). La charge d'eau au fond de fouille varie majoritairement entre 1 et 3 m en niveau fréquent (1,4 m de plus en régime exceptionnel). La prise en compte de la nappe dans la conception et la gestion de l'eau en phase chantier constituent donc des enjeux majeurs du projet.

Le concepteur a retenu une solution de tranchée couverte à l'abri de deux parois moulées latérales et une paroi centrale séparant les deux tubes (figure 5). Les parois moulées sont prolongées vers l'est, dans une zone en tranchée ouverte (sans dalle de couverture) jusqu'à l'ouvrage du cours de la Libération. Un soutènement en paroi moulée est également retenu pour la construction des collectrices qui s'inscrivent au droit des talus historiques qui bordaient la RN. Dans toutes les zones où la paroi n'est pas butonnée en tête par une dalle, la stabilité des soutènements nécessite un niveau d'appui définitif (localement deux niveaux) de type ancrage passif (figure 6).

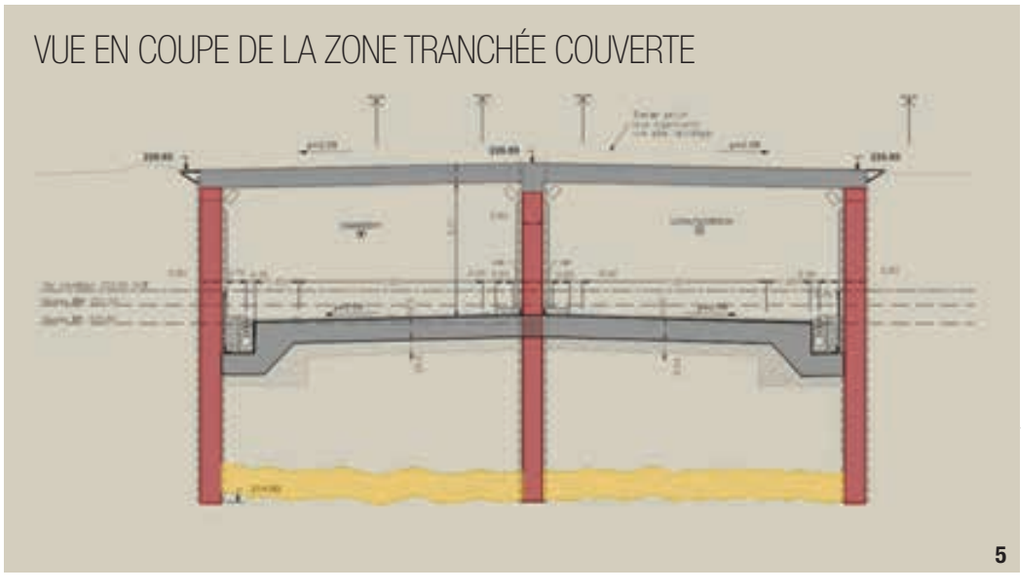
Mécaniquement, les traverses en génie civil sont encastrées sur les têtes de parois, tandis que les radiers sont articulés et s'opposent aux sous-pressions par leur poids propre. La structure doit répondre aux cas de charges sismiques (aléa moyen dans le bassin grenoblois), ainsi qu'aux sollicitations accidentelles au feu, conformément à la réglementation des tunnels routiers.

4- Vue en plan de l'ouvrage.

5- Vue en coupe de la zone tranchée couverte.

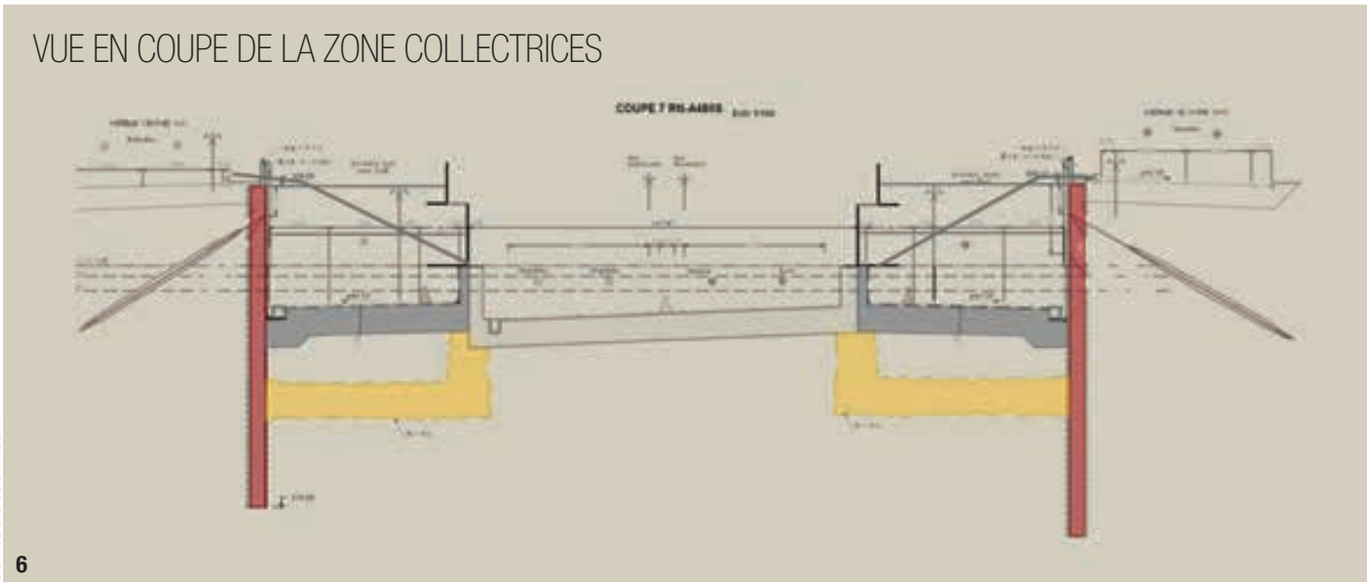
4- Plan view of the structure.

5- Cross-section view of the cut-and-cover area.



5

© DIR-CE SREI DE CHAMBÉRY



© DIR-CE SREI DE CHAMBÉRY

6

La tranchée couverte présente un gabarit de 5 m de hauteur et de 10,9 m de largeur pour chaque tube, permettant d'accueillir deux voies de circulation de 3,5 m, une bande dérasée à droite de 2,35 m et un trottoir de service sur caniveau siphoïde. Les collectrices accueilleront une seule voie de circulation en définitif mais elles possèdent un gabarit de 7,5 m minimum pour permettre la circulation à deux voies de la RN en phase provisoire.
Enfin, le projet comprend la réalisation d'un bassin enterré en parois moulées, permettant la décantation des eaux pluviales avant rejet au Drac et l'isolement d'un éventuel épisode de pollution.

6- Vue en coupe de la zone collectrices.

7- Travaux de parois moulées de la tranchée couverte.

6- Cross-section view of the collector roads area.

7- Diaphragm wall work on the cut-and-cover tunnel.

UN PHASAGE PRIVILÉGIANT LE MAINTIEN DE LA CIRCULATION

Compte-tenu de l'importance de la RN 87 pour la circulation dans l'agglomération, le maître d'ouvrage impose le maintien, durant toute la durée du chantier, d'une circulation à deux voies dans les deux sens sur la RN 87. Seules des neutralisations de voies et quelques fermetures exceptionnelles sont autorisées de nuit, pour les travaux sur voiries.
Pour satisfaire cette contrainte majeure, l'ordonnancement du projet a été conçu de manière à pouvoir dévier le trafic par basculements successifs sur les zones où les travaux sont achevés.
Concrètement, les travaux débutent par la création des collectrices latérales et l'élargissement des ouvrages d'art en partie Est du projet. Dans la zone de la tranchée couverte, la circulation est resserrée au sud dans un premier temps pour exécuter la paroi moulée Nord, ▷

© CÉDRIC HELSLY

7

8

© CÉDRIC HELSLY

puis déviée au nord sur la paroi achevée, pour réaliser les parois Sud et centre et construire la traverse Sud. Une fois celle-ci achevée, la circulation est ramenée sur la dalle récemment construite pour permettre la réalisation de la traverse Nord. Enfin, les deux sens de circulation sont basculés dans les collectrices et sur les traverses, de façon à permettre le terrassement de la tranchée en taupe. Une fois les radiers réalisés en sous-œuvre, la mise en service de l'ouvrage se fait tube par tube, durant le délai d'exécution des travaux, en intercalant les travaux d'équipements (marché spécifique) et les phases de tests préalables.

Le phasage intègre bon nombre d'interfaces avec des opérations de déviation de réseaux sous maîtrise d'ouvrage des concessionnaires ainsi que des marchés de travaux connexes sous maîtrise d'ouvrage DREAL. Une partie d'entre eux ne pouvaient être anticipée avant les travaux. De fait, ils sont déclenchés en fonction des phases de circulation qui permettent de libérer les emprises travaux appropriées.

UN MARCHÉ DE TRAVAUX INTÈGRE POUR FLUIDIFIER LES INTERFACES

Compte-tenu du caractère très phasé des travaux et du fort niveau d'imbrication des tâches, la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre ont fait le choix d'un allotissement regroupant les activités majeures au sein d'un marché principal de type Terrassements, Ouvrage d'Art, Réseaux et Chaussées (TOARCH). Ce marché a été confié en décembre 2020 à un groupement d'entreprise Vinci Construction composé de Campenon Bernard Centre Est (mandataire), Soletanche Bachy France, Vinci Construction Terrassement, Soletanche Bachy Fondations Spéciales, Eurovia Alpes et Sogea Rhône-Alpes.

Le groupement principal (Campenon Bernard Centre Est, Soletanche Bachy et Vinci Construction Terrassement) a également été retenu par SNCF Réseau

9

© CÉDRIC HELSLY

8- Deux ateliers d'excavation (bennes hydrauliques KS) et une grue de manutention.

9- Benne hydraulique KS.

8- Two excavation rigs (KS hydraulic buckets) and a handling crane.

9- KS hydraulic bucket.

© CÉDRIC HELSLY

10

10- Équipement des cages d'armatures dans une paroi moulée.

10- Equipment of rebar cages in a diaphragm wall.

en juin 2021 pour exécuter le marché d'élargissement du pont-rail existant, qui permet le franchissement des nouvelles voies collectrices.

PAROIS MOULÉES : UN CHANTIER PHASÉ EN EMPRISES CONTRAINTES

Les parois moulées du projet présentent des dimensions relativement homogènes sur la longueur du projet : une épaisseur unique de 500 mm et des profondeurs comprises majoritairement entre 8 et 18 m. La géométrie des soutènements a fait l'objet d'optimisations en phase d'études d'exécution par le bureau d'études de Soletanche Bachy, qui ont permis d'affiner l'épaisseur des parois, de limiter leur fiche et de ne conserver qu'une file d'ancrage dans les zones à ciel ouvert. Ces parois moulées sont excavées depuis des plateformes hautes sur des emprises latérales à la RN87 qui restent en circulation (figure 7). Dans les zones des collectrices, des plateformes ont dû être aménagées dans les talus existants pour permettre de construire les soutènements au plus près des ouvrages existants. Ces plateformes ont nécessité de remodeler les talus et de mettre en œuvre des murs en L préfabriqués surplombant les voies de circulation. Les différentes emprises sont séparées dans le sens Nord-Sud par la présence de la RN87 et dans le sens Est-Ouest par les voiries locales et la voie ferrée. On dénombre ainsi 9 zones principales de travaux. L'atelier de parois moulées s'est donc déplacé de zone en zone, de manière à conserver une continuité d'activité. Il est alimenté en fluide de forage par une centrale fixe de fabrication et recyclage des boues, via un réseau de conduites qui a été passé en tranchées sous les chaussées et qui dessert toutes les emprises. L'excavation est réalisée dans les graves compactes avec un ou deux ateliers de type benne hydraulique KS, avec système de contrôle de la verticalité embarqué (figures 8 et 9). Une ou deux grues de manutention permettent, en parallèle, d'assurer les opérations de recyclage de la boue, d'équipement des joints et cages d'armatures (figure 10) et de bétonnage des panneaux. L'organisation des équipes en 2 postes de 8h et les dimensions modestes des panneaux permettent de bétonner de 8 à 15 panneaux par semaine, selon le nombre d'ateliers affectés à la production. Au total, le projet représente 370 panneaux et 25000 m² d'excavation.

Les bétons sont produits par trois centrales de réseaux situées à proximité du chantier. Les bétons de la zone en tranchée couverte font l'objet d'une adjonction en fibres polypropylènes pour maîtriser l'écaillage du parement sous l'effet des sollicitations thermiques générées par un éventuel incendie d'hydrocarbures dans la trémie. Ce comportement au feu a été vérifié au préalable par essai en laboratoire sur des dalles témoins (parois moulées et traverse). Compte-tenu des emprises réduites, les armatures sont préfabriquées en usine et livrées à la demande. Les déblais sont, quant à eux, ressuyés sur site puis évacués sur la plateforme de tri d'un partenaire local jouxtant le projet. Une grande partie est revalorisée, soit directement sur site (réutilisation de la fraction supérieure pour le remplissage des gabions du projet par exemple), soit vers d'autres projets locaux.

Les parois moulées des zones en tranchée ouverte sont retenues par un lit d'ancrages passifs définitifs. Ces ancrages sont composés d'une barre diamètre 40 mm scellée dans le terrain par un coulis de ciment. Ils sont inclinés à 25° et mesurent environ 13 m (sauf contrainte locale de tréfond) pour mobiliser leur frottement dans les graves compactes au sein desquelles une valeur q_s = 250 kPa a pu être justifiée après essais préalables. Une longueur libre est réalisée en tête par gaine thermo rétractable et la tête fait l'objet d'une protection anti-corrosion de niveau P2. Les ancrages sont forés au travers de réservations mises en œuvre dans les cages d'armatures de la paroi. Le forage de diamètre 150 mm est réalisé par méthode Hi'Drill (roto percussion à haute fréquence) à l'aide d'une couronne ouverte. Cette méthode permet d'équiper les barres dans un terrain grossier à l'abri du tubage puis de contrôler la bonne cimentation du forage avant de procéder au détubage. ▷

11

© DRM PRODUCTION

ÉLARGISSEMENT DES OUVRAGES D'ART : DES OPÉRATIONS SINGULIÈRES

Pour permettre aux collectrices de franchir les axes routiers et ferroviaires, des élargissements des ouvrages d'art sont nécessaires. Il s'agit de construire de nouvelles traverses en prolongement des existantes. Celles-ci sont encastrées sur des soutènements en parois moulées (OA Fournier, pont-rail SNCF) ou en pieux sécants (OA Libération). Pour l'ouvrage Libération, le choix des pieux sécants de diamètre 820 mm s'explique par les faibles emprises disponibles, puisque les travaux ont été réalisés par demi-tabliers. La circulation ne pouvant être coupée sur cet axe Nord-Sud important, les 2x4 voies existantes ont été réduites à 2x2 voies et basculées successivement d'un côté à l'autre de l'ouvrage. La file de pieux la plus proche de l'ouvrage existant est forée à proximité immédiate de la culée existante, après démontage des dalles de transition. Les pieux sont forés à 15 m de profondeur en méthode tarière creuse, en pianotant entre les pieux primaires en béton classe C8 et les pieux secondaires structurels en béton C30/37, armés toute hauteur. Un contrevoile en béton projeté habille ensuite le parement.

Après exécution des pieux sécants de chaque phase, les demi-traverses ont été réalisées, ainsi que les étanchéités, les réseaux secs et les enrobés, pour permettre le ripage de la circulation dans les plus brefs délais. Les traverses coulées sur terre-plein sont ensuite décoffrées lors du terrassement en sous-œuvre.

Pour l'ouvrage ferroviaire, la SNCF a souhaité maintenir l'exploitation de la ligne à voie unique qui dessert les Hautes-Alpes ainsi que les plateformes chimiques du sud de Grenoble. Elle a donc retenu un phasage organisé autour de quatre Opérations Coups de Poing (OCP) programmées durant quatre week-ends du printemps 2022. Ces opérations sont destinées à la réalisation des appuis en parois moulées des deux nouveaux ponts-rails (OCP1 à 3 de 52 h) puis à la pose des deux tabliers préfabriqués sur site (OCP4 de 62 h) Après une campagne de travaux préparatoires réalisés de nuit sous Interruptions Temporaires de Trafic, les deux premiers week-ends de coupure ont permis de réaliser 8 panneaux de parois moulées (800 m² environ) en épaisseur 800 mm. Deux ateliers indépendants (un de chaque côté de la RN 87) et 40 collaborateurs ont été mobilisés du vendredi au dimanche, pour mener à bien ces opérations minutées et restituer la circulation ferroviaire le lundi matin (figure 11). Le bon déroulé des travaux a permis de se passer de l'OCP3. Lors de l'OCP4 qui s'est déroulée pour Pâques, deux grues de 700 t ont mis en place des sommiers préfabriqués sur les têtes de parois moulées puis ont posé les tabliers de type poutrelles enrobées de 90 t chacun, sur les sommiers. Les liaisonnements entre les pièces sont réalisés par scellement de barres HA 40.

11- Réalisation des parois du pont rail SNCF.

12- Travaux de forages et injections dans les collectrices.

11- Execution of the sides of the SNCF railway bridge.

12- Drilling and grouting works in the collector roads.

GESTION DE L'EAU EN PHASE TRAVAUX, UN ENJEU TECHNIQUE MAJEUR

Le niveau de chaussée du projet se situant en grande partie sous le niveau de l'aquifère (jusqu'à 4 m de charge), la mise hors d'eau des fonds de fouille en phase chantier revêt un caractère primordial pour la bonne marche des travaux. Le sous-sol n'offrant aucun substratum peu perméable pour ficher les parois, deux solutions techniques sont retenues pour limiter les débits.

12

© C WELLER

Dans les zones difficiles d'accès ou de faible surface, avec des charges hydrostatiques limitées, des bétons immergés sont réalisés après terrassements sous nappe. Partout ailleurs, le groupement a privilégié une solution comprenant la réalisation d'un fond injecté combiné à un pompage d'exhaure s'appuyant sur un réseau de puisards et tranchées drainantes.

Le fond injecté développe une épaisseur d'environ 1,5 m et son arase inférieure est positionnée environ 3,5 m sous le fond de fouille, de telle manière que le poids de la colonne de terre sur le bouchon équilibre la poussée hydrostatique qui s'exerce sous le fond injecté durant la phase travaux.

Le fond est réalisé à partir de forages exécutés depuis la surface et disposés selon une maille d'environ 6 m². Les tirs sont disposés sous forme d'auréoles paires et impaires (en quinconce), pour limiter le nombre de stations des machines de forage et atteindre les zones non accessibles verticalement (sous les chaussées circulées ou les ouvrages existants). Comme pour les ancrages, la perforation est réalisée à l'aide d'une ou deux machines équipées de têtes de rotation Hi'Drill à haute fréquence de vibrations et avec une ligne d'outil comprenant des tubes et une couronne ouverte de diamètre 114,3 mm. Les tubes d'injection PVC équipés de manchettes souples sont mis en place à travers le tubage provisoire, qui permet de garantir la mise en place des tubes à la cote souhaitée (figure 12). Ils sont ensuite scellés dans le terrain avec un coulis de bentonite-ciment modérément dosé.

Après réalisation complète d'un plot de forages, l'injection sous pression au coulis de ciment est effectuée avec 8 à 16 presses d'injection asservies par informatique. L'automate régule automatiquement la vitesse des pompes en cherchant le débit d'équilibre qui permet de maximiser la quantité de coulis incorporée au terrain en un minimum de temps, tout en évitant d'atteindre la pression maximale admissible par le terrain, qui constitue un critère d'arrêt automatique. Le coulis utilisé est composé d'un mélange de ciment CEM III/C (dosé à 250 kg/m³), de bentonite sodique et d'eau.

Le programme d'injection est structuré selon une séquence de primaires et secondaires, ces derniers permettant de traiter les zones non atteintes par le coulis des injections primaires et de "serrer" le terrain. L'injection débute par les forages situés le long des parois pour assurer le collage du traitement contre les ouvrages, cette zone remaniée étant particulièrement propice aux écoulements. Elle se poursuit par le toit du bouchon qui permet d'encager le traitement et elle s'achève par le cœur.

Les essais de pompage, menés sur un plot test et les débits mesurés lors des premières phases de terrassements, démontrent que la perméabilité en grand du terrain a ainsi pu être abattue de 10^{-2} m/s à environ 5.10^{-6} m/s. Cela se traduit par des débits d'exhaure qui s'échelonnent de quelques m³/h à quelques dizaines de m³/h selon les surfaces actives, qui sont compatibles avec des moyens conventionnels de pompage et avec les autorisations de rejet au milieu. Le fond de fouille ainsi asséché permet l'évolution des engins de terrassement et la réalisation du génie civil et des étanchéités. En définitif, une étanchéité cuvelée est appliquée en sous face de radier et raccordée sur les parois moulées afin de garantir la pérennité des radiers et des chaussées. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROIS MOULÉES :
- **25 000 m² épaisseur 500 mm**
- **12 000 m³ de béton (Vicat – Sonzogni)**
- **1 150 t d'armatures (Caumes Armatures)**
- **2 630 m de murettes guide (Axel Duval)**

PIEUX :
- **4 600 m Ø 820 mm**

ANCRAGES :
- **1 760 m Ø 150 mm**

FOND INJECTÉ :
- **21 000 m de forage Ø 114 mm**
- **6 100 m³ de coulis d'injection**

TERRASSEMENTS :
- **150 000 m³ de déblais, 30 000 m³ revalorisés**

GÉNIE CIVIL :
- **30 000 m³ de béton (Vicat - Sonzogni)**
- **2 700 t d'armatures (Germain Armatures)**

CHAUSSÉES :
- **27 000 t d'enrobés**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE MARCHÉ TOARCH :
DREAL Auvergne Rhône-Alpes

MAÎTRE D'ŒUVRE MARCHÉ TOARCH :
DIR Centre Est - SREI de Chambéry

ASSISTANCE MAÎTRISE D'ŒUVRE :
Artelia - Quadric - Cabinet Ritz - Jdm

MAÎTRE D'OUVRAGE MARCHÉ SNCF :
SNCF Réseaux

MAÎTRE D'ŒUVRE MARCHÉ SNCF :
SNCF Réseaux - Systra

OPC :
Setec Opency

COORDINATION SPS :
Bureau Véritas

GROUPEMENT D'ENTREPRISES MARCHÉ TOARCH :
Campenon Bernard Centre-Est - Soletanche Bachy France - Vinci Construction Terrassement - Soletanche Bachy Fondations Spéciales - Eurovia Alpes - Sogea Rhône-Alpes

ABSTRACT

RENOVATION OF THE RONDEAU, A STRATEGIC ROAD CUT-AND-COVER TUNNEL FOR THE GRENOBLE URBAN AREA

PIERRE-BENOIT PASSOT, SOLETANCHE BACHY FRANCE

As a member of a Vinci Construction consortium, *Soletanche Bachy is performing for DREAL Auvergne Rhône Alpes special works for the Rondeau interchange renovation project in Grenoble. The creation of a cut-and-cover tunnel and revamping of the slip roads should improve traffic flows on this road interchange between the A480 urban motorway and the South Grenoble ring road which is regularly saturated. The structure, built below the water table in gravelly alluvia of the Drac River, is executed sheltered by diaphragm walls which support a cover slab, making it possible to restore urban continuity. The underground earthworks, for their part, are carried out sheltered by a foundation pre-injected from the surface.* □

REMODELACIÓN DEL RONDEAU, UN TÚNEL VIAL EN ZANJA CUBIERTA ESTRATÉGICO PARA EL ÁREA METROPOLITANA DE GRENOBLE

PIERRE-BENOIT PASSOT, SOLETANCHE BACHY FRANCE

En el marco de un consorcio de empresas Vinci Construction, *Soletanche Bachy realiza para la Dirección regional de medio ambiente, ordenación y vivienda (DREAL) de Auvergne Rhône Alpes las obras especiales del proyecto de remodelación del enlace del Rondeau, en Grenoble. La creación de un túnel en zanja cubierta y la redistribución de los ramales de enlace pretenden mejorar la fluidez de este nodo vial entre la autopista urbana A480 y el cinturón sur de Grenoble, habitualmente saturado. La obra construida bajo la capa freática, en los aluviones pedregosos del Drac, se lleva a cabo protegida por pantallas de hormigón, que soportan una losa de cobertura que permite restablecer la continuidad urbana. Por su parte, los movimientos de tierra con tuneladora están protegidos por un fondo inyectado previamente realizado desde la superficie.* □

1

© SETEC

EXCAVATION AU TUNNELIER SOUS LES CARRIÈRES SOUTERRAINES DU CALCAIRE GROSSIER DE PARIS - RETOUR D'EXPÉRIENCE DE LA LIGNE 14 SUD

AUTEURS : MARIE COBLARD, RESPONSABLE SUIVI DE TRAVAUX TUNNEL & CARRIÈRES, SETEC TPI - SILVIA DELATTRE LEVIS LEYSER, INGÉNIEUR GÉOTECHNIQUE, SETEC TERRASOL - ANNE BERGERE, L14S RESPONSABLE GÉOTECHNIQUE ELIOS, SETEC TERRASOL - LAURE NGUYEN THE DUNG, L14S RESPONSABLE GÉOTECHNIQUE, DODIN CAMPENON BERNARD

DANS LE CADRE DES TRAVAUX DE PROLONGEMENT AU SUD DE LA LIGNE 14 DU MÉTRO PARISIEN, LE CREUSEMENT DU TUNNEL EST EN PARTIE RÉALISÉ SOUS LES ANCIENNES EXPLOITATIONS SOUTERRAINES DU CALCAIRE GROSSIER AVEC UN TUNNELIER À PRESSION DE TERRE. CE CREUSEMENT S'EST DÉROULÉ DANS UN CONTEXTE GÉOTECHNIQUE COMPLEXE ET URBAIN DENSE. L'AUSCULTATION PRÉCISE ET ADAPTÉE A PERMIS DE TIRER DES ENSEIGNEMENTS PRÉCIEUX SUR LE PILOTAGE DU TUNNELIER, LE COMBLEMENT DES CARRIÈRES, L'IMPORTANCE DES RECONNAISSANCES DU CALCAIRE ET L'ÉVOLUTION DES DÉFORMATIONS DES TERRAINS VERS LA SURFACE.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET : PROLONGEMENT SUD DE LA LIGNE 14, LOT GC02

Le marché de travaux L14-GC02

Une présentation générale du projet de prolongement de la Ligne 14 Sud a fait l'objet d'un article dans la revue *Travaux* n°947, datée de décembre 2018.

Le prolongement Sud de la Ligne 14 relie Paris depuis la gare existante Olympiades à l'aéroport d'Orly par un tunnel de 12,5 km et 7 nouvelles gares.

Le lot GC02 concerne 1/3 du linéaire du tracé du tunnel, avec :

- → 4,8 km de tunnel réalisés par excavation au tunnelier ;
- → 1 gare : Le Kremlin-Bicêtre Hôpital (KBH) ;
- → 5 ouvrages annexes : puits de ventilation, locaux techniques et accès pompier.

Le tunnel se termine dans la gare Maison-Blanche Paris XIII (MBP) incluse dans le projet de prolongement de la Ligne 14 Sud mais faisant l'objet d'un marché séparé (GC01).

1- Photographies des carrières avant comblement.

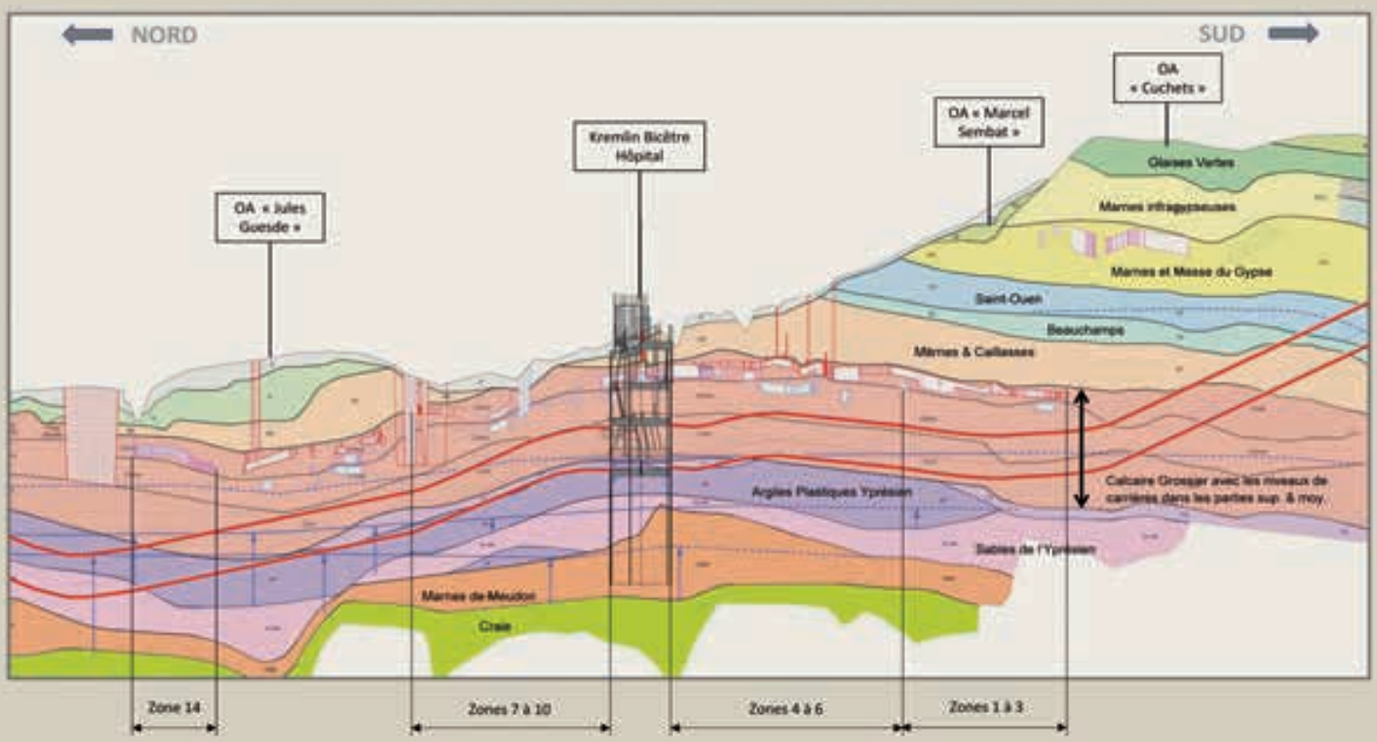
1- Photos of the quarries before filling.

Le tracé traverse également la gare de Villejuif Institut Gustave Roussy (IGR) sous maîtrise d'ouvrage SGP et inclus dans le marché L15-T3c.

Contexte géotechnique

Le tunnel GC02 s'inscrit dans l'ensemble géologique régional du bassin parisien et plus particulièrement dans la plaine alluviale de la Bièvre et le versant entre le Kremlin-Bicêtre et Villejuif pour le secteur concerné par le passage sous les carrières (figure 2). Les terrains rencontrés sont composés de formations sédimentaires disparates dans leur nature, réparties en couches relativement horizontales : Marnes et Caillasses, Calcaires Grossiers et Argiles Plastiques.

PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE DU TRACÉ DU LOT GC02 DE LA LIGNE 14 SUD



2

© SETEC

Les carrières souterraines se situent dans la partie supérieure du Calcaire Grossier et ont été exploitées selon la méthode des hagues et bourrages sur 3 étages qui se retrouvent parfois superposés. Ces exploitations ont été en partie remblayées à l'époque de l'abandon des exploitations, des zones sont laissées libres et restent visitables de nos jours (figure 1).

L'état des carrières est répertorié sur des cartes et surveillé lors de visites régulières par l'Inspection Générale des Carrières (Igc), ce qui a permis en phase conception de reconnaître l'état des carrières et de définir des traitements préalables à l'excavation du tunnel et des ouvrages.

Le passage sous les carrières souterraines du Calcaire Grossier

Le tunnel s'inscrit sous les anciennes carrières sur un linéaire de l'ordre de 1,6 km. Elles sont à une profondeur variant de 40 m (au sud, au niveau du versant de la butte de Villejuif) à 15 m de profondeur (au niveau de la gare KBH) par rapport à la surface et toujours au-dessus de la nappe phréatique.

Le tunnel s'inscrit majoritairement dans les niveaux inférieurs du Calcaire Grossier avec deux critères principaux issus des modélisations numériques réalisées lors de la conception :

→ Maintenir une couverture minimale de 3 m sous le plancher du niveau inférieur des carrières ;

→ Avoir autant que possible un front d'excavation plein dans le Calcaire Grossier et éviter les fronts même partiels, dans les Argiles Plastiques de l'Yprésien.

Les études de conception ont conclu à la nécessité de comblement des niveaux de carrières sur une bande de 20 à 30 m de largeur axée sur le tracé du tunnel au préalable de l'excavation afin de limiter les risques de remontée de désordre en surface par déstabilisation des carrières. ▷

2- Profil en long géologique du tracé du lot GC02 de la Ligne 14 Sud.

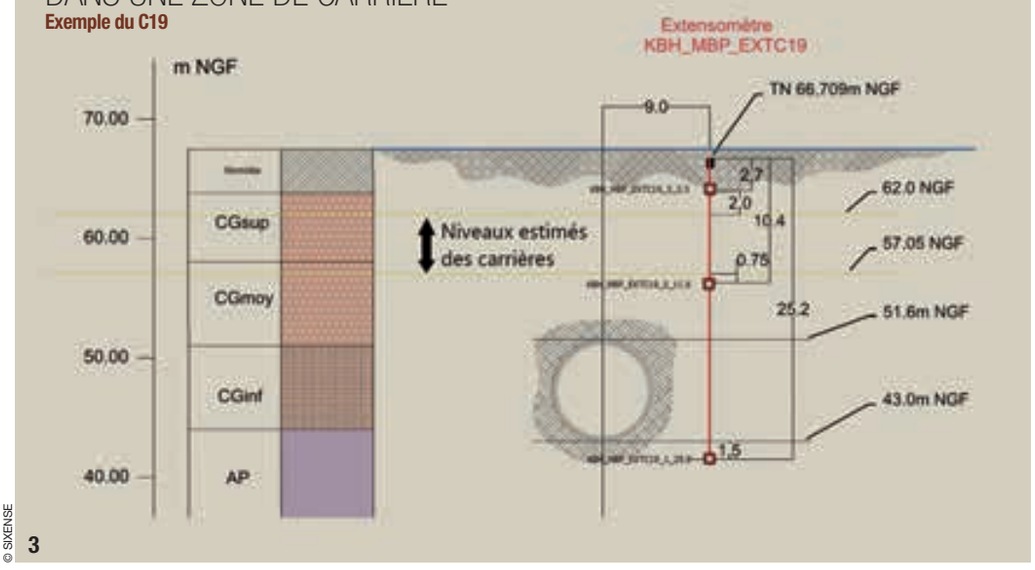
3- Schéma de principe d'équipement d'un extensomètre en forage dans une zone de carrière - exemple du C19.

2- Longitudinal geological profile of the alignment of work section GC02 of Line 14 South.

3- Block diagram of equipment of an extensometer for drilling in a quarry area - example of C19.

SCHÉMA DE PRINCIPE D'ÉQUIPEMENT D'UN EXTENSOMÈTRE EN FORAGE DANS UNE ZONE DE CARRIÈRE

Exemple du C19



3

© SIXENSE

La largeur de comblement a été dimensionnée selon des critères en déformation maximales sur le niveau des carrières :

→ Comblement systématique a minima d'une largeur de 20 m axée sur le tunnel ;

→ Comblement dès que le tassement calculé par modélisation est supérieur à 10 mm en absolu ou 0,7 mm/m en différentiel au niveau du plancher de carrières.

Ces travaux de comblement des carrières font l'objet d'un article dans la revue Espaces Souterrains publiée par l'Aftes lors du prochain congrès (automne 2021). Ils se sont déroulés entre mi-2019 et mi-2020.

La bande de 20 à 30 m de largeur à combler le long du tracé a été découpée en 14 zones de comblement afin de limiter les nuisances aux riverains.

DÉFINITION DE L'AUSCULTATION MISE EN PLACE POUR LE SUIVI DES DÉFORMATIONS DES CARRIÈRES SOUTERRAINES LORS DU PASSAGE DU TBM

Le contexte géotechnique de la L14S est difficile à appréhender par modélisation numérique du fait de sa variété de formations géologiques et de la présence des carrières. Le programme d'auscultation a été défini et adapté au contexte géotechnique et urbain du tracé.

Auscultation mise en place pour la surveillance du creusement du tunnel

Tout le long du tracé, une auscultation a été mise en place sur les avoisinants, en surface et en profondeur. Elle a été définie selon les principes suivants :

→ **Auscultation des avoisinants :** dans la zone d'influence géotechnique, des mesures optiques automatiques dans les 3 dimensions ont été réalisées sur l'ensemble des bâtis et ouvrages. L'auscultation est adaptée à la sensibilité aux tassements des structures et vise à mesurer le tassement absolu, le tassement différentiel et l'élongation horizontale.

→ **Nivellement de surface :** des mesures topographiques manuelles sont réalisées sur la voirie et dans les espaces disponibles à l'axe du tunnel (permettant le suivi des tassements à l'avancement du tunnelier) et selon des sections perpendiculaires au tracé (afin d'obtenir des cuvettes de tassement).

L'objectif de cette auscultation est double :

1- S'assurer que les tassements induits par les travaux restent admissibles par les avoisinants ;

2- Appréhender le comportement du terrain à l'avancement et anticiper les tassements à venir pour, si besoin, modifier les paramètres de creusement.

Auscultation mise en place pour la surveillance du comportement des carrières

En complément, un suivi spécifique a été utilisé dans les zones de passage sous les carrières. L'objectif est de vérifier le respect du critère de déformation imposé en limite de carrière comblée. Pour ce faire des extensomètres automatiques en forage ont été mis en œuvre. Ils ont été positionnés en limite intérieure de la bande comblée le long du tracé du tunnel.

La définition de la position des ancres a été adaptée en fonction des niveaux des exploitations reconnues lors des forages d'injection (figure 3) afin de mesurer les mouvements au plus près du plancher et du ciel des carrières.

Le principe de positionnement des ancres est le suivant :

→ 2 m au-dessus du ciel de carrière ;

→ 0,75 m sous le niveau du plancher le plus profond identifié ;

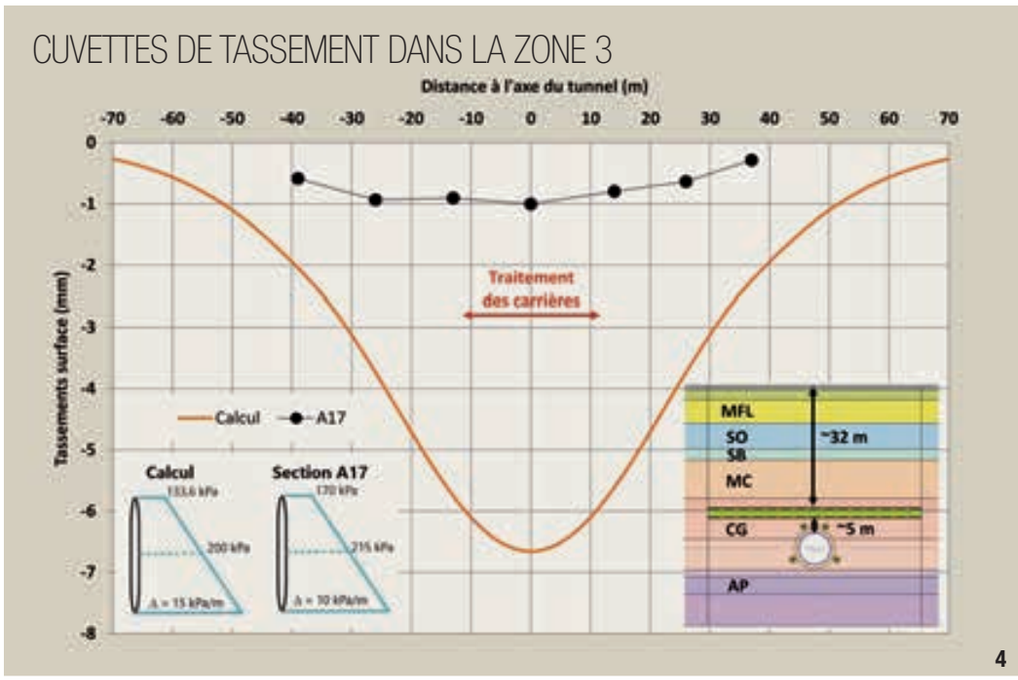
→ 1,5 m sous le radier du tunnel.

4- Cuvettes de tassement dans la zone 3.

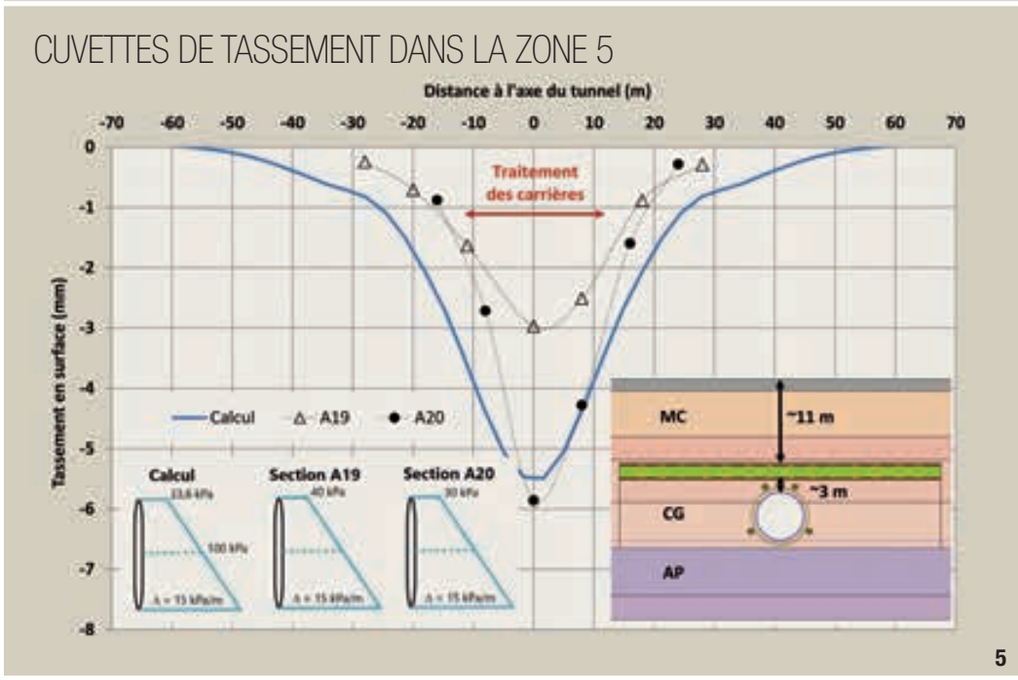
5- Cuvettes de tassement dans la zone 5.

4- Subsidence basins in zone 3.

5- Subsidence basins in zone 5.



4 © SETEC



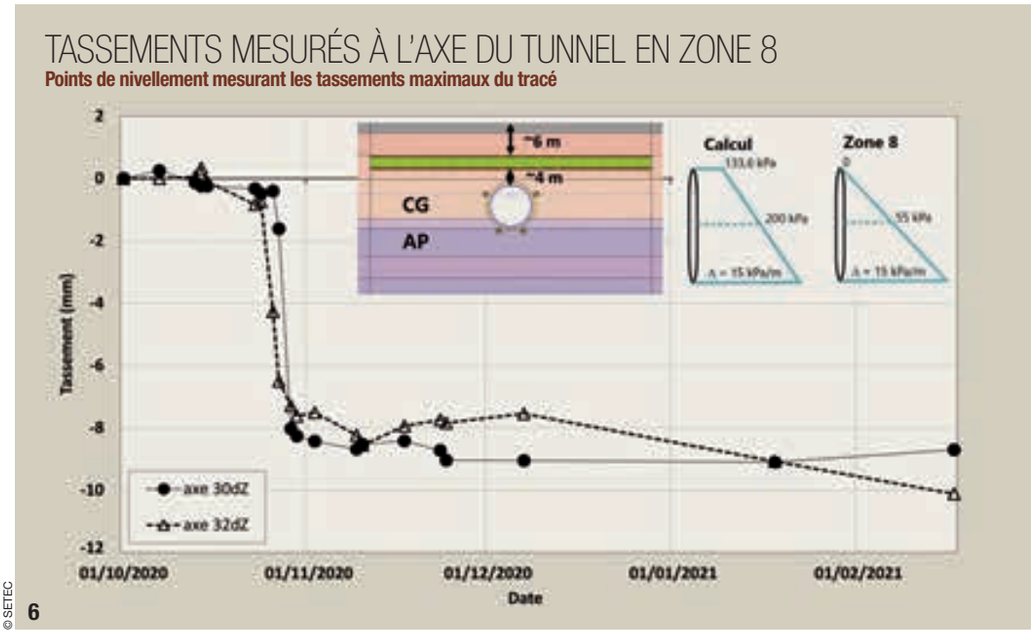
5 © SETEC

6- Tassements mesurés à l'axe du tunnel en zone 8 - Points de nivellement mesurant les tassements maximaux du tracé.

7- Mesures de l'extensomètre en carrières C19.

6- Subsidence measured on the centreline of the tunnel in zone 8 - Levelling points measuring the maximum subsidence on the alignment.

7- Extensometer measurements in quarries C19.



6

© SETEC

PARAMÈTRES DE CREUSEMENT TBM LORS DU PASSAGE SOUS LES CARRIÈRES SOUTERRAINES DU CALCAIRE GROSSIER

Présentation du tunnelier du GC02

Le tunnelier utilisé pour le creusement de la L14S est un TBM à pression de terre. Le remplissage de la chambre est variable le long du tracé et la pression de confinement en voûte est assurée par une bulle d'air comprimé adaptée aux terrains imperméables.

Le tunnelier est équipé d'un dispositif d'injection de bentonite qui permet :

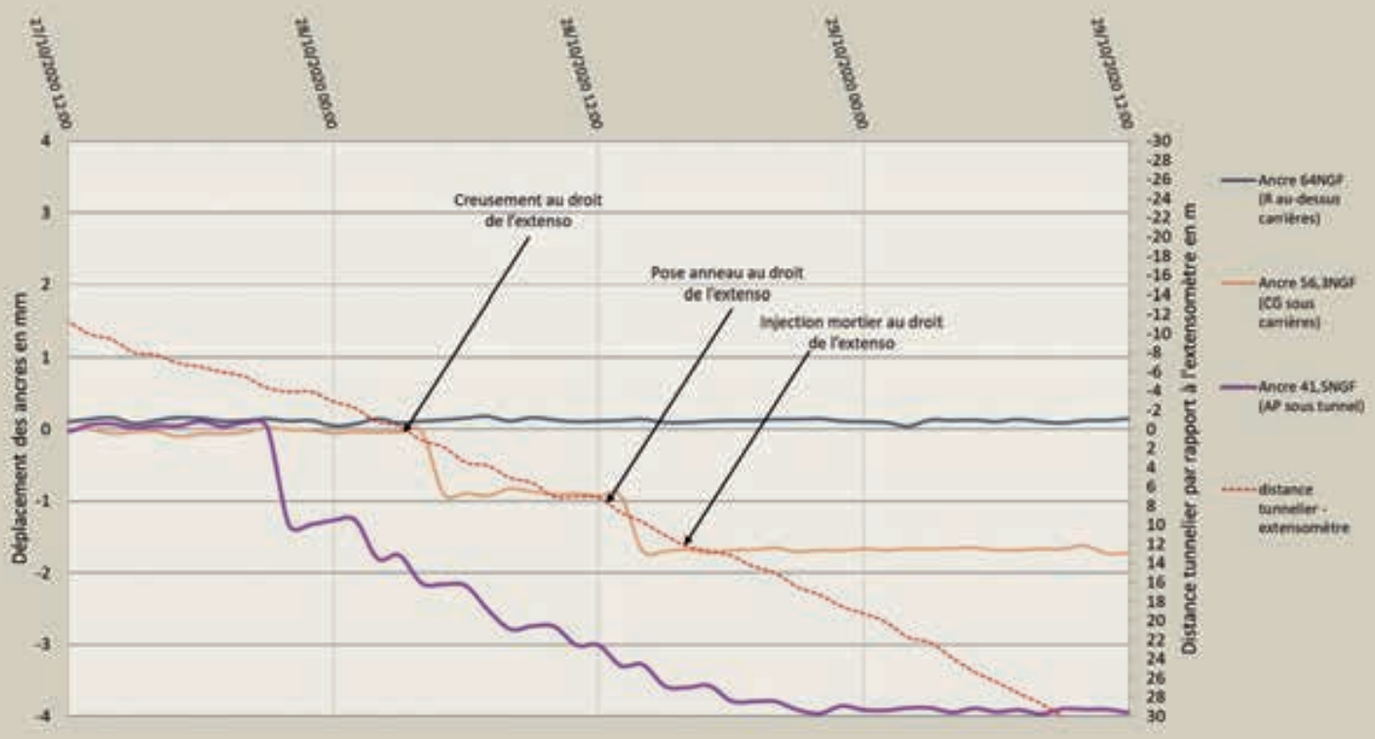
→ Une injection sous pression dans la chambre de travail pour limiter les pertes de confinement à l'air ;

→ Une injection autour de la jupe pour garantir le confinement et limiter les convergences autour du bouclier.

Le suivi des paramètres du tunnelier

Le tunnelier est équipé de capteurs qui permettent, en les corrélant avec les déformations mesurées sur les avoisinants, un pilotage adapté au jour le jour aux conditions réelles du terrain. Lors du creusement sous les carrières, une attention particulière est portée aux paramètres suivants :

→ **Pression dans la chambre d'abattage :** des capteurs positionnés à différents niveaux permettent d'enregistrer les variations des ▷



7

© SETEC

pressions de confinement au front (perte du confinement à l'air par exemple) et d'en déduire le taux de remplissage de la chambre.

→ **Fontimètre :** il s'agit d'un vérin positionné en voûte 2 m derrière la roue de coupe. Les mesures effectuées permettent de mesurer le vide annulaire en voûte. Une élongation non conforme peut être le signe d'une sous-excavation (usure des outils), d'une convergence du terrain ou d'une amorce de fontis.

→ **Poids des matériaux extraits :** permet d'alerter sur une éventuelle sur-excavation qui traduit une déstabilisation au front (éboulement du front, amorce de fontis en voûte).

→ **Volume et pression d'injection de mortier de bourrage :** permet de s'assurer du bon remplissage à l'arrière des anneaux de voussoirs.

La combinaison de l'évolution de ces différents paramètres enregistrés en continu permet une détection d'une déstabilisation lors du creusement et permet de réagir au plus vite en adaptant le pilotage sans attendre la remontée en surface des tassements.

Lors de la période de préparation, des modes de pilotage et un logigramme décisionnel ont été définis entre la maîtrise d'œuvre et l'entreprise afin de réagir au plus vite en cas de survenue de déformations non conformes à celles attendues.

CONSTATS ET ANALYSES DES DÉFORMATIONS ENREGISTRÉES

Zones 1, 2 et 3 : couverture importante, front plein en calcaire en bon état

Il s'agit des premières zones dans le sens de creusement du tunnelier. Elles présentent une grande couverture par rapport à la surface (de l'ordre de 40 m) qui a probablement protégé des altérations le Calcaire Grossier, reconnu en bon état.

Le taux de remplissage de la chambre varie entre 50 et 75 %. Les pressions de consigne sont issues des modélisations numériques. Elles sont appliquées sans difficulté grâce à la bulle d'air comprimé. Elles ont été diminuées après les premiers constats du bon comportement du sol autour du tunnel.

Les déformations mesurées en surface ou sur les avoisinants dans la zone sont très faibles (< 1 mm, à la limite de la précision de la mesure) (figure 4).

Les mesures faites par les instruments en forage ne révèlent pas de déformations en profondeur.

Zones 4, 5 et 6 : front plein dans le calcaire dégradé

L'avancement du tunnelier dans ces zones s'est accompagné d'une réduction progressive de la couverture et d'une dégradation du calcaire au front. L'altération et les nombreuses fractures sub-verticales ouvertes, rencontrées dans le calcaire en lien avec le contexte structural de l'anticlinal de Meudon, se sont traduites par une vigilance forte sur le pilotage du tunnelier pour maintenir la pression de confinement au front. Le taux de remplissage de la chambre a été augmenté jusqu'à 90 % sur ce tronçon pour compenser les pertes de pression d'air en clé.

Les tassements restent tout de même faibles, de l'ordre de 4 à 6 mm maximum à l'axe. Ils sont équivalents aux tassements calculés par les modélisations numériques, à pression au front égale (figure 5).

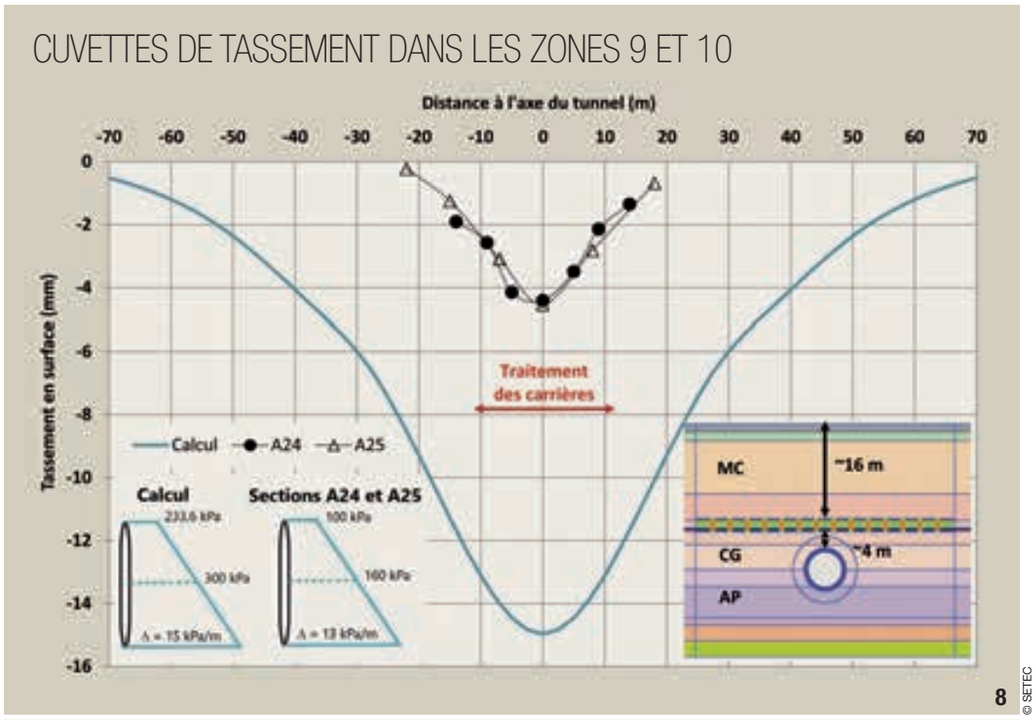
Les instruments en forage ne montrent pas de déformation particulière en profondeur.

8- Cuvettes de tassement dans les zones 9 et 10.

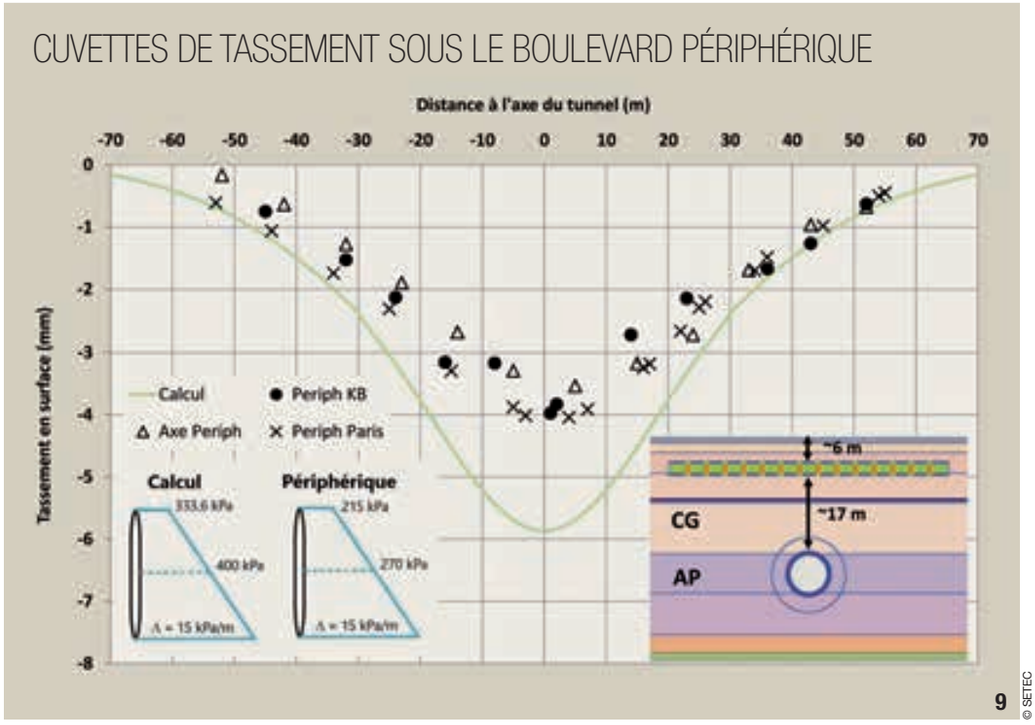
9- Cuvettes de tassement sous le boulevard Périphérique.

8- Subsidence basins in zones 9 and 10.

9- Subsidence basins under the ring road.



8 © SETEC



9 © SETEC

Zones 7, 8, 9 et 10 : front mixte calcaire/argiles plastiques

Les zones 7 et 8 présentent un Calcaire Grossier sub-affleurant, sous très peu de couverture. C'est dans cette zone que les tassements maximaux sont observés et atteignent environ 10 mm à l'axe du tunnel.

À noter que ces tassements se sont produits pendant un arrêt du tunnelier, les tassements à l'axe mesurés de part et d'autre de l'arrêt sont de l'ordre de 5 mm (figure 6).

Les instruments en forage n'enregistrent pas de déformation particulière au passage du tunnelier, excepté l'extensomètre C19 positionné au niveau de la zone 8 à environ 10 m de l'axe du tunnel (figure 7).

L'ancre la plus profonde (située au niveau du piédroit du tunnel dans les Argiles Plastiques) enregistre un tassement lorsque le front d'excavation se situe à environ 5 m en amont du passage du tunnelier puis se stabilise autour de 4 mm lorsque le front se situe à environ 20 m en aval (durée équivalente de 1 j).

L'ancre intermédiaire située sous le plancher des carrières enregistre un tassement de l'ordre de 1 mm au passage du front puis 2 mm lors de la pose de l'anneau. Le tassement se stabilise immédiatement et bien plus rapidement que la première ancre dans les Argiles Plastiques.

L'ancre supérieure (située au-dessus du ciel de carrière) et le point de nivellement en surface ne mettent pas en évidence de déformation.

Sous les zones 9 et 10, le tracé du tunnel s'approfondit avec un front au niveau de l'interface Calcaires Grossiers/Argiles Plastiques.

Des pertes de pression à l'air ont été observées, jusqu'à ce que le front soit composé à environ 30 % d'Argiles Plastiques et 60 % de calcaire en meilleur état (moins fracturé).

Une pression de confinement plus forte est alors appliquée. De plus, des injections de bentonite dans la chambre ont été possibles lors des périodes de pose des anneaux.

Les tassements mesurés dans le secteur sont de l'ordre de 4 à 5 mm maximum à l'axe (figure 8).

Zone 14 et boulevard périphérique : front majoritairement en Argiles Plastiques

Il s'agit de la zone la plus proche de Paris, elle constitue un intérêt historique pour l'IGC. Les galeries ont été préservées et n'ont pas été comblées.

Un comblement à pied d'œuvre des remblais de bourrage a été réalisé (de type injection de collage).

Le front d'excavation se situe à plus de 50 % dans les Argiles Plastiques au début de la zone 14 et entièrement dans les Argiles Plastiques sous le boulevard Périphérique (limite de la zone du tracé concerné par la problématique carrière).

Des tassements à l'axe de l'ordre de 4 mm au maximum ont été mesurés, c'est-à-dire autant que les pour les zones précédentes, alors que la pression au front est nettement augmentée (figure 9).

Ce constat met en évidence le développement des déformations induites par le creusement au tunnelier lorsque le front se situe majoritairement dans les Argiles Plastiques.

Des mesures sur les fissuromètres installés au niveau des fissures en ciel de carrières dans les galeries visitables de la zone 14 et des constats visuels ont été réalisés avant et après passage du tunnelier. Il n'y a pas eu d'évolution notable des mesures.

INFLUENCE DU TYPE DE FRONT D'EXCAVATION SUR LES TASSEMENTS

Les constats issus de l'auscultation sur l'ensemble du tracé du tunnel concerné par le passage du tunnelier sous les anciennes carrières de Calcaires Grossiers nous permettent de retenir les principes suivants :

→ Les carrières comblées ont joué pleinement leur rôle de "terrain homogène équivalent" et permet de conclure à l'adéquation du comblement réalisé ;

→ Les déformations mesurées en surface et autour du tunnel sont faibles (entre 0 et 10 mm) ;

→ Les tassements mesurés sont fonction de l'état d'altération et de fracturation du Calcaire Grossier, qui indirectement sont liés à la couverture, et à la possibilité de maintenir la pression en clé ;

→ Conformément aux études, le front plein dans le Calcaire Grossier même proche du plancher de carrières génère moins de déformations qu'un front mixte calcaire/argiles déformables. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- **4,8 km de tunnel excavé dont 1,6 km sous les niveaux de carrières**
- **Diamètre du tunnel : 8,83 m excavé / 7,55 m utile**
- **53,5 km de forage pour comblement des carrières**
- **25 500 m³ de coulis injecté pour comblement des carrières**
- **22 extensomètres de carrières**
- **12 sections d'instrumentation en surface, 3 sections profondes**
- **28 points de nivellement à l'axe**
- **0 à 10 mm maximum de tassements en surface dans les zones de carrières comblées**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : RATP
MAÎTRISE D'ŒUVRE :
Groupement Elios : Ingénieries Setec (Mandataire) & Systra
ENTREPRISE : Groupement Dodin, Vinci, Spie
ÉQUIPEMENT AUSCULTATION : Sixense

ABSTRACT

EXCAVATION BY TBM BENEATH UNDERGROUND QUARRIES OF LUTETIAN LIMESTONE IN PARIS - POST-PROJECT ANALYSIS OF LINE 14 SOUTH

MARIE COBLARD, SETEC TPI - SILVIA DELATTRE LEVIS LEYSER, SETEC TERRASOL - ANNE BERGERE, SETEC TERRASOL - LAURE NGUYEN THE DUNG, DODIN CAMPENON BERNARD

As part of works for the southern extension of Line 14 of the Paris metro, *1.6 km of tunnelling was executed by Earth Pressure Balance TBM beneath former underground limestone quarries, which had been filled in beforehand. Precise and appropriate detailed analysis and monitoring by the contractor and the project manager made it possible to adapt the TBM's operation in real time and control surface subsidence. Post-project analysis of this project led to the conclusion that the quarries' behaviour was satisfactory, even though the damaged and fractured state of the limestone sometimes resulted in operating problems to maintain confinement pressure at the keystone.* □

EXCAVACIÓN CON TUNELADORA BAJO LAS CANTERAS SUBTERRÁNEAS DE PIEDRA CALIZA GRUESA DE PARÍS - EXPERIENCIA DE LA LÍNEA 14 SUR

MARIE COBLARD, SETEC TPI - SILVIA DELATTRE LEVIS LEYSER, SETEC TERRASOL - ANNE BERGERE, SETEC TERRASOL - LAURE NGUYEN THE DUNG, DODIN CAMPENON BERNARD

En el marco de las obras de prolongación hacia el sur de la línea 14 del metro de París, *se han perforado 1,6 km de túnel con una tuneladora a presión bajo las antiguas canteras subterráneas de piedra caliza, previamente rellenadas. Una auscultación precisa y adaptada y un detallado seguimiento por parte de la empresa y el contratista han permitido adaptar en tiempo real el pilotaje de la tuneladora y controlar los asientos en la superficie. La experiencia de esta obra permite concluir un buen comportamiento de las canteras, aunque el estado de alteración y fracturación de la piedra caliza en ocasiones ha generado dificultades de pilotaje para mantener controlada la presión de confinamiento.* □

REMONTÉE DE FONTIS AU-DESSUS DES CAVITÉS SOUTERRAINES - UTILISATION D'UN GÉOSYNTHÉTIQUE BI-RAIDEUR INSTRUMENTÉ

AUTEURS : MATHILDE RIOT, DIRECTRICE TECHNIQUE ET R&D, AFITEXINOV - MARWAN AL HEIB, INGÉNIEUR PHD HDR, INERIS - PHILIPPE DELMAS, INGÉNIEUR PHD HDR, EXPERT GÉOTECHNICIEN

LES NAPPES GÉOSYNTHÉTIQUES DE RENFORCEMENT SONT AUJOURD'HUI COURAMMENT UTILISÉES POUR PRÉVENIR LES EFFONDREMENTS LOCALISÉS SUR CAVITÉS. ASSOCIÉES À UN DISPOSITIF DE SUIVI EN CONTINU ET À DISTANCE, CE SYSTÈME DE SURVEILLANCE ET D'ALERTE INNOVANT PEUT S'APPLIQUER À TOUS LES OUVRAGES SENSIBLES EN ZONES À RISQUES QUI NÉCESSITENT UN SUIVI RÉGULIER À MOYEN ET LONG TERME. AVEC UNE MISE EN ŒUVRE CLÉ EN MAIN ET UN ACCÈS WEB À DISTANCE, CE DISPOSITIF PERMET D'ASSURER UNE SURVEILLANCE POUR DES PROJETS DONT L'ACCÈS EST DIFFICILE.

INTRODUCTION

L'utilisation de nappes géosynthétiques de renforcement pour prévenir les effondrements dans les zones à risque de cavités, localisées ou non, est aujourd'hui relativement courante. Le projet REGIC (Renforcement par Géosynthétique Intelligent sur Cavités naturelles ou anthropiques, Al Heib et al., 2022) a complété l'approche de la conception et du dimensionnement présenté dans la norme française sur la conception et le dimensionnement du renforcement de la base de remblais sur zones à risques d'effondrements par géosynthétiques (XP G38-065, 2020). Il aborde l'utilisation de sols cohérents en remblai renforcé par géosynthétiques au-dessus de cavités et la conception et le développement d'un système de suivi spécifique au renforcement par géosynthétiques au-dessus de cavités. Constitué d'un module de détection, d'auscultation et d'alerte spécifique associé à un géosynthétique de conception innovante, ce système permet de détecter et de mesurer les déformations dues à l'évolution de cavités souterraines. Tout au long de la vie de l'ouvrage, ce système complet permet de surveiller et d'assurer une détection précoce de l'effondrement grâce à la mesure de très faibles déformations. Le suivi continu de l'ouvrage permet ainsi d'améliorer la gestion du risque de ce dernier.

1

© INERIS

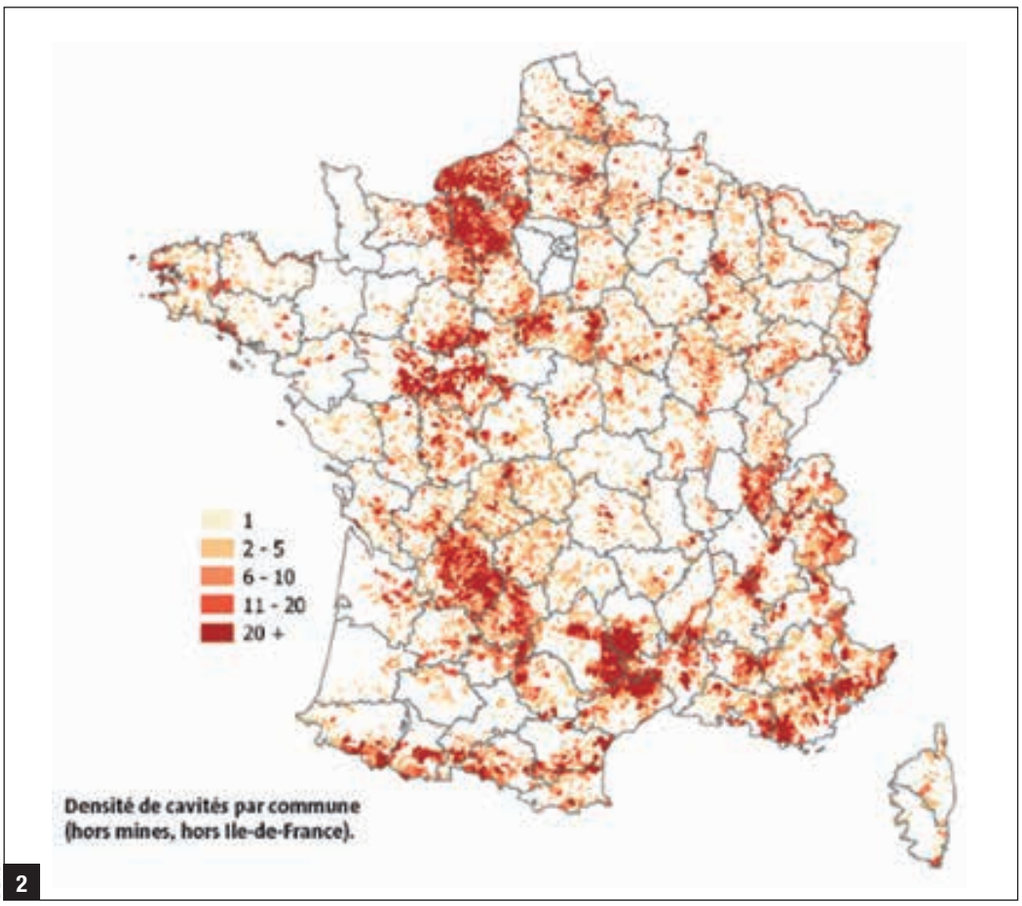
1- Remontée de fontis sous une chaussée.

1- Sinkhole rising under a pavement.

CAVITÉS SOUTERRAINES ET ALÉA D'EFFONDREMENT LOCALISÉ

Les cavités souterraines naturelles et anthropiques (figure 2) représentent un aléa d'effondrement localisé (fontis). L'effondrement, ayant un caractère brutal, s'observe généralement lorsque la cavité est située à faible profondeur (figure 3). La vitesse de la remontée de l'effondrement vers la surface, et donc le temps compris entre l'effondrement du toit immédiat et la manifestation en surface, est extrêmement variable. Elle dépend de la profondeur de la cavité, de la nature des matériaux et de conditions locales (présence d'eau, failles, trafic, vibrations, etc.). Ce temps peut varier de quelques jours pour des terrains peu résistants à plusieurs années voire dizaines d'années pour des terrains résistants.

La présence d'une nappe aquifère ou d'une circulation d'eau au sein de la cavité, pouvant déplacer ou étaler les éboulis dans les galeries, favorise le développement de la zone de remontée de fontis vers la surface qui



© BRGM

2

2- Inventaire des cavités souterraines naturelles et anthropiques (hors mines).

3a- Étapes de remontée de fontis et zone d'influence du fontis (1 : démarrage de la rupture au toit, 2 : cloche auto stable, 3 : formation d'un fontis).

3b- Exemple d'un effondrement localisé au droit d'une maison.

2- Inventory of natural and anthropogenic underground cavities (excluding mines).

3a- Stages of subsidence cavity rising and area of influence of the sinkhole (1: start of failure in the roof, 2: free-standing bell, 3: formation of a sinkhole).

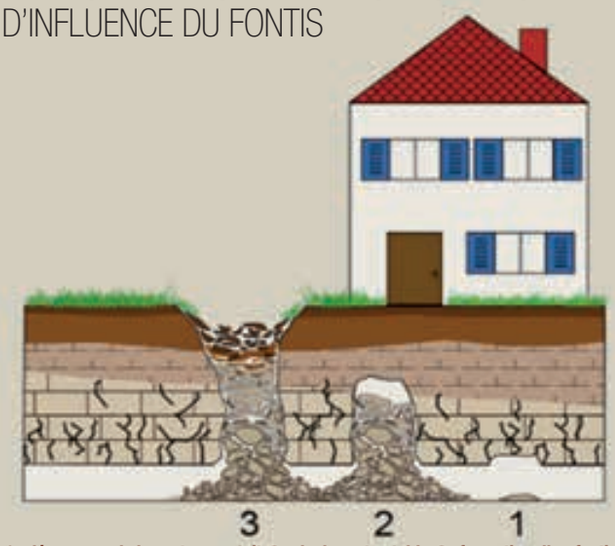
3b- Example of a localised collapse at the level of a house.

peut conduire à un cratère en surface. Les conséquences prévisibles sur les structures et infrastructures dépendent du diamètre de l'effondrement en surface. Elles varient entre très limitées (effondrement auto-remblayé) et très élevées (diamètre ≥ à 10 m).

MÉTHODES DE MISE DE SÉCURITÉ PAR GÉOSYNTHÉTIQUE DE RENFORCEMENT

Le renforcement par géosynthétique est une solution reconnue pour traiter les fontis potentiels de petit diamètre inférieur à 4 m et exceptionnellement 5 m, que ce soit pour des cavités naturelles ou anthropiques. Dans le cas des affaissements de plus grand diamètre, l'utilisation d'un géosynthétique instrumenté associé à un système de surveillance adéquat peut s'avérer une solution intéressante pour détecter, voire surveiller, une remontée de la cavité qui engendre l'affaissement. Le principe de fonctionnement d'un géosynthétique lors de la remontée d'une cavité au niveau du terrain naturel ou lorsque la cavité s'ouvre sous le géosynthétique, a été présenté dans la norme XP G38-065 (figure 4). ▷

ÉTAPES DE REMONTÉE DE FONTIS ET ZONE D'INFLUENCE DU FONTIS



1 : démarrage de la rupture au toit. 2 : cloche auto stable. 3 : formation d'un fontis.

3a

© INERIS

EXEMPLE DE D'UN EFFONDREMENT LOCALISÉ AU DROIT D'UNE MAISON

3b

© INERIS

4- Mécanisme pris en compte lors du dimensionnement.

5- Vue transversale - Illustration d'un géosynthétique implanté au-dessus d'une cavité et identification des zones A, B et C de surveillance.

6- Géosynthétique "bi-raideur" inversé avec deux résistances de câbles de renforcement.

4- Mechanism taken into account during sizing.

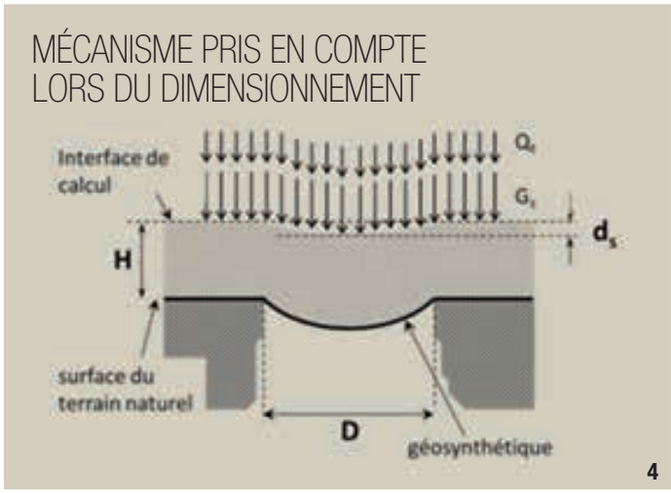
5- Transverse view - Illustration of a geosynthetic liner located above a cavity and identification of surveillance zones A, B and C.

6- Inverted "dual-stiffness" geosynthetic liner with two reinforcing cable resistances.

Suivant le diamètre (D) de la cavité, la hauteur (H) du remblai au-dessus du géosynthétique et les surcharges permanentes (G_s) ou provisoires (Q_t), il est possible de dimensionner le renforcement par géosynthétique pour limiter (voire annuler) le tassement en surface (d_s) en fonction des exigences de l'ouvrage.

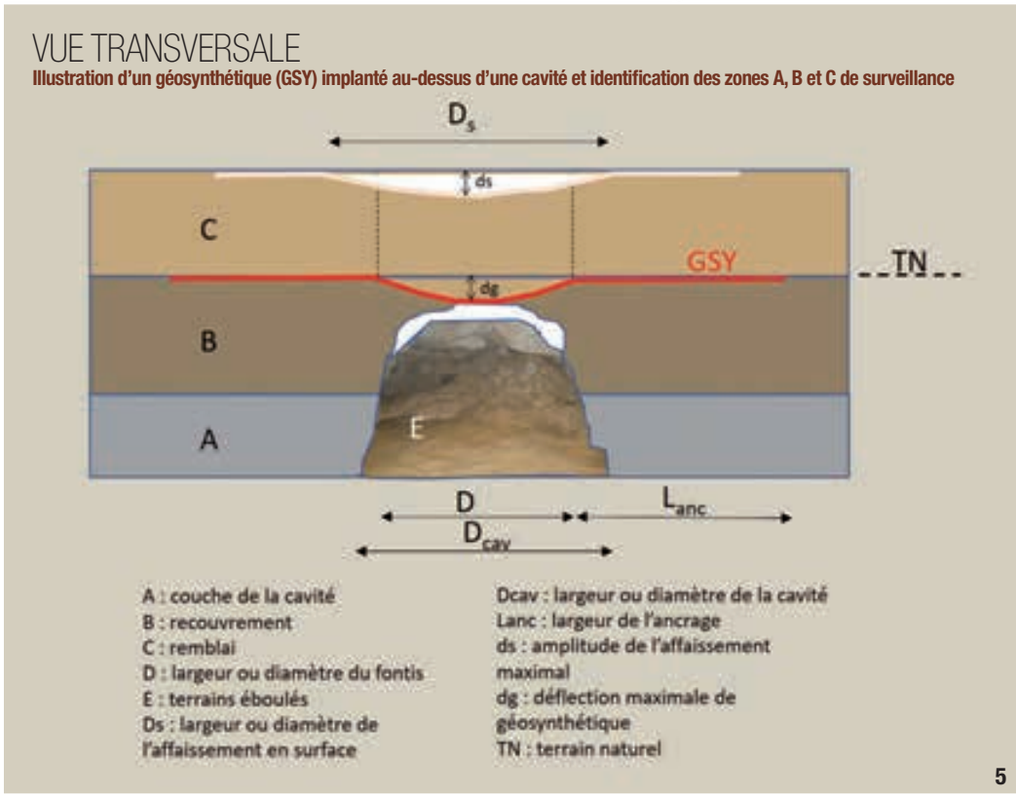
En utilisant les hypothèses de la norme, on peut montrer qu'au-delà du dimensionnement du géosynthétique de renforcement, il est aussi possible de définir les paramètres nécessaires à la conception du système de détection, d'auscultation et d'alerte lié au géosynthétique.

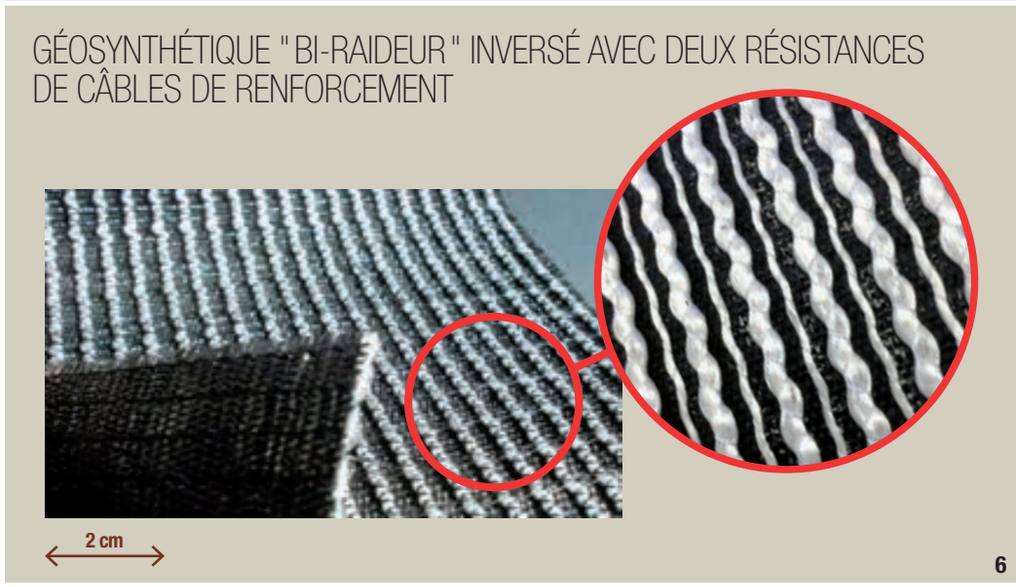
Le système de suivi et le renforcement par géosynthétiques sont intimement liés et doivent être conçus conjointement pour permettre une bonne optimisation. Une fois ces paramètres connus et l'étude géotechnique du site finalisée, il reviendra au maître d'ouvrage (éventuellement maître d'œuvre) de choisir les objectifs temporels de la solution de renforcement instrumenté de l'infrastructure :

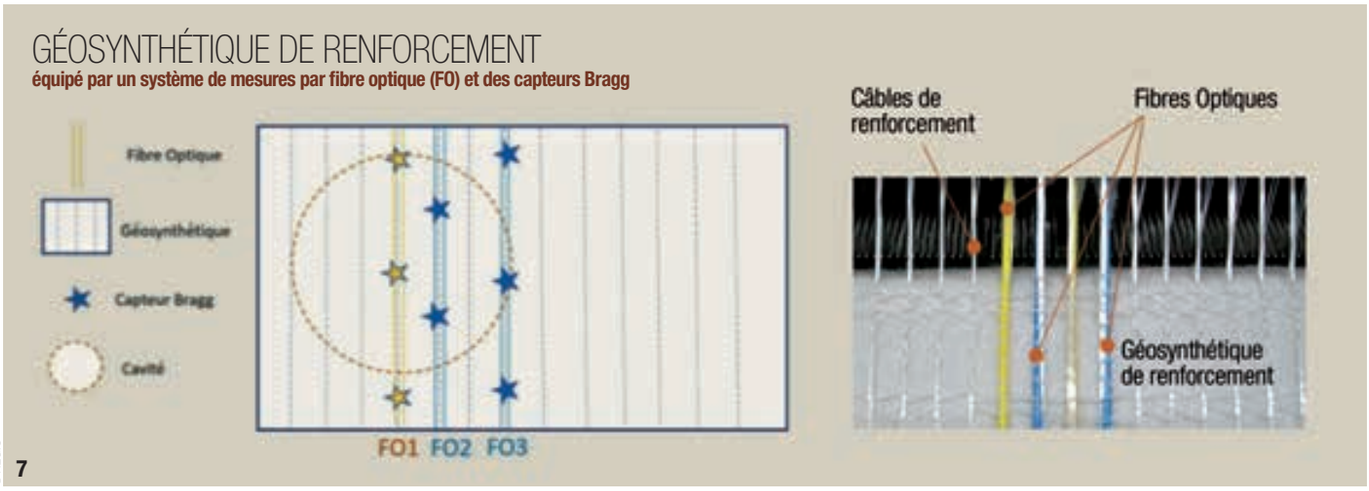


→ Soit un "renfort temporaire par géosynthétique instrumenté" en prévoyant un traitement définitif à court terme après détection de la remontée de la cavité ;

→ Soit un "renfort à long terme par géosynthétique instrumenté" : avec un dimensionnement du renforcement à long terme (en général 100 ans) associé à un "système de suivi" de l'évolution de la cavité approprié pour permettre le maintien de l'exploitation de l'ouvrage grâce à la maîtrise de l'affaissement maximum admissible en surface.







© REGIC 7

Le détail de la conception du système de renforcement et d'auscultation en fonction de l'évolution envisagée pour les phénomènes liés à la remontée de la cavité, et ou à l'affaissement est présenté dans l'article (Riot et al., 2022). Celui-ci montre aussi comment un système de suivi adapté peut éventuellement permettre de poursuivre la surveillance si l'ouverture se poursuit de manière progressive au-delà du diamètre nominal.

SURVEILLANCE DES CAVITÉS À L'AIDE D'UN GÉOSYNTHÉTIQUE INSTRUMENTÉ

La surveillance d'un aléa mouvement de terrain (fontis, affaissement et effondrement) est une solution palliative, dans l'attente de travaux de mise en sécurité ou d'autres moyens de remédiation.

Le déploiement de la surveillance d'une cavité dépend essentiellement des enjeux en surface. On distingue la surveillance de la cavité, celle du recouvrement et celle des enjeux en surface (figure 5). Les deux premières sont réservées à des cavités accessibles et localisées.

Le géosynthétique "bi-raideur inversé", développé dans le cadre du projet REGIC, (figure 6) assure à la nappe de renforcement deux raideurs en traction qui s'activent l'une après l'autre, la première étant plus faible que la seconde.

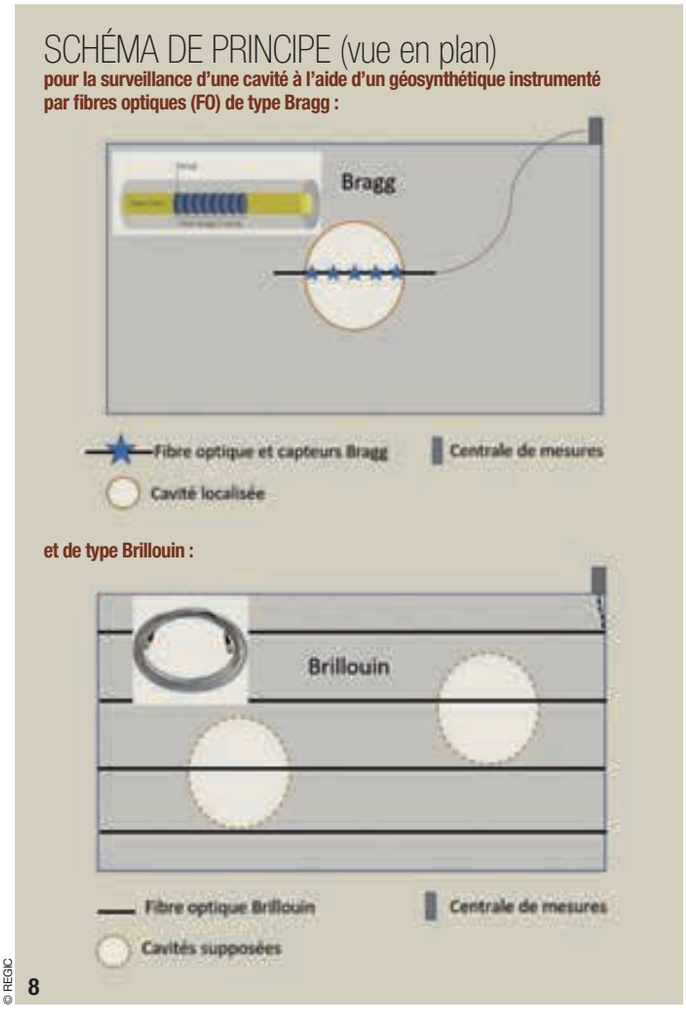
Il permet, grâce à sa première raideur, de faciliter la détection de mouvements de faible amplitude avant la formation complète de l'effondrement. L'activation de la seconde raideur garantit le même niveau de sécurité final qu'apporterait un géosynthétique avec une seule raideur.

L'intégration de fibres optiques dans la structure du géosynthétique (figure 7) permet de suivre l'évolution de la déformation du géosynthétique et de la température dans l'environnement immédiat de la cavité instable.

La mesure de la température fournit un indicateur de l'état hydrique du recouvrement, notamment en cas de fuite de canalisation ou de remontée de la nappe phréatique, car l'eau est le facteur moteur pour le déclenchement d'effondrements.

Deux technologies de mesure par fibres optiques peuvent être intégrées pour les mesures de déformation et de température au-dessus des cavités :

→ Une technologie utilisant un système de mesures ponctuelles multiples et distribuées le long de la fibre, créant un réseau de Bragg (figure 8 haut). Les réseaux de Bragg sont particulièrement adaptés pour l'instrumentation d'une zone limitée correspondant à une cavité localisée ou des enjeux ponctuels de dimensions réduites ; ▷



© REGIC 8

7- Géosynthétique de renforcement équipé par un système de mesures par fibre optique (FO) et des capteurs Bragg.

8- Schéma de principe (vue en plan) pour la surveillance d'une cavité à l'aide d'un géosynthétique instrumenté par fibres optiques (FO) de type Bragg et Brillouin.

7- Reinforcing geosynthetic liner fitted with an optical fibre measuring system and Bragg sensors.

8- Schematic diagram (plan view) for surveillance of a cavity by means of a geosynthetic liner instrumented by optical fibres of the Bragg and Brillouin type.

→ Une technologie utilisant un système de mesures réparties le long de la fibre, appelée Brillouin. Les fibres optiques de type Brillouin sont particulièrement adaptées à la détection, l'auscultation et la surveillance de cavités non localisées et/ou connues, pour les infrastructures linéaires de grandes dimensions (figure 8 bas). Elles peuvent aussi être utilisées lorsqu'il y a plusieurs cavités localisées.

La densité des capteurs ou des lignes de mesures dépend principalement des enjeux en surface (par exemple une faible densité pour des terrains peu fréquentés, et une densité importante pour des infrastructures de type routes et voies ferrées) et des dimensions de la cavité ou des cavités. Il est également possible d'adapter la fréquence des mesures en fonction du risque et/ou de la sensibilité des infrastructures ou des structures à surveiller. En fonction de l'importance des enjeux et de l'évolution de la cavité, une procédure de surveillance peut être proposée pour déterminer les seuils d'intervention et d'alarme.

CONCEPTION DE LA "GÉO-AUSCULTATION", INSTALLATION, SUIVI ET GESTION D'ALARME

Une fois l'étude préliminaire du site réalisée, avec la définition du type de cavité, de sa localisation éventuelle ou non, du type de désordres attendus, de leur extension en surface et de leurs vitesses, il est possible de finaliser la conception de la solution. Le choix du géosynthétique spécifique est défini ainsi que le type de fibre optique, dont la technologie est adaptée au type d'effondrement. Il en découle enfin le choix du système d'auscultation (détection/acquisition) adapté au type d'infrastructure, au géosynthétique choisi et au type d'effondrement.

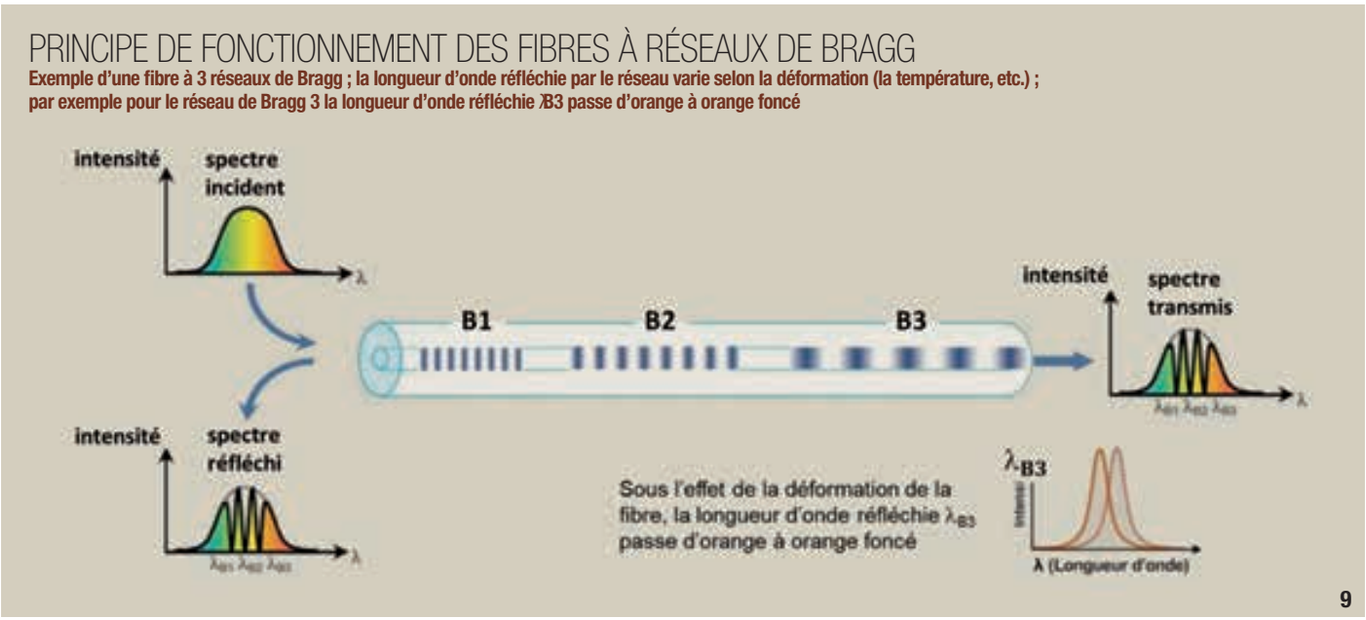
On perçoit ainsi comment, suivant les mécanismes en jeu, les objectifs de traitement et le type de surveillance, le concepteur dispose, en fonction de ses objectifs et des moyens à disposition de solutions grâce aux différentes technologies de fibre optique associées, éventuellement si nécessaire, à un géosynthétique de renforcement à "raideur inversée" pour permettre une détection précoce.

9- Principe de fonctionnement des fibres à réseaux de Bragg : exemple d'une fibre à 3 réseaux de Bragg.

10- Principe de fonctionnement du système à réseaux de Bragg avec analyseur.

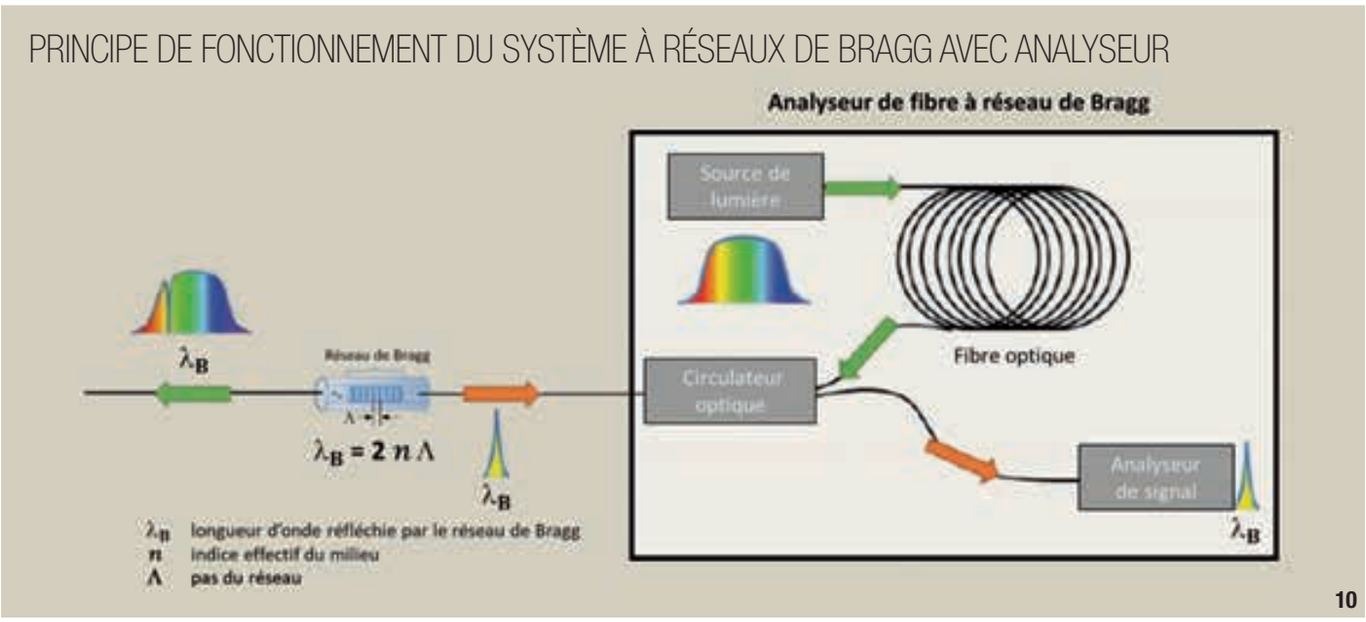
9- Operating principle of fibres with distributed Bragg reflectors: example of a fibre with 3 distributed Bragg reflectors.

10- Operating principle of the distributed Bragg reflector system with analyser.



9

© DUPONT, 2002



10

© DUPONT, 2002

© AFITEXINOV

11

11- Principe de fonctionnement de la chaîne de mesure et de surveillance du système de suivi intégré.

12- Logiciel Preditect®, exemple de vue : lecture des capteurs de fibre optique en temps réel.

13- Logiciel Preditect®, exemple de vue : Paramétrage et visualisation GPS d'un capteur de fibre optique.

12 © AFITEXINOV

11- Operating principle of the measuring and surveillance chain of the integrated monitoring system.

12- Preditect® software, example of a view: reading optical-fibre sensors in real time.

13- Preditect® software, example of a view: configuration and GPS display of an optical-fibre sensor.

13 © AFITEXINOV

Une fois la technologie de capteur à fibre optique, le type de géosynthétique et le calepinage précisé, il convient de concevoir le système de suivi approprié pour acquérir les mesures des capteurs, les traiter, les comparer aux seuils définis et, le cas échéant, déclencher des alertes, voire des alarmes.

Le principe de fonctionnement des réseaux de Bragg ainsi que du système associé avec analyseur de fibre optique sont présentés figures 9 et 10.

On notera (figure 9) que, sous l'effet de la déformation de la fibre, la longueur d'onde réfléchie par le réseau de Bragg λ_{B3} varie de manière proportionnelle à la déformation et passe par exemple d'orange à orange foncé. Ceci implique que les longueurs d'onde de chaque capteur doivent être choisies de manière suffisamment espacée pour éviter qu'elles ne se chevauchent lors des mesures de déformations.

Il s'ensuit que le nombre de capteurs le long d'une même fibre optique est limité en général à une dizaine.

Ces caractéristiques en font une fibre particulièrement adaptée à la détection, l'auscultation et la surveillance d'infrastructures où la localisation de la cavité est connue ou de structures "ponctuelles" (de dimensions réduites).

L'augmentation de la taille de la zone auscultée est cependant possible en multipliant les lignes de fibre optique. ▷

14

© GOURC ET DELMAS, 2017

15

© GOURC ET DELMAS, 2017

Le système de suivi permet :

1- De réaliser l'acquisition des données (mesures brutes) :
- soit en acquisition périodique (avec sauvegarde manuelle par le passage d'un technicien),
- soit en acquisition continue avec échantillonnage des données, filtrage et transfert pour traitement ;

2- De traiter les données de manière préliminaire avec concaténation des fichiers ;

3- De qualifier les données et de réaliser un traitement de localisation (extension des mouvements, dépassement de seuils, etc.) ;

4- De déclencher si nécessaire des alertes avec rapport d'anomalie qui pourra entraîner un changement de mode de surveillance, une intervention sur site, etc.

En parallèle le système prévoit le stockage du catalogue des anomalies détectées, des rapports et graphiques de surveillance ainsi que des rapports de maintenance et d'évolution des équipements.

Afin de faciliter l'utilisation de cette nouvelle technologie de "géo-auscultation", Afitexinov a développé et mis au point le système de suivi intégré dénommé Preditect© (figure 11). Sur le serveur distant, le "système de suivi intégré" assure tous les traitements préliminaires et avancés (figure 12) et permet le cas échéant de déclencher des alertes paramétrables par le maître d'ouvrage. Une fois le boîtier connecté sur le chantier, les mesures peuvent être effectuées, soit sur place en se connectant à l'aide d'un ordinateur, soit à distance en paramétrant l'ensemble des données sur la plateforme numérique (figure 13).

L'exemple de l'ouvrage "Trois Luc à la Valentine" datant de 1990 (décrit dans Gourc J.P., Delmas Ph., (2017) "Retour sur des ouvrages avec géosynthétiques toujours en service après plusieurs décennies", CFG, Actes 11es Rencontres Géosynthétiques, Lille) est intéressant (figures 14 et 15). Il est vieux de plus de 30 ans et aucun dispositif de suivi n'existait à l'époque. Il montre un affaissement d'une chaussée renforcée. Le système Preditect© associé au géosynthétique bi-raideur inversé aurait permis de détecter l'affaissement avant qu'il n'atteigne ce niveau de déformation de 8 cm.

CONCLUSION

L'utilisation de nappes géosynthétiques de renforcement pour prévenir les effondrements localisés des cavités est aujourd'hui courante et il est important d'intégrer à cette technique un système de mesures, de détection, d'auscultation et d'alerte fiable. Ce développement réalisé dans le cadre du projet de recherche REGIC a permis, entre autres, la mise au point d'une nouvelle technologie de "géo-auscultation" qui intègre un système de suivi spécifique. Celui-ci est spécifiquement adapté à la problématique du suivi de déformations dans les zones à risque d'effondrement. Il offre notamment aux maîtres d'ouvrage un outil facile d'emploi et aisément paramétrable en fonction des objectifs de surveillances visés. □

14- "Trois Luc à La Valentine" : effondrement sur une zone renforcée par géogrille.

15- "Trois Luc à La Valentine" : vue de la géogrille mise à nu au niveau de la zone d'effondrement.

14- "Trois Luc à La Valentine": collapse on an area reinforced by geogrid.

15- "Trois Luc à La Valentine": view of the geogrid bared at the level of the collapse zone.

Télécharger le guide :
"Renforcement par géosynthétique pour la réduction des risques associés à un effondrement localisé".

ABSTRACT

SINKHOLE RISING ABOVE UNDERGROUND CAVITIES - USE OF AN INSTRUMENTED DUAL-STIFFNESS GEOSYNTHETIC CLAY LINER

MATHILDE RIOT, AFITEXINOV - MARWAN AL HEIB, INERIS - PHILIPPE DELMAS, EXPERT GÉOTECHNICIEN

The use of reinforcing geosynthetic clay liners to prevent localised collapses on cavities is now relatively commonplace. *The surveillance solution described is based on an innovative instrumented geosynthetic clay liner and its integrated autonomous acquisition system, especially designed for use by a non-specialist. Adapted for risk management and the mitigation of localised collapses, it allows early detection of the phenomenon, and then, when it occurs, real-time monitoring of development of the collapse with the appropriate alarm processes. This system can be extended to other sensitive structures by means of a few simple adaptations.* □

ELEVACIÓN DE SUBSIDENCIA POR ENCIMA DE LAS CAVIDADES SUBTERRÁNEAS - UTILIZACIÓN DE UN GEOSINTÉTICO DE DOBLE CAPA INSTRUMENTADO

MATHILDE RIOT, AFITEXINOV - MARWAN AL HEIB, INERIS - PHILIPPE DELMAS, EXPERT GÉOTECHNICIEN

Actualmente, los geosintéticos de refuerzo se utilizan habitualmente para prevenir desprendimientos localizados en cavidades. *La solución de monitoreo presentada se basa en un innovador geosintético instrumentado y su sistema de adquisición integrado, especialmente diseñado para ser utilizado por personal no especializado. Adaptada a la gestión de riesgos y la mitigación de desprendimientos localizados, permite detectar con antelación el fenómeno y, una vez se produce, realizar un seguimiento en tiempo real de su evolución, con los procesos de alarma pertinentes. Este sistema puede aplicarse a otras construcciones sensibles mediante simples adaptaciones.* □

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

Mutuelle d'assurance des professionnels du bâtiment et des travaux publics - société d'assurance mutuelle à cotisations variables régie par le code des assurances et exonérée de plein droit de la TVA
Siège : 20 rue Garibaldi - BP 6402 - 69413 Lyon Cedex 06 - SIREN 775669056 - code APE 6512Z - 04 72 74 52 52 - auxiliaire@auxiliaire.fr - Document à caractère publicitaire - ©Envato Pty Ltd.

Projet immobilier à Ballancourt-sur-Essonne (91)
La parcelle a fait l'objet d'une exploitation souterraine du calcaire, rendant nécessaires des travaux de consolidation (comblement et injection) : 2 000 forages à 8 m de profondeur en moyenne.

Intervenant partout dans le monde pour le compte de clients publics ou privés, Soletanche Bachy s'attache à proposer les meilleures solutions techniques et contractuelles.

Elle apporte aussi bien des compétences polyvalentes d'ensemblier dans le cadre de grands projets d'infrastructures, que celles de spécialiste maîtrisant l'ensemble des procédés de géotechnique, de fondations spéciales, de travaux souterrains, d'amélioration et de dépollution des sols.

Build us

Construire sur du solide

www.soletanche-bachy.com

SOLETANCHE BACHY