

g é o t e c h n i q u e , f o r a g e e t f o n d a t i o n s

SOLSCOPE



CHANTIERS À CREUSER

RECONSTRUCTION DU POSTE N°1 AU GRAND
PORT MARITIME DE L'ÎLE DE LA RÉUNION

page 68

À BEUCAIRE, L'ÉCLUSE DE
NOURRIGUIER SE REMET À FLOT

page 76

DOSSIER

DIGUES ET OUVRAGES DE PROTECTION

PAGE 26



ACTUALITÉS

Le couplage CPT-OIP pour
l'évaluation des sols pollués

page 20

Deuxième génération
de l'Eurocode 7

Page 22



**PARTENAIRE
EXPERT**

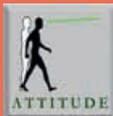


Spie batignolles fondations étudie et réalise tous vos projets comprenant des fondations profondes, soutènements, ancrages, reprises en sous-œuvre et traitements de terrain.

CONFORTEMENT DE BERGES SUR LE CANAL DE L'ESCAUT À TRITH-ST-LÉGER

spie batignolles

/ fondations

**RPI**

«Le Millenium» - 9, bd Pierre-Mendès-France
77600 Bussy-Saint-Georges
Tél : +33 (0) 1 60 94 22 20
Fax : +33 (0) 1 64 77 51 82
Contact : contact@rpi.fr

ATTITUDE Consultants

17 rue Charles-de-Gaulle
86240 Smarves
Tél : +33 (0) 549 300 222
Contact : d.rousseau@solscope.fr

Parution : semestrielle

Publication gratuite

Date de parution : novembre 2022

Solscope mag

ISSN 2417-6508

Directeurs de la publication :

Jérôme Aubry et Dominique Rousseau

Comité de rédaction :

Aline Quenez, CFGI (SGP) ; Pascal Chassagne, USG (Alios) ; Jean-Paul Volcke, CFMS (Franki Fondation) ; Stéphane Monleau, SOFFONS (Sole-tanche Bachy) ; Michel Khatib, Syntec Ingénierie (Ginger CEBTP) ; Éric Garroust, SFEG (Coirasol) ; Pascal Sauvage, UFCMF (Socomafor) ; Philippe Cosenza, CFMR (ENSI Poitiers - UMR CNRS IC2MP), Bertrand Mousselon, CINOV (CREA) ; Boris Devic-Bassaget, UPDS (SARPI Remédiation France).

Rédactrice en chef :

Aude Moutarlier
+33 (0) 6 60 99 98 23
audemoutarlier@hotmail.com

Ont collaboré à ce numéro :

Claire Janis-Mazarguil, Maylis Roizard, Véronica Velez.

Coordnatrice et publicité :

Anne-Sophie Cuvillier
+33 (0) 1 60 94 22 23
cuvillier@rpi.fr

Service technique :

Hélène Fabris
+33 (0) 1 60 94 22 25
fabris@rpi.fr

Correction-révision :

Philippe Loffredo
philippe.loffredo@gmail.com

Service abonnements :

RPI «Le Millenium»
9, bd Pierre-Mendès-France
77600 Bussy-Saint-Georges
+33 (0) 1 60 94 22 20
cuvillier@rpi.fr

Conception graphique :

IROKWA
www.agence-irokwa.com

Impression :

Imprimerie IRO
ZI - Rue Pasteur
17185 Périgny cedex

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, faite sans le consentement de l'éditeur est illicite. (article L.122-4 du code de la propriété intellectuelle) toute copie doit avoir l'accord de l'éditeur et du Centre français d'exploitation du droit de copie, Paris.



Revue éditée par
ATTITUDE Consultants
(président Dominique Rousseau) et
RPI - SARL (gérant Jérôme Aubry)

Crédit photo
couverture : D&K

ÉDITO

Yves Wigt, président de France Dignes prend la parole

En tant que président de l'association France Dignes, je suis ravi d'ouvrir ce numéro de Solscope Mag consacré aux digues.

Sur le territoire métropolitain, une commune sur deux est exposée au risque d'inondation et, avec 9 000 kilomètres de digues, la France dispose d'un important réseau d'ouvrages de protection. La vétusté de certains dispositifs et les conséquences du changement climatique ont mis en relief des défis majeurs à relever. Aussi la réglementation liée aux systèmes d'endiguement a-t-elle largement évolué en clarifiant les missions et les responsabilités de chacun ; des structures gestionnaires veillent aujourd'hui à la surveillance et à l'entretien de ces ouvrages.

Les gestionnaires doivent désormais s'engager à assurer un niveau de protection clairement défini pour les zones protégées. Cette démonstration implique l'analyse des nombreuses interactions entre les sollicitations, les caractéristiques physiques et les modalités de gestion des digues. Une grande variété de disciplines va ainsi œuvrer à la sûreté des ouvrages et à l'efficacité de ces systèmes : génie civil, hydraulique, hydrologie... et évidemment la géotechnique !

Le géotechnicien est attendu pour qualifier les propriétés des ouvrages, en évaluer les performances et éventuellement concevoir des travaux. Ces prestations sont souvent complexes du fait de la grande variété des ouvrages : ancienneté, état de végétalisation, composition... Le géotechnicien est un des maillons essentiels d'une longue chaîne d'acteurs disposant nécessairement d'un agrément ministériel spécifique. Face au besoin d'optimiser les coûts des études et des travaux sans rogner sur les performances, la profession est particulièrement attendue pour valoriser au maximum les ouvrages existants et les matériaux disponibles. Du diagnostic initial jusqu'à la conduite des travaux, les gestionnaires de digues s'attacheront de plus en plus à trouver des prestataires de qualité en capacité de proposer des solutions innovantes.

L'association France Dignes, créée en 2013, regroupe plus d'une centaine de gestionnaires de digues et autres ouvrages de protection contre les inondations. Elle est devenue le relais à l'échelle nationale pour représenter la profession. Véritable espace d'échanges techniques et réglementaires, elle organise jusqu'en 2024 un cycle de Journées sur la géotechnique appliquée aux digues, ouvert aux bureaux d'études et industriels. Plus d'infos sur notre site France-dignes.fr, recherche «cycle géotechnique».

Bonne lecture.



Yves Wigt
Président de France Dignes

*** LES PARRAINS DU SALON SOLSCOPE**

AITF : Association des ingénieurs territoriaux de France

CFGJ : Comité français de géologie de l'ingénieur et de l'environnement

CFMR : Comité français de mécanique des roches

CFMS : Comité français de mécanique des sols et de géotechnique

CINOV : Fédération des syndicats des métiers de la prestation intellectuelle du conseil, de l'ingénierie et du numérique

SFEG : Syndicat national des entrepreneurs de puits et de forages pour l'eau et le géothermie

SOFFONS : Syndicat des entrepreneurs de sondages, forages et fondations spéciales

SYNTEC INGÉNIERIE : Fédération professionnelle de l'ingénierie

UFCMF : Union française des constructeurs de machines de forage

UPDS : Union des professionnels de la dépollution des sites

USG : Union syndicale géotechnique



SONDEUSE
GÉOTECHNIQUE



OUTILLAGE DE FORAGE
ET LOCATION DE MATÉRIEL



FOREUSE POUR LA GÉOTHERMIE,
LE FORAGE D'EAU ET LA FONDATION



3 SITES

POUR VOUS OFFRIR LE MEILLEUR SERVICE

EMCI
emci@emci-fr.com
TEL : 01 34 57 86 90

PARIQUIP
contact@pariquip.fr
TEL : 02 32 07 02 22

SOMAC
contact@somac78.com
TEL : 02 32 07 02 50





ÉDITORIAL 3

AGENDA

Suivez les prochains rendez-vous de la profession 6

ACTUALITÉS 6

ACTUALITÉS Risques rocheux

■ C2ROP se poursuit en C2ROP2 14

ACTUALITÉS Risques sismiques

■ L'apport du S-CPTu (*Seismic Cone Penetration Test*) dans les études géotechniques en contexte sismique 18

ACTUALITÉS Environnement

■ Le couplage CPT-OIP pour l'évaluation des sols pollués 20

NORMALISATION

■ Deuxième génération de l'Eurocode 7 22

DOSSIER DIGUES ET OUVRAGES DE PROTECTION

- Introduction 26
- Confortement d'une cale bretonne par injection de résine 29
- Confortement des ouvrages portuaires de Port-en-Bessin-Huppain 30
- Renforcement des digues de protection contre les inondations par sol traité à la chaux... 34
- Protection végétalisable des digues et berges soumises à la submersion 40
- À La Rochelle, renforcement du quai jetée sud du terminal Chef de baie 4 44
- La surveillance par interférométrie de bruit sismique : un nouvel outil pour l'analyse d'intégrité de barrages 50

PUBLI-RÉDACTIONNEL

■ Le Banc de charges : un outil TECHNO PIEUX... 52

PORTRAIT D'ENTREPRISE

- DTF Géotechnique : quatre ans et déjà grande 54
- Groupe Gengis : agile et réactif 58

TÊTE D'AFFICHE

- Franck Bouché, président de l'UPDS : «Nos techniques de dépollution doivent faire la part belle aux technologies les moins invasives, les moins consommatrices de carbone et les plus respectueuses de l'environnement»... 62

GRAND PARIS

- Les 47 Mt des terres excavées du Grand Paris Express, un enjeu de taille pour la Société du Grand Paris 64

CHANTIERS France

- Reconstruction du poste n°1 au grand port maritime de l'île de La Réunion 68
- Renforcement de base de remblai routier sur zone à risque de cavité de fort diamètre 72
- À Beaucaire, l'écluse de Nourriguier se remet à flot 76
- Trélazé : amélioration et renforcement de sols par compactage dynamique 78

CHANTIERS International

- Israël : Les tirants d'ancrage précontraints en fibre de verre Astec Active Anchor 80
- Confortement durable des digues à l'aide des palplanches en acier 82

GÉOTECHNIQUE

- Étude de confortement de la digue du port à Givet 85

ENVIRONNEMENT

- Expérimentation inédite dans le Loiret et en Vendée pour limiter les dégâts de la sécheresse sur les routes 88

ANNONCEURS & ABONNEMENTS 90

AGENDA

> 28 • 30 MARS 2023

INTERSOL

Congrès international sur l'analyse, les méthodologies de traitement et la réhabilitation des sols et des eaux souterraines pollués
Lille

> 14 • 15 JUIN 2023

SOLSCOPE

Salon international de la géotechnique, du forage et des fondations
Eurexpo - Lyon

> 13 • 16 SEPTEMBRE 2023

GEOFLUID

Salon international des technologies et des équipements pour la recherche, l'extraction et le transport des fluides souterrains
Piacenza - Italie

> 2 • 4 OCTOBRE 2023

AFTES

Congrès international de l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain
Palais des congrès - Paris

> 19 • 24 AVRIL 2024

INTERMAT

Salon international de la construction et des infrastructures du bâtiment et travaux publics et de matériels de chantier
Paris-Nord Villepinte

Alios acquiert Hydro Invest

Le groupe Alios a officialisé l'acquisition de la société Hydro Invest. Créée en 1976 et localisée à Angoulême (Charente), Hydro Invest est une société d'études et de recherches spécialisée dans le domaine des eaux souterraines et superficielles. Son équipe pluridisciplinaire (ingénieurs hydrogéologues, techniciens hydrogéologues et environnement, électroniciens, mécaniciens, etc.) met en œuvre de puissants moyens d'investigation et des techniques innovantes. Hydro Invest intervient pour la protection et la mise en valeur des ressources en eau, la surveillance et le contrôle des ouvrages, les études de faisabilité (AEP, thermalisme, eaux minérales, géothermie...). « Nous souhaitons nous munir de nouvelles compétences qui permettent de proposer un service complet pour des projets incluant l'eau en tant que ressource naturelle à exploiter ou protéger. Avec Hydro Invest, nous allons élargir notre capacité d'ingénierie dans différents domaines d'avenir, tels que la gestion de la ressource en eau et la géothermie. Comme nous l'avons fait avec la société espagnole Ikerlur Ingenieria Geológica y Geotecnia, qui



© Alios/Hydro Invest

nous avait rejoints en 2018, nous avons à cœur qu'Hydro Invest conserve sa culture faite de géologie, d'hydrogéologie et de métrologie, et nous souhaitons qu'elle continue de développer sa gamme de prestations en pleine autonomie. Nous souhaitons encore une fois la bienvenue à toute l'équipe d'Hydro Invest qui s'acclimate doucement à notre fonctionnement. Nous avons hâte d'échanger plus longuement avec chacun d'entre eux et d'apprendre à mieux les connaître », ont déclaré Pascal Chassagne, président du groupe Alios et Adrien Combaud, directeur du département hydrogéologie du groupe Alios.

Dextra intervient aux Émirats arabes unis



© Dextra

Les armatures composites, faites de fibre de verre dans une matrice polymère, sont utilisées depuis plus de 25 ans dans les projets de tunnels mécanisés, en particulier pour les tympans de tunneliers. En parallèle, les solutions d'ancrages en fibre de verre en alternative à l'acier se sont développées, tant au niveau des applications temporaires que permanentes, en apportant de multiples avantages : légèreté, pas de corrosion, pas de gêne pour des travaux d'excavation futurs et réduction de l'impact environnemental. Enfin, les clous en fibre de verre sont de plus en plus utilisés, notamment pour le boulonnage de front pour les gros projets de tunnel, en raison de leur faible résistance au cisaillement et de leur facilité de coupe.

Le groupe Dextra, spécialiste sur les solutions géotechniques en matériaux composites, a apporté son savoir-faire sur un des projets les plus ambitieux de ces dernières années au Moyen-Orient, connu sous le nom d'Etihad Rail-Package D. Reliant Fujairah à Dubaï – 145 km dont 16 km de tunnel à travers la chaîne montagneuse Hajar –, il a été exécuté par le groupe chinois CRCC/CCECC en joint-venture avec NPC et le support des bureaux d'études Systra, Egis et Jacobs. Au cours des 48 mois de construction, le groupe Dextra a montré son expertise en proposant des alternatives économiquement plus avantageuses comme : le remplacement des boulons en acier de grade 500 MPa par un grade 830 MPa avec des livraisons étalées sur une période de 16 mois ; des boulons traditionnels en acier en grade 500 et 830 MPa – en diamètre 20 mm et 25 mm, dont certains galvanisés pour une application permanente ; des voûtes parapluie en tube acier de 11,80 m de longueur ; et des boulons en fibre de verre pour le boulonnage de front, en diamètre 32 mm.



© Dextra



SOLSCOPE

Échangeons, creusons l'avenir

2023

LE MEILLEUR
ENDROIT
SUR TERRE

POUR COMPRENDRE
CE QUI SE PASSE
SOUS TERRE

15^e SALON INTERNATIONAL DE LA GÉOTECHNIQUE,
DU FORAGE ET DES FONDATIONS SPÉCIALES

14 ET 15 JUIN 2023
LYON EUREXPO



Valérie Bernhardt, distinguée des insignes de chevalier de l'ordre de la Légion d'honneur

En mai dernier, Alain Pecker, a remis les insignes de chevalier de l'ordre de la Légion d'honneur à Valérie Bernhardt, directrice générale de Terrasol, groupe Setec. Cette dernière a été présidente du CFMS de 2016 à 2020. Elle est actuellement membre émérite du conseil d'administration et anime la commission communication du CFMS.



© CFMS

Édition 2022 du prix Jean-Kerisel

Le Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS) décerne tous les 2 ans le prix Jean-Kerisel qui récompense de jeunes professionnels ou chercheurs ayant contribué de manière significative à l'amélioration des analyses, des méthodes et des techniques utilisées en mécanique des sols et en géotechnique.

Le prix Kerisel a été attribué à Marc Peruzzetto, à l'issue de la présélection et de la sélection finale qui a eu lieu en avril dernier. Le prix lui a été officiellement remis lors des JNGG 2022 qui se sont déroulées fin juin 2022, où il a présenté ses travaux sur la quantification de la propagation des glissements de terrain.



© CFMS

Concours photo du CFMS : La géotechnique sous tous les angles

Tous les deux ans, le Comité français de mécanique des sols (CFMS) organise à l'occasion des Journées nationales de géologie et de géotechnique de l'ingénieur (JNGG), un concours photo. Pour cette 3^e édition, le thème était « La géotechnique sous tous les angles » et le 1^{er} prix a été décerné à Omar Krikez pour sa photo « *Franchissement urbain Pleyel (FUP) travaux de barrettes à Saint-Denis* ».



© Omar Krikez de chez Seif Intrafor

Le 2^e prix : Anthony Dumont pour sa photo « *Les ouvrages géotechniques face aux forces de la nature / Port-en-Bessin* ».



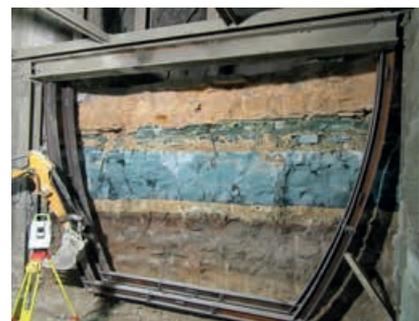
© Anthony Dumont de chez Hydrogéotechnique

Le 3^e prix : Vincent Madern pour sa photo « *Effacement d'une galerie pour redonner de la liberté aux saumons / Poutès* ».



© Vincent Madern de chez Hydrogéotechnique

Un prix spécial du jury a été décerné à Thomas Chauvin pour sa photo « *Creusement d'une galerie dans une carrière préalablement injectée à Bagneux* ».



© Thomas Chauvin de chez Vinci Construction Grands Projets

Antea Group mandaté pour le premier projet financé par la direction générale du Trésor au Kosovo

Antea Group, acteur incontournable en ingénierie et conseil environnemental, a annoncé démarrer, en 2022, un projet de grande ampleur au Kosovo, d'une durée de 4 ans. Celui-ci est destiné à améliorer drastiquement à l'horizon 2040 les conditions sanitaires et environnementales de l'agglomération de Pristina, recouvrant environ 550 000 habitants.

En charge d'approvisionner la capitale en eau potable et d'assurer l'assainissement des eaux, la régie des Eaux de Pristina est confrontée à un problème structurel. La direction générale du Trésor finance les études, la conception et la réalisation d'une station de traitement des eaux usées de l'agglomération.

Antea Group assure l'étude de la conception, le suivi de la construction et l'assistance à l'exploitation de cette infrastructure. Un volet important d'assistance technique



© Antea Group

sera également fourni pour assurer le transfert de compétence nécessaire au personnel de la régie des Eaux de Pristina pour la gestion d'un tel projet : audit d'organisation interne, formation en passation de marchés, analyse d'impact social, environnemental et économique, analyse de la qualité des eaux, dimensionnement d'ouvrages, exploitation de station, etc. Cette assistance aura pour objectif de pérenniser le fonctionnement de cette nouvelle grande infrastructure.



FRANKI
FONDATION


FAYAT
FONDATIONS

 **SEFI-INTRAFOR**
FAYAT

 **FRANKI**
FONDATION
FAYAT

EXPERT EN FONDATIONS SPÉCIALES

**ACTEUR RÉFÉRENT
EN FONDATIONS PROFONDES
& TRAVAUX SOUTERRAINS**

FONDATIONS.FAYAT.COM

EMCI, fabricant de machines de forage, annonce l'acquisition des sociétés Somac et Pariquip

L'opération qui a été finalisée le 1^{er} avril 2022 permet à, dans une période de forte demande, d'augmenter sa capacité de production et d'élargir son offre dans les métiers du forage. Créée en 1990 par Christophe Palica, la société Somac, constructeur historique des machines Sedidril, propose une gamme de foreuses allant de 500 kg à 25 t. Pariquip, dirigée par Stan Sully est, quant à elle, spécialisée dans le négoce et la location de machines de microfondations et de fondations spéciales.



© EMCI

EMCI est un acteur de référence dans le domaine de la géotechnique et de l'environnement. Avec plus de 60 foreuses livrées en 2021, la société est aujourd'hui le premier constructeur français. Par ce rachat, EMCI confirme une stratégie de croissance, tant au niveau national, qu'international. Le groupe se positionne désormais sur les métiers de la fondation, de la géothermie et du forage d'eau tout en développant une offre d'outillage.

Afin d'apporter à leurs clients toujours plus de services et de réactivité, EMCI, Somac et Pariquip s'appuient sur 4 sites : Le Perray-en-Yvelines (Yvelines), Guainville (Eure-et-Loir), Toulouse (Haute-Garonne) et Lyon (Rhône).

Spie Batignolles signe la tour Café Cacao

Forte de ses précédents succès en Côte d'Ivoire, Spie Batignolles fondations remporte le contrat d'une nouvelle fouille au cœur d'Abidjan. Celle-ci permettra l'édification d'une tour qui doit accueillir le siège du Conseil du Café et du Cacao sur la commune du Plateau, à proximité de la lagune. Les travaux de Spie Batignolles fondations dureront un an. Plusieurs techniques seront mises en œuvre pour livrer un ouvrage clés en main :

- un soutènement périphérique en paroi moulée ;
- un fond injecté limitant les venues d'eau lors du pompage ;
- des pieux de fondation ;
- le terrassement et le butonnage de la fouille.

Cette acquisition montre la confiance du client, Pierre-Fakhoury Organisation, après la réalisation des fondations de la Tour F, dans la cité administrative de la même ville. Cette réussite est liée au travail en équipe des services basés au siège à Nanterre et à Abidjan.



© Studio MAAC

Egis : nomination

Luc Boutonnier, directeur des opérations géotechniques, remplace Dominique Allagnat, parti à la retraite. Depuis 1995, Luc Boutonnier a fait toute sa carrière dans la géotechnique du groupe Egis, dont les équipes géotechniques représentent plus de 130 personnes, d'abord sur des routes et autoroutes, puis sur des lignes ferroviaires à grande vitesse, métros, centrales nucléaires, barrages et digues. Il a aussi piloté plusieurs projets de recherche dont le projet ANR Terredurable, et sa synthèse dans l'ouvrage Conception et construction des ouvrages en sols fins (Presse des Ponts). Luc Boutonnier est passionné par la richesse des expertises techniques de ses équipes en géotechnique, géologie, hydrogéologie, matériaux, pathologie, instrumentation, géophysique (cf. *article Sisprobe dans ce magazine*), etc. Leur conjugaison, souvent avec d'autres spécialités, est au cœur du processus de création de valeur pour les clients d'Egis.



© EGIS

Hesus se renforce à l'international et change son identité visuelle

Acteur européen pour le recyclage des terres de chantier en France et à l'international, Hesus change son identité visuelle. Basée à Ivry-sur-Seine, l'entreprise réalise 25 % de son chiffre d'affaires à l'international et ambitionne de doubler ce ratio avec 50 % de CA à l'international d'ici 18 mois. Ces dernières années, elle s'est développée à l'international avec la création de plusieurs entités en Europe (Grande-Bretagne, Pologne, Suisse, Suède et Allemagne).

Créée en 2008, elle s'appuie sur sa présence en Europe et construit sa feuille de route stratégique en s'appuyant sur : une expertise reconnue des systèmes logistiques et la capacité de proposer des solutions environnementales sur mesure afin de répondre aux besoins de ses clients ; une plateforme numérique de référence « Hesus Store » qui permet de centraliser la gestion et le recyclage des terres, matériaux et déchets de chantier. Cette dernière a permis de gérer, par exemple, 2 Mt de terres ; et une maîtrise des grands projets (GPE ; métro de Lodz en Pologne...). De plus, Hesus change son identité visuelle qui incarne la dynamique dans laquelle elle est résolument entrée, celle d'un acteur spécialisé dans son domaine et innovant qui met en œuvre sa raison d'être de réduire les émissions de CO2 grâce à l'optimisation logistique, de recycler les terres issues des chantiers, de réduire la consommation des ressources naturelles (granulat...) afin de préserver les écosystèmes et la biodiversité, et enfin de contribuer à faire de la construction un secteur innovant et exemplaire en matière d'économie circulaire.



© Hesus



**Atlas
Fondations**

**STRONG FOUNDATIONS.
SOLID FUTURE.**

Projet de construction ou de rénovation ?
Besoin de fondations ?
Atlas Fondations est là pour imaginer et
réaliser avec vous la meilleure solution de
fondations profondes pour votre projet.



Atlas Fondations

Agence de Paris :
21-37 rue de Stalingrad - 84110 Arcueil
paris@atlasfondations.com - 01 45 36 89 90

Agence Nord :
4 rue Nicolas Appert - 59260 Lezennes
nord@atlasfondations.com - 03 20 57 76 35

www.atlas-fondations.fr



Développement de la formation professionnelle aux métiers du forage pour la géothermie de surface (FPFG)

La loi de transition énergétique annonce le triplement de la production de chaleur par la géothermie d'ici 2028. Une hausse qui impliquerait de multiplier par 4 le nombre d'ateliers de forage estimé actuellement à une centaine en service et d'accroître considérablement le personnel par la formation de 1 000 nouveaux embauchés à cet horizon.

Face à ce constat, l'École française de forage (EFF) et le Greta-CFA Midi-Pyrénées-Ouest* proposent un catalogue de formation tourné vers de nouvelles énergies et plus particulièrement la géothermie. Ce projet de formation professionnelle aux métiers du forage pour la géothermie de surface (FPFG) vise à promouvoir la filière en créant la première certification de la branche géothermie et ainsi répondre aux attentes des industriels en les dotant d'un personnel formé et directement opérationnel pour relever ce défi énergétique.

« Nous voulons permettre aux professionnels d'avoir accès à un personnel qualifié et répondant aux normes actuelles, en mettant en place une formation complète forage eau et géothermie de surface. Nous disposons d'une forte légitimité pour développer une telle offre de formation et souhaitons ainsi participer à la réalisation des objectifs de l'État dans le cadre de la politique énergétique et climatique », explique Gérard Pradeau, Formateur au Greta-CFA Midi-Pyrénées-Ouest.

*Le Greta-CFA Midi-Pyrénées-Ouest est validé depuis le 29 septembre 2022 Organisme Testeur CACES R482 B2 - Engin de sondage ou de forage à déplacement séquentiel avec ou sans l'option « Porte-Engin ».



© Great MPO / EFF Training

Connaissez-vous les pompes à membranes auto-amorçantes CPI série MC ?

Les pompes volumétriques (en photo les modèles CPI MC 2" et CPI MC 3") de chez CPI Salina pour liquides chargés sont polyvalentes dans leurs applications et s'intègrent idéalement dans les process de pompage de boues chargées de chantiers, d'égouts, de tranchées et de stations d'eaux résiduaires.

Elles sont généralement équipées d'un moteur thermique Honda GX160 ou Hatz 1B20 et sont également disponibles avec d'autres moteurs thermiques et en version électrique.

Leur installation sur chariot deux roues leur permet d'être déplacées très facilement !

Avantages :

- hauteur d'amorçage de 6,5 m,
- construction en fonte d'aluminium,
- modèle standard sur châssis deux roues et poignée,
- autres châssis disponibles sur demande.



Inclinomètre vertical robotisé Alarte

Alarte est un système robotisé de mesure d'inclinomètre vertical pour suivre les déformations en profondeur des sols et des structures.

Le système est composé d'une sonde inclinométrique, d'une motorisation et d'un logiciel permettant de faire monter et descendre de façon autonome la sonde de mesures dans un forage.

La sonde cumule des mesures d'inclinaison à l'aide de capteurs accéléromètres MEMS et offre un pas de mesure de 50 cm pour une grande précision et finesse de mesure.



© Sixense

Sa facilité et sa rapidité de mise en œuvre en font le choix parfait pour obtenir rapidement des mesures automatiques à la fréquence voulue et quelle que soit la profondeur de forage.

Alarte convient particulièrement pour l'auscultation des zones de glissements de terrain et de remblais, de

mines et carrières, ainsi qu'au suivi d'ouvrages en profondeur, tels que les barrages, digues, parois moulées, etc.

Alarte combine en un seul produit les avantages de la mesure manuelle et des chaînes automatiques :

- diamètre de tube rainuré : 48-89 mm,
- profondeur de mesure : jusqu'à 100 m (sonde IP68),
- précision de mesure : ± 1 mm pour une longueur de 30 m,
- mesure jusqu'à $\pm 30^\circ$ par rapport à la verticale,
- valise du contrôleur : 45x32x20 cm, protection IP65.

Le système Alarte a été développé en partenariat avec Fehrl, Ferrovia Construction, Mikrosay, Tecnalía et Sixense et est breveté par Tecnalía.

Ce projet a reçu un financement du programme de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation Horizon 2020 dans le cadre de la convention de subvention n° 958701.

De la sondeuse légère, compacte, puissante ou grande profondeur, découvrez notre gamme de foreuses, dénommée Apafor®, adaptée à tous vos besoins en géotechnique, exploration minière, forage d'eau, reconnaissance environnementale, etc...



Norme EN 16228



- Apafor® 50
- Apafor® 100
- Apafor® 220 DMT PORTABLE
- Apafor® 220V
- Apafor® 230
- Apafor® 350
- Apafor® 450
- Apafor® 570
- Apafor® 700
- Apafor® 800

Sondeuse Polyvalente, l'APAFOR® 350 est adaptée pour toutes les méthodes de sondage (forage à la tarière, roto-percussion, roto-injection, carottage conventionnel, PDB/SPT,...) inférieure à 2,7 T pour un transport sur remorque routière, nombreuses options disponibles.



C2ROP se poursuit en C2ROP2

Le projet national C2ROP « Chutes de blocs, risques rocheux et ouvrages de protection » (2015-2021) se poursuit aujourd'hui en C2ROP2 (2022-2026) et propose d'aborder de manière globale et concertée la problématique du risque rocheux depuis les processus de genèse (aléas) jusqu'aux stratégies de protection (parades, gestion du risque).

En effet, ce projet a su rassembler la plupart des éléments de connaissance à ce jour disponibles dans le domaine du risque rocheux, puis développer et transférer vers le monde opérationnel des outils, méthodes et concepts nouveaux en s'appuyant sur l'ensemble des plateformes expérimentales, afin d'améliorer tant les produits que les bonnes pratiques à mettre en œuvre.

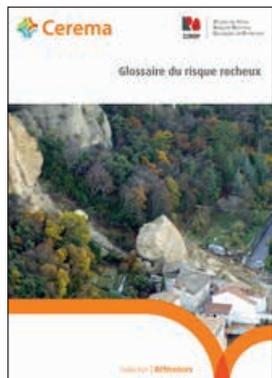
Ces 20 dernières années, des avancées considérables ont été obtenues dans le domaine académique : mécanique appliquée aux géomatériaux et aux structures, modélisation numérique, investigation expérimentale en laboratoire ou *in situ*, analyse de l'aléa et du risque. Ce projet national leur a donné un formidable champ d'application et une source d'inspiration et d'innovation. Les méthodes numériques modernes permettent désormais de modéliser de manière pertinente le comportement de structures complexes sous chargement dynamique. Les puissances de calcul auxquelles on peut accéder aujourd'hui rendent possibles des simulations remarquablement fines, prenant en compte les mécanismes élémentaires fondamentaux, mais ouvrant sur des résultats pertinents pour l'ingénieur. Des installations sur site permettent d'explorer le comportement des ouvrages en vraie. Cette connaissance et ces outils rassemblés par C2ROP sont le socle fondamental du processus de gestion du risque associé.

L'ancrage très fort du projet national auprès de l'ensemble de la communauté académique (universités, organismes publics de recherche, etc.) et opérationnelle (gestionnaires, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'ingénierie, entreprises, etc.) a garanti son exigence et sa crédibilité. Sa capacité à supporter des actions de recherche a permis de lever les principaux verrous et de donner accès à des outils, méthodes, guides et référentiels techniques, attendus par toute la profession et disponibles gratuitement en PDF sur le site du Cerema.

AXE ALÉAS

GLOSSAIRE DU RISQUE ROCHEUX

La terminologie associée à la caractérisation du « risque » rocheux a fait l'objet par le passé de publications reconnues, notamment le guide technique LCPC de 2004 : *Parades contre les instabilités rocheuses*, puis le guide pratique : *Versants rocheux : phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion*, édité en décembre 2014 par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Toutefois, il a été constaté que les termes utilisés par les acteurs du domaine des risques rocheux pouvaient varier selon le type d'utilisateur ou que le sens donné à ces termes pouvait différer.



18

Il est donc apparu indispensable de rappeler, préciser et compléter la terminologie associée au risque rocheux, en tenant compte notamment du retour d'expérience des acteurs et du changement progressif de paradigme (vers une gestion des risques plutôt qu'une protection contre les aléas).

Le présent document se veut un « outil métier » ; il comprend donc des définitions « type dictionnaire », enrichies d'explications plus pratiques. Ce glossaire a vocation à être largement diffusé et à être appliqué par l'ensemble des acteurs du domaine des risques rocheux.

CARACTÉRISATION DE L'ALÉA ÉBOULEMENT ROCHEUX : ÉTAT DE L'ART

Ce document présente différentes méthodes pouvant être utilisées pour caractériser l'aléa éboulement en termes d'intensité (énergie ou volume) et de fréquence (fréquence temporelle ou probabilité d'occurrence), afin de permettre ensuite une analyse du risque. Les recommandations internationales et quelques recommandations nationales concernant les mouvements de pente en général (landslides) sont d'abord évoquées. Puis le cadre théorique permettant de caractériser l'aléa

rocheux et le risque associé est exposé en définissant quantitativement les différentes notions utilisées. Différentes méthodes quantitatives ou qualitatives sont ensuite présentées, pour caractériser d'abord les aléas diffus (approche globale à l'échelle d'un versant rocheux homogène), puis les aléas localisés (approche par compartiment rocheux potentiellement instable).

AXE PARADES

MERLONS PARE-BLOCS : RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION, LE SUIVI DE RÉALISATION ET LA MAINTENANCE

Alors que plusieurs centaines de dispositifs de protection par merlon ont été construits en France depuis le milieu du 20^e siècle, ce document propose les premières recommandations pour leur conception, leur dimensionnement, leur réalisation et leur exploitation. Elles sont issues du retour d'expérience des membres du collectif de rédaction. Elles devront être améliorées pour ce qui concerne notamment l'utilisation des données issues des simulations trajectographiques, le détail du dimensionnement sous sollicitation dynamique (définition et quantification des actions, combinaisons d'actions, coefficients de sécurité...), et les opérations de réparation et de réhabilitation. Un élargissement des retours d'expérience permettra de partager d'autres pistes de préconisations et recommandations. Un complément et une évolution de ces recommandations sont prévus dans le cadre de C2ROP2 pour aboutir à un guide technique.

LES OUVRAGES DÉFLECTEURS : GUIDE TECHNIQUE

Les déflecteurs sont des équipements souples permettant de canaliser des éléments rocheux entre le terrain et l'ouvrage, sur tout ou partie de leur propagation. L'objectif principal est de maîtriser la trajectoire des blocs lors de leur passage au sein de l'ouvrage sans nécessairement les arrêter. Composés principalement de nappes de grillage ou de filet dont les rives sont amarrées au terrain par diverses structures de liaison, ils peuvent être équipés d'un système

avoir en tête afin de capter les trajectoires des blocs arrivant de l'amont. Après avoir donné les définitions des types d'ouvrages, des sous-ensembles et des principaux composants, ce guide établit les principes généraux pour la conception, le dimensionnement, la mise en œuvre, le suivi et les contrôles d'exécution de ces ouvrages ainsi que pour leur maintenance.

AXE RISQUE

PRISE EN COMPTE DES RISQUES

ROCHEUX PAR LES MAÎTRES D'OUVRAGE GESTIONNAIRES D'INFRASTRUCTURES : RECOMMANDATIONS

Ces recommandations sont un document-cadre exposant les principes directeurs de la gestion des risques rocheux pour les maîtres d'ouvrage gestionnaires d'infrastructure. Il ne s'agit pas au sens propre d'un « guide méthodologique », mais plutôt d'une note générique synthétique, formulant

des recommandations générales, avec renvoi à des annexes pour approfondir certains points méthodologiques ou techniques. À visée opérationnelle, tout en étant vulgarisé, il s'adresse avant tout à des professionnels qui ne connaissent pas encore bien le domaine. Ce document-cadre propose une vision plutôt technique que juridique des problématiques de la gestion des risques rocheux ; il peut comporter des incomplétudes et des imprécisions, et pourra

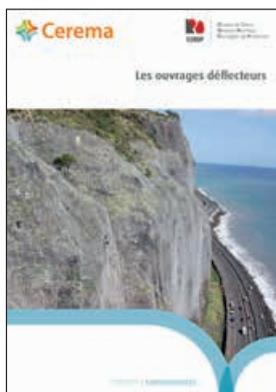
être enrichi dans des mises à jour à venir.

CCTP TYPE POUR L'ÉTUDE DE L'ALÉA ÉBOULEMENT ROCHEUX ET LA DÉFINITION DES TRAVAUX

Ce document propose aux maîtres d'ouvrage – particulièrement ceux ne disposant pas de services spécialisés dans le domaine du risque rocheux – un cahier des charges type pour

lancer des études d'aléa concernant les éboulements rocheux, allant jusqu'à la définition des solutions de parade et le suivi d'exécution des travaux. Il est particulièrement adapté aux études sur enjeux de type infrastructure linéaire (route, autoroute, voie ferrée, sentier de randonnée à enjeu, etc.) ; il peut être adapté, en tant que de besoin, à l'étude d'autres types d'enjeux (notamment bâtis). Il s'agit d'une trame minimale qui peut être amendée. Il est pour cela

accompagné d'une notice de rédaction qui apporte des recommandations pour l'élaboration du cahier des clauses techniques particulières et illustre les paragraphes types par des exemples tirés de cas pratiques.



CAJ TRAVAUX SPECIAUX

VENTE ET RÉPARATION DE MATÉRIELS
ET MACHINES DE FORAGE, INJECTION
ET BÉTON PROJETÉ

DISTRIBUTEUR EXCLUSIF



arnabat s.a



Ripamonti



terra
infrastructure



tecniwell



GERTEC
Maschinen- und Anlagenbau GmbH



16, chemin de la Zone Artisanale
01310 CURTAFOND

Tél : 04 74 47 01 74
Fax : 04 74 23 13 56

contact@caj-travauxspeciaux.com
WWW.CAJ-TRAVAUXSPECIAUX.COM

CCTP TYPE POUR LES TRAVAUX DE PROTECTION CONTRE LES ÉBOULEMENTS ROCHEUX

Ce CCTP type est plutôt orienté vers la protection des infrastructures routières ; pour d'autres types de marchés de travaux, des adaptations devront être envisagées. Ce document ne traite pas de l'ensemble des travaux de protection contre les chutes de blocs, mais aborde l'essentiel des dispositions de protection. Il s'agit d'une trame minimale qui doit être amendée. Chaque paragraphe est suivi de conseil et d'exemples de rédaction.

Mémento des ouvrages de protection contre les éboulements rocheux : maintenance et coûts

Ce mémento est complémentaire à l'ensemble des guides techniques existants sur le sujet et rappelés dans la bibliographie. Tout en s'appuyant sur ces guides il présente les avancées, progrès, évolutions du domaine pour chaque type ouvrage. Il s'adresse aux maîtres d'ouvrages désireux de trouver dans un document unique l'ensemble des informations techniques, réglementaires, financières... essentielles sur un

ouvrage utilisé pour la protection contre les chutes de blocs. Le maître d'ouvrage trouvera dans ce guide des éléments de réponses et des pistes de réflexion sur la problématique de la maintenance des ouvrages de protection contre les chutes de blocs, lui permettant d'engager ou d'améliorer sa propre réflexion. Ce mémento a été rédigé par des maîtres d'ouvrage pour permettre à d'autres maîtres d'ouvrage de s'initier à ce domaine et ainsi développer une vision commune.



Aide à la formalisation de retours d'expérience à la suite d'un événement rocheux sur infrastructures de transport : outil pratique et note méthodologique

L'outil de formalisation des REX a été élaboré à la demande de maîtres d'ouvrage, soucieux de disposer d'outils pratiques. Élaboré par un groupe de travail rassemblant des représentants de gestionnaires d'infrastructures linéaires confrontés au risque rocheux, des organismes scientifiques et des bureaux d'études, cet outil pratique permet de produire des REX plus ou moins détaillés en fonction de la gravité, en termes de conséquences, d'un événement. Cet outil permet de produire des fiches de REX « standardisées » suite à événements, produire un catalogue de REX et capitaliser les REX en mettant à profit les enseignements tirés de chacun d'eux.

Cette production technique conséquente et aboutie est le reflet de près de 5 années de travail collaboratif des 45 partenaires du projet. Qu'ils soient ici tous chaleureusement remerciés pour leurs multiples efforts engagés et leur dynamisme. ■

Muriel Gasc

Vice-présidente du CFMR

Cerema Méditerranée

Équipe de recherche Geocod



L'entreprise TSM a été créée en mars 2019 dans le cadre du Rachat du Pôle Confortement de l'entreprise SOFITER.

L'ensemble du personnel, du matériel et des infrastructures ayant été repris, nous disposons toujours d'une expérience semblable et d'une qualité de travail équivalente à celle des 24 premières années d'existence de la société.

Nous sommes spécialisés dans les soutènements (Paroi clouée et paroi berlinoise forée) et les fondations spéciales (Micropieux), nous intervenons sur tout le quart Sud Est de la France : Régions AURA et PACA.



Coordonnées : contact@tsm-str.com - 04 74 36 22 17
Adresse : ZA du Moulin à Papier - 01230 Saint-Rambert-en-Bugey



GROUPE

GÉOTEC

ENSEMBLE, CONCEVONS UN AVENIR DURABLE

NOS SAVOIR-FAIRE

AU SERVICE DE VOS PROJETS



Géotechnique



Environnement



Maritime



Diagnostic
Structure



Risques Naturels



Géothermie



Géophysique

L'apport du S-CPTu (*Seismic Cone Penetration Test*) dans les études géotechniques en contexte sismique

La prise en compte du risque sismique est une étape primordiale dans la préservation des ouvrages et des vies humaines. Lors des séismes, le type de sol et son comportement ont un rôle majeur pour la prise en compte de ce risque. Le géotechnicien est donc un acteur-clé pour la détermination des paramètres de la réponse du sol aux séismes, la conception des ouvrages, la détermination des aléas et l'étude du comportement du sol sous ce type de sollicitations.

Sur un site donné, les charges sismiques définies pour le dimensionnement d'un ouvrage sont déterminées lors de la conception.

Elles dépendent pour l'essentiel :

- du type d'ouvrage concerné (classé selon la fréquentation estimée par le public, ou selon son rôle dans la chaîne des secours après une catastrophe sismique, comme un hôpital),
- de la nature du sol (les sols mous et épais, avec une vitesse caractéristique V_s faible, étant nettement plus défavorables).

Selon les règles parasismiques en vigueur, le devis du géotechnicien devra permettre de déterminer le module de cisaillement G et la vitesse des ondes de cisaillement V_s .

Plusieurs techniques sont à sa disposition :

LES TECHNIQUES COURANTES : LES ESSAIS IN SITU

Cette première famille d'outil fournit une caractérisation plus ou moins précise de la nature géologique des sols, ainsi que leur caractérisation géomécanique :

- SPT : *Standard Penetration Test*,
- CPT/CPTu : *Cone Penetration Test*,
- essai pressiométrique.

Dans cette famille, l'essai CPT se distingue par la fourniture de la résistance du sol de manière continue, ainsi que par la caractérisation de la nature du sol avec R_f (%). Cet essai permet d'évaluer le potentiel de liquéfaction des formations sableuses, notamment via l'utilisation de la méthode NCEER.

LES INVESTIGATIONS GÉOPHYSIQUES

La deuxième famille concerne les mesures géophysiques : elles possèdent toutes la particularité de générer un front d'ondes entre une source émettrice et un récepteur. Un séisme

correspond à une libération d'énergie accumulée, énergie qui se propage dans le sol via un train d'ondes multidirectionnel. Cette deuxième famille s'approche de ce phénomène.

Elles permettent, selon l'Eurocode 8, de classer les sols selon les paramètres $V_{s,30}$, qui est la moyenne harmonique des vitesses des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres de sol.

- Essai cross-hole : essai très complet nécessitant plusieurs forages avec un temps de cimentation, puis un temps de mesure ; cet essai complet permet d'appréhender les ondes P et S et également de réaliser un prélèvement de sol pour des essais en laboratoire (essai triaxial cyclique) ;

- MASW, d'un coût plus modeste, faisant intervenir les ondes de surface (R et L) ;

- essai up-hole : l'onde est produite par un marteau descendu dans un forage, le récepteur étant à la surface ;

- essai down-hole : pour ce dernier, l'émetteur est en surface, et le capteur en profondeur.

Ces techniques ne sont parfois pas utilisées pour mesurer $V_{s,30}$ et à la place une corrélation (basée sur les paramètres de sol disponibles) est utilisée pour la détermination de $V_{s,30}$.

LE S-CPTu COMBINE CES DEUX ASPECTS

La technique du SCPT permet une combinaison de ces deux familles de mesures : elle combine simultanément la prise de mesure de l'essai CPTu selon la norme NF EN 22476-1 et la technique du Downhole Seismic Test (DST).

Un récepteur sismique est positionné au-dessus de la pointe CPTu ; ce récepteur est peu à peu descendu pendant les opérations de forage ; il est d'un diamètre légèrement supérieur à la pointe CPT et est donc ainsi plaqué contre les formations à caractériser.

L'ensemble des paramètres du CPTu et la réception des signaux sismiques

passent par un câble dédié et protégé à l'intérieur des tiges de forage.



Boîtier de dérivation pour la séparation des informations sismiques (et des informations liées au cône électrique : q_c , f_s , $IncX$, $IncY$, u_2).

Dans la cabine, une boîte dérivation sépare les informations du CPTu et ceux du tir sismique.

La source sismique est le composé des deux éléments suivants :

- une plaque de métal calée sous les vérins stabilisateurs du Camion CPT. Cette plaque est rainurée afin d'assurer un meilleur contact avec le sol. Une cale caoutchouc isole la plaque métallique du reste du vérin stabilisateur ;
- un marteau métallique permet la frappe sur cette plaque.

Cette source sismique permet de générer des ondes de cisaillement.

L'ACQUISITION DES DONNÉES SUR LE TERRAIN

À intervalle régulier en profondeur (tous les 0, 5 m ou 1 m), l'essai CPT est arrêté et un tir est généré en surface. Le choc du marteau métal contre le métal de plaque ferme le circuit et déclenche le t_0 du tir sismique. Le train d'ondes généré est enregistré par le récepteur sismique en profondeur.

Les tirs se font à gauche et à droite de l'atelier CPT pour une même profondeur ; les tirs peuvent être empilés (« stack »), c'est-à-dire que l'on enregistre plusieurs frappes à la même profondeur de manière à additionner les différents trains d'ondes ; cela permet

de mieux faire ressortir le train d'ondes arrivant sur le récepteur et de s'affranchir des bruits parasites aléatoires.

Néanmoins, en cas de bruits parasites continus, on enregistrera plusieurs tirs dans des fichiers séparés sans les empiler afin de garder l'information brute du tir sismique. En effet, en cas d'accumulations des tirs dans un même fichier, le bruit parasite risque de masquer l'information du tir sismique.

Il est tout à fait possible également d'empiler les trains d'ondes en post-analyse ; par contre, il est impossible de dépiler des signaux afin de retrouver le signal original.

À noter que les tirs sont générés de part et d'autre du camion CPT, pour chaque profondeur.

LE TRAITEMENT POST-ACQUISITION

Chaque signal (ou groupe de signaux accumulés) acquis permettra d'obtenir les caractérisations de la trace sismique. Les temps d'arrivées sont pointés, puis les intervalles de vitesse entre chaque profondeur de tir sont calculés.

Le trajet des ondes sismiques n'est pas forcément une ligne droite entre l'émetteur et le récepteur (loi de Snell-Descartes). Chaque changement de terrain impacte ce trajet d'onde et les vitesses calculées présentent une incertitude ; c'est pour cela que deux éléments de la méthode SCPTu sont importants :

- réalisation des tirs de part et d'autre du Camion CPT : cela permet d'avoir des trains d'ondes indépendants les uns des autres pour une même profondeur. En calculant la moyenne, un intervalle de confiance est déterminé, ce qui renseigne sur la qualité de la mesure de $V_{s,30}$

- l'obtention d'un modèle géologique de terrain précis avec les mesures du CPTu, et l'utilisation de la méthode d'inversion sismique.

LES AVANTAGES

Cette technique est transposable dans n'importe quel atelier CPT. Elle est quasiment aussi rapide que la réalisation qu'un CPTu classique.

La rapidité d'exécution des SCPTu permet de multiplier les mesures sur un site avec une prise en compte de l'hétérogénéité du sous-sol du site investigué.

LES LIMITES DE CETTE TECHNIQUE

Cette technique ne peut être envisagée que dans les formations où un CPT est réalisable ; elle dépend notamment :



- accessibilité des Porteurs CPT (de 18t à plus de 22t)

- refus au sens de la norme NF EN 22476-1. On notera que l'on peut par la suite passer en frappe avec une fausse pointe pour descendre le récepteur sismique dans certaines formations.

CONCLUSION

Le SCPTu est un outil très efficace, permettant de fournir les valeurs mesurées de la vitesse des ondes de cisaillement V_s , sans apport d'un autre matériel que celui qui est prévu pour évaluer les résistances statiques des sols et leurs déformations dans le cadre des missions géotechniques G2, notamment.

Le SCPTu permettra de définir avec précision le type de sol avec les mesures des ondes de cisaillement sur 30 m (V_{s30}), dans un contexte où le CPT sera déjà indispensable pour évaluer les caractéristiques mécaniques des sols fins et pour évaluer le risque de liquéfaction.

Outre cette double évaluation du risque de liquéfaction toujours rassurante pour des méthodes empiriques (q_c/R_f d'une part et V_s d'autre part), des traitements de sols (renforcement avec inclusions, ou drainages par exemple) peuvent être dimensionnés pour améliorer la résistance sismique des sols, afin soit de sortir du risque de liquéfaction, soit d'améliorer la classe du sol ; le CPT étant très souvent déjà programmé sur ce type de site, pour diminuer les tassements (contexte hors sismique).

Le SCPTu a aussi l'avantage de pouvoir intervenir après la réalisation d'un renforcement, afin de contrôler que le gain estimé sur les valeurs sismiques est réel. ■

Patrice Desourtheau, responsable investigations in situ

Vincent Perset, directeur projet DIG, Ginger CEBTP



Axel Travaux
GROUPE POISSON

**Génie Civil, Fondations,
Travaux Publics & VRD**



☞ Prestations de génie civil sur tous types de projets : reprises en sous-œuvre, dalles et dallages en béton armé, murs de soutènement, etc.



☞ Spécialisation en fondations : poutre de couronnement, murettes-guide pour paroi moulée et pieux sécants, dalles pour silos et dallages, etc.



Équipe de
25 personnes qualifiées



France & Pays
limitrophes



Plus de 25 ans
d'expérience

axeltravaux@groupepoisson.com

01 64 42 59 56

www.groupepoisson.com

Le couplage CPT-OIP pour l'évaluation des sols pollués

En France, plus de 320 000 sites sont potentiellement pollués (Basias, 2020), dont 60 % environ seraient impactés par des composés organiques non miscibles à l'eau, tels que les hydrocarbures pétroliers ou les dérivés halogénés. Ces sites génèrent des risques potentiels pour la santé des populations et pour l'écosystème à travers les processus de transfert des polluants vers les différents milieux d'exposition (principalement air et eau souterraine). Dans certains cas, leur dépollution est nécessaire, que ce soit pour répondre aux enjeux environnementaux de qualité des milieux ou de risques sanitaires. Explication avec l'équipe de la direction Recherche & Développement de Ginger CEBTP.

Dès lors, la question de la délimitation des zones polluées et des volumes de sols /masses de polluants concernés est fondamentale tout au long du processus de gestion des sites pollués, depuis le diagnostic jusqu'à la réception des travaux de dépollution. Généralement, ces informations sont déduites des résultats d'analyses en laboratoire effectuées sur des prélèvements de sol en forage, ce qui engendre des délais de réalisation et des coûts importants. Dans ce contexte, les sondes d'analyses *in situ* (type OIP) apportent des informations sur la localisation de la pollution et sur les propriétés pétrophysiques du milieu, qui ont l'avantage d'être accessibles directement sur site pour un budget relativement limité.

La sonde OIP (marque Geoprobe) utilisée par les équipes du pôle sondage de Ginger CEBTP est montée sur un atelier CPT de type Geomil dans un camion track-truck faisant office de camion-laboratoire. Développée pour la détection de coupes pétrolières de type de carburant et huile légère, elle est donc bien adaptée pour la majorité des coupes pétrolières rencontrées sur les sites pollués par des hydrocarbures pétroliers (raffineries, stations-service, aéroports...). La sonde (longueur 50 cm, diamètre 44 mm) peut pénétrer dans le sol par fonçage dans les terrains plutôt meubles (sables, limons) avec une vitesse d'avancée régulière entre 0,5 et 2 cm/s selon les terrains, soit plus de 50 m linéaires par jour dans des conditions favorables. Un dispositif de percussion hydraulique (CPT stato-dynamique) permet également de traverser les zones plus compactes (graves...).

La sonde est équipée de deux sources lumineuses qui émettent de la lumière UV ou visible, capturée par une caméra CMOS qui renvoie les images (9,5 mm x 7,0 mm) vers l'instrumentation. L'identification des zones de sols pollués sous forme de NAPL (*Non Aqueous Phase Liquid*) est basée sur les propriétés des hydrocarbures aromatiques

polycycliques (HAP) qui deviennent fluorescents lorsqu'ils sont éclairés par une source UV (figure 1).

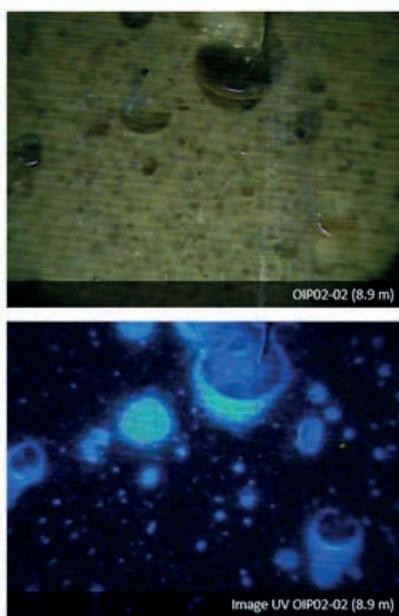


Figure 1 : Images visibles et UV illustrant la présence d'hydrocarbures présents dans les pores de la zone saturée issues de la sonde OIP.

Ainsi, chaque image UV est analysée en vue de produire un profil de fluorescence (figure 2) avec un pas d'échantillonnage très fin (1,5 cm). Le pourcentage de fluorescence calculé de manière automatique par le logiciel DI Viewer développé par Geoprobe correspond au total des pixels qui montrent une réponse à la source lumineuse sur le total des pixels de l'image.

Ainsi, plus le taux de fluorescence est élevé, plus le milieu investigué est impacté. Notons qu'en parallèle la visualisation des terrains en lumière visible à l'aide de la caméra et le profil de conductivité électrique mesurée apportent des compléments d'information utiles pour la définition des caractéristiques des sols et des successions lithologiques rencontrés.

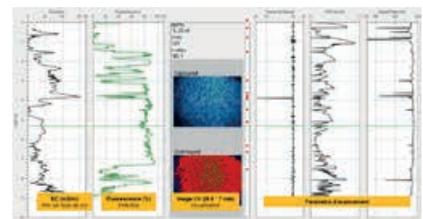


Figure 2 : Profils des paramètres mesurés (logiciels Di Viewer, Geoprobe) par la sonde OIP avec de gauche à droite : la conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$), le taux de fluorescence (%), les images en lumière naturelle (haut) et filtrée (bas), le nombre d'images par seconde, la vitesse d'avancement de l'outil ROP (m/min), le pouvoir optique (mA).

Lorsqu'on doit réaliser un diagnostic sur un site potentiellement pollué, la première étape consiste à établir le programme d'échantillonnage dont l'objectif est d'identifier les zones impactées et de fournir les caractéristiques de la pollution. Se pose donc la question de la position et du nombre de sondages, ainsi que la quantité et de la localisation des échantillons à analyser en laboratoire. Il convient alors d'établir un programme qui soit suffisamment dense pour être précis et représentatif de la pollution tout en restant dans un budget acceptable compte tenu des enjeux de l'étude.

Des travaux de recherche récents (projets Geocare⁽¹⁾ et Sosie⁽²⁾) ont comparé le profil de fluorescence mesurée par une sonde OIP avec les concentrations en polluants issues des analyses de sols en laboratoire traduites en saturations en NAPL à l'aide du logiciel Oreos⁽³⁾. Bien que le taux de fluorescence n'ait pu être bien corrélé avec les concentrations en polluant dans les sols ou les saturations en NAPL, les résultats obtenus ont montré que la sonde OIP détecte la présence de polluant sous forme de NAPL à partir d'une concentration en HAP de quelques mg/kg seulement (figure 3). Ainsi, la mise en œuvre de l'outil a permis d'identifier de manière précise les zones de sols pollués sur

chaque sondage, notamment les zones peu étendues situées à proximité de la surface qui peuvent occasionner des impacts significatifs sur la qualité de l'air intérieur et qui sont parfois difficilement visibles à partir des échantillons de sol, où l'information est moyennée sur une épaisseur plus ou moins importante.

Par ailleurs, les résultats ont permis de caractériser les limites extrêmes de migration du NAPL dans la zone de battement de nappe (*limite historique haute et basse, figure 3*) sur un site complexe présentant plusieurs sources de pollution dans des conditions hydrodynamiques très variables, associées aux effets de marée, aux variations saisonnières et aux pompages situés à

proximité. La connaissance des niveaux pollués par des hydrocarbures sous forme de NAPL à partir de quelques sondages OIP s'est avérée beaucoup plus fiable que celle déduite du suivi des niveaux de nappe réalisé sur une période 2 ans. Ce qui a permis d'établir un programme d'investigation mieux ciblé et une meilleure anticipation des moyens de traitement à mettre en œuvre pour la dépollution de la zone étudiée. Enfin, la combinaison des profils de fluorescence mesurés sur l'ensemble des sondages a permis de restreindre le périmètre d'investigation en latéral et d'optimiser ainsi le programme d'investigation de sondages/analyses de sols, ce qui a contribué *in fine* à améliorer la précision du diagnostic et les coûts associés. ■

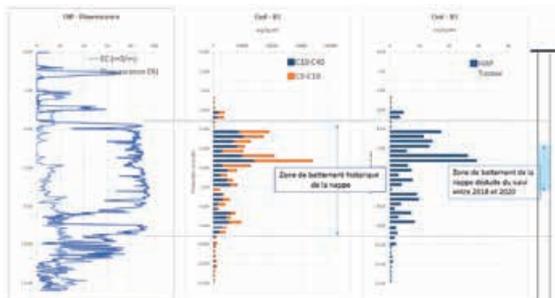


Figure 3 : Profils de fluorescence et de conductivité électrique (EC) comparés aux concentrations en polluants dans les sols issues des analyses en laboratoire sur les prélèvements de sol.

Justin Barré, direction Recherche & Développement, Ginger

David Pitaval, direction Recherche & Développement, Ginger

Jean-Marie Côme, direction Recherche & Développement, Ginger

Patrice Desourthaux
Pôle sondage, Ginger

Jean-Paul Mourier
Pôle sondage, Ginger

1. **Projet GEOCARE** : Développement des méthodes GÉophysiques pour la CARactérisation et la REhabilitation des sites contaminés – Résumé public (mai 2017 – février 2021). Jean-Marie Côme (Ginger Burgeap), Théo Declercq (Valgo/M2C - Morphodynamique Continentale et Côtière), Abderrahim Jardani (M2C - Morphodynamique Continentale et Côtière), Jean-Paul Mourier (Ginger CEBTP), David Pitaval (Ginger Burgeap), Laurent Thannberger (coordination Valgo). Financement : Région Normandie

2. **Projet SOSIE** : Estimation de la saturation en NAPL (SO - oil saturation), impact de la Saturation Initiale et de l'historique sur les saturations résiduelles - Sols pollués par des hydrocarbures pétroliers dans la zone de battement de nappe. I2M, IMFT, Eurofins, Ginger CEBTP, Ginger Burgeap. Co-financement Ademe, 2016-2022

3. **OREOS** : Outil de calcul de la Répartition de la phase Organique dans les Sols (Ginger Burgeap). <https://www.oreos-software.com/>

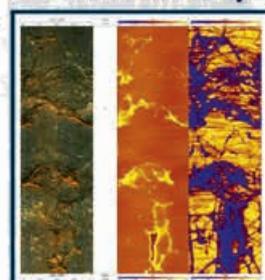
MESURES PENDANT & APRES LE FORAGE

Pressiomètres, Enregistreurs de paramètres
Matériels de diagraphies



Pressiomètres manuel et automatique

Televiewers optique et acoustique - Diagraphies



Enregistreurs de paramètres de forage
Transmission et traitement des données dans
le cloud.

www.lim.eu

Deuxième génération de l'Eurocode 7

La mise en place de la deuxième génération des Eurocodes va aboutir d'ici deux ans à la finalisation d'un nouvel Eurocode 7. En 2027, avec la mise à jour des normes d'application nationale de l'Eurocode 7, un nouvel ensemble de normes de dimensionnement géotechnique sera alors disponible. Les dernières discussions sont encore en cours, mais il est d'ores et déjà possible de dresser un bilan des modifications qui ont été introduites et de leurs implications dans la pratique quotidienne sur le calcul géotechnique et les vérifications à réaliser.

Depuis 2011, pour la mise en place de la deuxième génération des Eurocodes, dont le pilotage est assuré par le comité technique 250 (TC250) du CEN (Comité européen de normalisation), différents travaux ont été entrepris au niveau européen au sein du sous-comité SC7 en charge de l'Eurocode 7 (CEN/TC250-SC7). À l'automne 2022 se tiendra l'enquête formelle. Le nouvel Eurocode sera disponible à l'issue du vote formel prévu au printemps 2024, mais il ne deviendra pleinement applicable en France qu'à partir de 2027 après la publication des annexes nationales et des normes d'application nationale. Il s'agit ici de décrire les principales étapes de ce travail puis de présenter les principaux changements mis en avant avec, désormais, un Eurocode 7 structuré en trois parties comprenant plus de détails, en vue de son utilisation quotidienne.

Ces modifications de l'Eurocode 7 vont aussi obliger à réviser l'ensemble des normes d'application nationale qui s'y réfèrent pour permettre, en 2028, l'utilisation de ce nouvel ensemble normatif. Bien que le délai paraisse long, de nombreux travaux doivent encore être lancés pour disposer d'un ensemble cohérent de documents nationaux avec des enjeux significatifs pour la profession : l'intégration de la mécanique des roches dans le format de vérification des Eurocodes, la juxtaposition d'un modèle de terrain et d'un modèle de dimensionnement géotechnique, l'utilisation de modèles numériques, la compatibilité du dimensionnement des pieux et des inclusions rigides, etc.

LES GRANDES PHASES DE DÉVELOPPEMENT DU NOUVEL EUROCODE 7

Comme les autres Eurocodes, les travaux de révision de l'Eurocode 7 vont toucher à leur fin d'ici 2 ans pour aboutir à la mise en place de la seconde génération d'Eurocodes à partir de 2027. Débutés il y a environ 10 ans au sein du sous-comité SC7, ces travaux ont pour objectif d'harmoniser les pratiques des différents pays européens en ce qui concerne le dimensionnement géotechnique et d'incorporer un certain nombre d'éléments permettant de faciliter le dimensionnement géotechnique avec l'Eurocode 7.

Pour ce dernier, les travaux de révision vont comprendre, à terme, quatre grandes phases.

Une première phase s'est tenue entre 2011 à 2015 et a consisté à mettre en évidence les éventuelles améliorations à apporter à la première génération d'Eurocode 7 sur la base de réflexions préliminaires au sein de différents groupes d'évolutions qui ont abordé des sujets extrêmement variés : les ancrages, les méthodes simplifiées, les méthodes numériques, les sols renforcés, le calcul sismique, les fondations profondes, l'harmonisation des justifications, les pressions d'eau, les modèles de calculs, les valeurs caractéristiques, les tunnels, la mécanique des roches, l'amélioration des terrains, etc. Ces groupes d'évolutions ont permis de formaliser les feuilles de route des 6 groupes de rédaction qui allaient être constitués. Ces groupes de rédaction comprenant de 5 à 6 personnes ont rédigé entre 2015 et 2021 le nouvel Eurocode 7 comprenant désormais 3 parties dont le contenu sera présenté et analysé ci-après.

Une troisième phase de 2021 à 2022 a permis de procéder à un certain nombre de modifications dans la perspective de l'enquête formelle et du vote formel qui constitueront la dernière phase des travaux entre 2022 et 2024.

En parallèle de ces travaux menés au niveau européen, la CNJOG (Commission de normalisation de justification des ouvrages géotechniques – groupe miroir français de l'Eurocode 7) – en partenariat avec la commission P06E (commission française de coordination des Eurocodes) a commenté au fur et à mesure de leur rédaction les différents documents élaborés à l'échelon européen. Les interactions entre l'Eurocode 0 et l'Eurocode 7 ont fait l'objet de nombreuses discussions, en particulier sur les approches permettant la définition des actions dues aux nappes d'eau souterraines. Les conclusions au niveau européen ont permis de retenir des approches qui sont très proches de celles déjà utilisées en France : les actions dues aux nappes souterraines, malgré leur caractère évidemment variable, sont considérées comme des actions permanentes et leur caractère variable est pris en compte en définissant des niveaux correspondant à différentes périodes de retour. Le format de sécurité pour les résistances géotechniques a abouti à une simplification avec uniquement deux approches : l'une aboutissant à pondérer les résistances globales (RFA « *Resistance Factor Approach* ») et l'autre aboutissant à pondérer les propriétés de résistance au cisaillement drainé ou non drainé (MFA « *Material Factor Approach* »). Ces discussions ont permis une meilleure intégration du dimensionnement géotechnique dans le dimensionnement des structures, avec symboliquement, une modification du titre de l'Eurocode 0 qui inclut désormais explicitement le terme « *géotechnique* » : « *Basis of structural and geotechnical design* ». La figure 1 illustre la correspondance entre les anciennes approches de calcul et le nouveau format de justification incluant les différents cas de vérification prévus par l'Eurocode 0.

Cas de vérification EN 1990		Etats limites ultimes géotechniques			Vérification spécifiques: - Contraintes effectives - Gradient hydraulique
		Rupture et déformation excessive	Equilibre statique et soulèvement	Rupture hydraulique	
VC1	$\gamma_0 > \gamma_0 > 1.0$	X (DA1-1)	X (DA2)		
VC2	$\gamma_0 > \gamma_0 > 1.0$ $\gamma_0 = 1.0 ; \gamma_0 > 1.0$			X	
VC3	$\gamma_0 = 1.0 ; \gamma_0 > 1.0$	X (DA1-2 ou DA3)			
VC4 (EFA)	$\gamma_0 > 1.0 ; \gamma_0 > 1.0$		X (DA2*)		

DA : Ancienne Approche de Calcul
EFA : Application des facteurs partiels sur les effets des actions

Figure 1 : Correspondance entre le nouveau format vérification et les anciennes approches de calcul.

LE CONTENU DU NOUVEL EUROCODE 7

Le nouvel Eurocode 7 comprend désormais 3 parties :

- partie 1 : règles générales
- partie 2 : propriétés des terrains
- partie 3 : ouvrages géotechniques

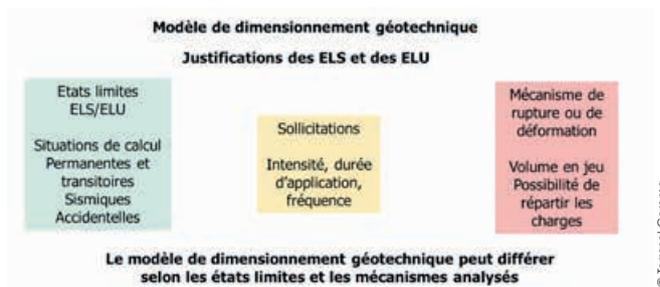
PARTIE 1 : RÈGLES GÉNÉRALES

La partie 1 traite sur le même plan les sols et les roches en vue de pouvoir dimensionner des ouvrages géotechniques, quel que soit le contexte géotechnique. Les principaux points discutés pour l'intégration de la mécanique des roches ont concerné les propriétés spécifiques des massifs rocheux, les incertitudes de ces propriétés au regard de celles usuellement rencontrées dans les sols, le traitement des discontinuités comme propriétés géométriques ou géotechniques, l'utilisation de la méthode observationnelle et enfin le développement, pour certains ouvrages géotechniques, de méthodes spécifiques à la mécanique des roches.

Le concept de catégorie géotechnique est désormais relié à la classe de conséquence de l'ouvrage projeté selon les recommandations de l'Eurocode 0 et à la classe de complexité géotechnique qui traduit le fait, d'une part, que les terrains en place peuvent avoir des structures et des comportements plus ou moins difficiles à modéliser, et, d'autre part, que les ouvrages géotechniques peuvent interagir avec les terrains de manière plus ou moins complexe. Ces catégories géotechniques ont peu d'effets en France dans la mesure où les niveaux de sécurité, les niveaux de contrôles, etc. n'y sont pas corrélés directement, ce qui n'est pas le cas dans tous les pays européens.

Les valeurs dérivées (par exemple, le module pressiométrique, la pression limite nette, etc.) et les valeurs représentatives (par exemple, le module d'Young, etc.) des propriétés des terrains sont très clairement distinguées, car elles sont associées respectivement au modèle de terrain et au modèle de dimensionnement géotechnique. Le modèle de terrain correspond au livrable principal du rapport d'investigations géotechniques

(GIR : Ground Investigation Report). Le modèle de dimensionnement géotechnique est la base du dimensionnement géotechnique, car les valeurs représentatives sont les hypothèses d'entrée des calculs géotechniques. Ces valeurs représentatives doivent tenir compte de la situation de calcul analysée, du type d'actions (charges permanentes, variables, accidentelles ou sismiques) et des mécanismes de rupture et de déformation mis en jeu. En pratique, s'agissant du module d'Young d'un sol, pour une situation de calcul donnée, l'usage est alors de définir celui-ci essentiellement selon la nature du sol (argileux ou sableux), le niveau de déformation attendu, la direction du chargement en tenant compte de son amplitude, son occurrence et de sa fréquence.



Principes de construction du modèle de dimensionnement géotechnique.

Les valeurs représentatives sont déterminées selon un double cheminement : l'un, basé sur le jugement de l'ingénieur compte tenu des données et de l'expérience disponibles, et l'autre, basé sur un traitement statistique des données lorsque celles-ci sont en nombre suffisant. Le premier cheminement aboutit à ●●●

enka solutions

ENKAMAT® A20
UNE PROTECTION VÉGÉTALISÉE PERMANENTE DES DIGUES
AVEC UNE RÉSISTANCE NATURELLE DES VÉGÉTAUX ACCRUE
www.enkasolutions.com

FREUDENBERG
PERFORMANCE MATERIALS

FREUDENBERG
INNOVATING TOGETHER

une valeur qualifiée de nominale, tandis que le second aboutit à une valeur qualifiée de caractéristique. Ces deux valeurs sont équivalentes, et l'une ou l'autre valeur peut être déterminée selon le contexte : c'est au géotechnicien de statuer sur la base de son jugement d'ingénieur.

Les vérifications hydrauliques ont fait l'objet d'une nouvelle présentation en distinguant d'une part les phénomènes induits par la poussée d'Archimède, et d'autre part ceux provoqués par l'écoulement de l'eau dans le terrain. Ce dernier induit deux effets bien distincts :

- une diminution de la contrainte effective qui doit être maîtrisée et rester suffisamment faible de manière à pouvoir mobiliser la résistance au cisaillement nécessaire pour assurer l'équilibre ;
- l'apparition de gradients hydrauliques qui doivent demeurer suffisamment faibles pour ne pas mettre en mouvement les particules de sol (phénomènes d'érosions internes du terrain).

Le concept d'expériences comparables qui constitue un des fondements du dimensionnement géotechnique permet de mettre sur le même plan quatre procédures de vérification des ouvrages géotechniques : le calcul avec des coefficients partiels ou des approches fiabilistes, les règles prescriptives ou forfaitaires, les essais sur site ou sur modèles physiques, la méthode observationnelle. Le calcul n'est donc pas une fin en soi et doit toujours être soumis à la comparaison avec les expériences disponibles qui reflètent réellement l'efficacité d'une conception.

Le calcul numérique a fait l'objet de nombreuses discussions qui ont permis d'aboutir à un format de vérifications spécifiques permettant de conserver les approches traditionnelles utilisées pour le calcul des écrans avec des méthodes au coefficient de réaction et de proposer de nouvelles approches, basées notamment sur les procédures de réduction des propriétés de résistance au cisaillement. Il est en revanche regrettable que les discussions n'aient pas porté sur l'émergence des algorithmes d'intelligence artificielle qui pourrait bouleverser le dimensionnement des ouvrages géotechniques à partir de bases de données de constructions déjà existantes.

En vue de l'exécution des ouvrages géotechniques, différents concepts ont été définis : la supervision, l'inspection, les essais et le suivi. Sur un autre plan, les concepts de robustesse, de

PARTIE 2 : PROPRIÉTÉS DES TERRAINS

La partie 2 a été complètement revue en présentant non pas les techniques de sondage sur site et les essais de laboratoire, mais, d'une part, les étapes nécessaires à la construction du modèle de terrain et, d'autre part, l'ensemble des propriétés des sols et des roches qu'il est possible de rencontrer lors d'un projet.

Le modèle de terrain est à construire par étapes au moyen d'une visite du site, de la collecte des données déjà existantes et des reconnaissances géotechniques sur site et en laboratoire qui sont usuellement réalisées. Le modèle de terrain fournit les valeurs dérivées des paramètres géotechniques des différentes couches de terrain et constitue comme indiqué précédemment le principal livrable du rapport de reconnaissances géotechniques.

Des indications sont données sur le nombre de sondages à réaliser pour certains types d'ouvrage géotechnique, mais il n'a pas été possible d'aller plus en avant au niveau européen dans la définition d'un volume minimal d'investigations géotechniques : certains pays considérant que ce volume minimal doit forcément être complété par d'autres sondages alors que d'autres pays voient dans ce volume minimal un nombre qui peut être directement utilisé dans les situations courantes...

Une fois les terrains classés et décrits, les propriétés des terrains sont classées de la manière suivante : les paramètres d'état, les paramètres physiques et chimiques, les paramètres de résistance, les paramètres de rigidité et de compressibilité, les paramètres décrivant les aspects cycliques, dynamiques ou sismiques du comportement des terrains, les paramètres hydrauliques, les paramètres thermiques.

Il est important de souligner que la partie 2 définit les valeurs dérivées des propriétés des terrains pour la vérification des ouvrages géotechniques sous charge statique et sismique. Une telle organisation permettra sans doute de donner plus de cohérence à la définition des valeurs représentatives pour la vérification des différentes combinaisons.

Il est à noter que la partie 2 de l'Eurocode 7 ne comprend pas à ce stade de paramètres à déterminer nationalement et ne nécessite donc pas d'annexe nationale.

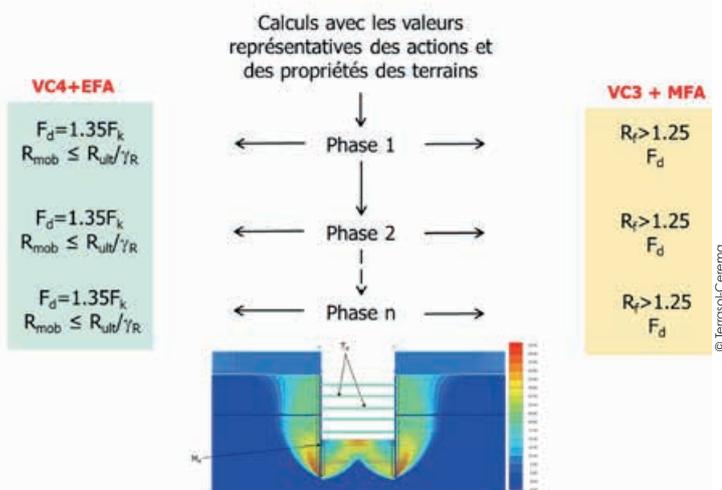
PARTIE 3 : OUVRAGES GÉOTECHNIQUES

La partie 3 comprend les recommandations à appliquer pour différents types d'ouvrages géotechniques qui font chacun l'objet d'un chapitre spécifique : les pentes, les déblais et les remblais, les fondations superficielles, les fondations profondes, les écrans et les murs de soutènement, les ancrages, les remblais en sol renforcé, les terrains renforcés par clouage ou boulonnage, les techniques destinées à l'amélioration ou au renforcement des terrains (colonnes ballastées, inclusions rigides, jet-grouting, etc.) et enfin les techniques de gestion des eaux souterraines (drainage, pompage, etc.).

Dans chaque chapitre sont présentées les vérifications à réaliser vis-à-vis des états limites ultimes et des états limites de service avec les valeurs des facteurs partiels. Selon le type d'ouvrage géotechnique, des modèles de calcul sont aussi présentés : par exemple, les modèles pressiométriques pour le calcul de la portance des semelles et des pieux, ce qui montre encore l'intérêt et l'importance du pressiomètre.

LIEN AVEC LES NORMES D'ESSAIS ET LES NORMES D'EXÉCUTION

L'Eurocode 7 dans sa deuxième génération continue de constituer, avec les normes d'exécution des travaux spéciaux de géotechnique (CEN/TC288) et d'essais et d'investigations géotechniques (CEN/TC341), un corpus cohérent dont les dispositions et recommandations sont indissociables : les garanties



Format de vérification pour les modèles numériques.

durabilité et de viabilité environnementale sont aussi définis avec l'objectif de réaliser des ouvrages géotechniques dont la conception repose sur le meilleur compromis possible entre ces trois concepts.

techniques apportées par l'Eurocode 7 ne valent que par la maîtrise de la qualité des données des reconnaissances géotechniques et de l'exécution des ouvrages.

LES NOUVELLES NORMES D'APPLICATION NATIONALE

Le nouvel Eurocode 7 avec ses 3 parties oblige à réviser les documents d'application nationale actuellement en cours d'utilisation. L'organisation envisagée au stade actuel est décrite dans le tableau ci-dessous. Seule la partie 1 de l'Eurocode 7 fera l'objet d'une annexe nationale ; les parties 2 et 3 ne nécessitent pas d'annexe nationale. Les paramètres de la partie 3 à déterminer nationalement seront définis dans les normes d'application nationale. Celles-ci porteront chacune sur un chapitre particulier de la partie 3, comme l'illustre le tableau suivant. À partir de la version actuelle de l'Eurocode 7, l'objectif est de mettre à jour les différentes normes d'application nationale existantes d'ici 2026. À partir de 2025, les normes stabilisées seront alors soumises à enquête publique en France. Le travail de rédaction a déjà commencé en 2022 avec les

		Annexes Nationales	Normes d'application nationale
EN 1997-1		L'annexe nationale est en cours de rédaction. Son contenu sera actualisé suite à l'Enquête Formelle et au Vote Formel.	---
EN 1997-2		---	---
EN 1997-3	Chapitre 4 Pentes, déblais et remblais	---	NF P 94-290
	Chapitre 5 Fondations superficielles		NF P 94-261
	Chapitre 6 Fondations profondes		NF P 94-262
	Chapitres 7 et 8 Ecrans de soutènement Ancrage		NF P 94-281 NF P 94-282
	Chapitre 9 Remblai en sol renforcé		NF P 94-270-1
	Chapitre 10 Terrain renforcé		NF P 94-270-2 NF P 94-270-3
	Chapitre 11 Amélioration des terrains		NF P 94-26X
	Chapitre 12 Gestion des nappes d'eau souterraines		---

© Terrasol-Cerema

Architecture du système normatif en géotechnique.

normes « *Fondations superficielles NF P 94-261* » et « *Murs de soutènement NF P 94-281* ». Il se poursuivra au cours de l'année 2023 par la norme « *Fondations profondes NF P 94-262* » et la norme relative à l'amélioration des terrains. L'année 2024 sera sans doute consacrée à la norme « *Ecrans de soutènement et ancrages NF P 94-282* » puis la norme NF P 94-270 qui sera sans doute

décomposée en 3 parties en lien chacune avec un chapitre de la partie 3 de l'Eurocode 7. ■

Sébastien Burlon

Président CNJOG*, Terrasol-Setec

Gilles Valdeyron

Secrétaire CNJOG*, Cerema

* CNJOG : Commission de normalisation pour la justification des ouvrages géotechniques.

Quelle que soit la saison,
sur votre terrain...

**Maitres d'ouvrage,
Promoteurs,
Bureaux d'études,
Architectes,
Entreprises de TP,
Géotechniciens,**
vous avez besoin :

- > De mesures fiables, précises et rapides et à coût modéré pour les fondations de tout type : immeubles - ouvrages d'art - lignes ferroviaires - route et autoroutes - terrassements...
- > D'un contrôle de compactage de sol et de colonnes ballastées.
- > D'optimisation des fondations par la multiplication des essais.
- > De mesures de la pression interstitielle du sol...

DEPUIS 10 ANS

NOUS SOMMES À LA HAUTEUR DE VOS AMBITIONS.

...nous vous ouvrons de nouveaux horizons!

Le TRACK-TRUCK® est un camion conçu avec un équipement spécial chenilles permettant d'accéder de la route aux chantiers les plus inaccessibles en moins de 5 minutes.

RECONNAISSANCE DES SOLS PAR PÉNÉTRATION STATIQUE

**10 RUE DE LA BIÈVRE
57400 SARREBOURG**
yannick.durmeyer@geosoltis.com



© SYMADREM

Digue à la mer aux Saintes-Maries-de-la-Mer.

Dossier spécial

Digues et ouvrages de protection

Les premières digues de protection contre les inondations connues en France datent du 9^e siècle sur la Loire et du 12^e siècle en Camargue. D'abord circonscrites à des propriétés privées, elles vont au fil des siècles s'étendre à l'ensemble du territoire. Après les grandes crues de 1840 sur le Rhône et de 1846 sur la Loire, l'État se structure. C'est l'époque des grands travaux avec la constitution de vastes systèmes d'endiguement protégeant villes et campagnes. On passe d'une gestion locale et privée du risque inondation à une gestion publique et globale de ce risque. L'absence de grandes inondations au 20^e siècle aura pour conséquence de

laisser en désuétude un grand nombre de ces ouvrages.

Les inondations de l'île de Camargue par rupture de digues lors des crues du Rhône d'octobre 1993 et de janvier 1994 constituent le point départ d'une réorganisation administrative de la gestion du risque inondation et des digues en particulier. D'abord considérées par le décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 comme des ouvrages de danger, qu'il faut surveiller et entretenir, les digues sont consacrées comme des ouvrages de protection avec la création de la compétence Gemapi en 2014, littéralement « Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations » et la parution du décret digues en 2015. Leur responsabilité est confiée aux intercommunalités (communautés de communes, d'agglomérations et métropoles).

Ce dossier spécial dont la première partie est à découvrir dans ce numéro de novembre 2022 (la seconde partie suivra dans le numéro d'avril 2023) débute par une présentation consacrée à un

chantier d'injection, celui d'Uretek qui a pour objet de renforcer la stabilité d'ouvrages maritimes.

Puis l'article de la société Hydrogéotechnique évoque le diagnostic géotechnique des ouvrages portuaires de Port-en-Bessin (Calvados). Le diagnostic approfondi est la seconde étape du cycle



Thibaut Mallet

de vie de la gestion des digues. Étape incontournable de l'analyse de risques, c'est lui qui va permettre d'analyser et évaluer les différents mécanismes de rupture et scénarios de brèche pouvant entraîner la ruine d'un ouvrage.

De plus, les modes de rupture pris en compte dans les études de dangers des systèmes d'endiguement sont l'érosion interne, l'érosion externe et le cisaillement (glissement...). L'érosion interne, et tout particulièrement l'érosion de conduit, est responsable de quasiment la moitié des ruptures de barrages en remblai dans le monde. Elle a été responsable de plus 85 % des désordres qui ont affecté les digues du delta du Rhône, lors des crues de ...



© SYMADREM

Digue résistante à la surverse de Beaucaire à Fourques.



Fièremment Made in Italy
Depuis 1921

www.massenzarigs.it

Le premier choix des foreurs pour :

- Puits d'eau
- Géotechnique
- Géothermique
- Explorations minérales
- Sismique
- Fondations
- Micro pieux et ancrages



Concessionnaire
exclusif en France

www.epd-france.fr
Mob: 0033(0)618580750 | Email: epd@wanadoo.fr



Digue Tarascon-Arles.

1993, 1994, 2002 et 2003. L'article de la société Sol Solution présente le *Hole Erosion Test* (HET), l'essai d'érosion qui permet de caractériser l'érosion de conduit avec une application au sol traité à la chaux. Employé régulièrement dans le domaine routier, le traitement à la chaux a longtemps été proscrit dans le monde des barrages, avant d'être redécouvert, il y a quelques années. On notera, à cet effet, la publication très prochaine d'un bulletin technique de la Commission internationale des grands barrages sur le sujet.

L'article de la société Freudenberg et de BRLingénierie présente une des nombreuses techniques utilisées pour le renforcement à la surverse des digues : la solution EnkaMat A20. La surverse avec

l'érosion interne est le principal mode de rupture des digues en crues. Le renforcement des talus côté zone protégée, sur de longs linéaires pour ne pas aggraver les lignes d'eau en crue, est amené à se développer sur les systèmes d'endiguement, car elle permet d'accroître sensiblement la sécurité des personnes sans rehaussement d'ouvrages.

Cet article est suivi par l'article de Spie Batignolles et Merceron TP qui décrit le renforcement d'un quai portuaire à la Rochelle.

Enfin, l'autre article co-écrit par les sociétés Sisprobe et Egis décrit un procédé innovant de surveillance par interférométrie de bruit sismique. La surveillance est un des enjeux du cycle de vie de la gestion des digues. Sans surveillance

et sans entretien, la performance des digues décline très rapidement. La prise en compte des coûts d'exploitation, longtemps négligés dans les investissements d'ouvrages hydrauliques, est primordiale pour garantir la durabilité des ouvrages. La compétence Gemapi, en instaurant la taxe affectée du même nom, permet désormais aux gestionnaires de systèmes d'endiguement de disposer des ressources fiscales suffisantes pour garantir sur le long terme, les missions d'entretien et de surveillance et *in fine* la sécurité des populations résidant dans les zones protégées par des systèmes d'endiguement.

Je vous souhaite une bonne lecture. ■

Thibaut Mallet

Directeur général du Symadrem*



Coupe Digue résistante à la surverse de Beaucaire Fourques.

*Le Symadrem a pour mission, la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations (Gemapi) sur le territoire du grand delta du Rhône. Il intervient sur 245 km de digues fluviales et 30 km d'ouvrages maritimes (digue à la mer, épis, brise-lames et tenons).

C'est un syndicat mixte qui regroupe 6 établissements publics de coopération intercommunale (EPCI-FP) : la métropole Aix-Marseille-Provence, la communauté d'agglomération Arles-Crau-Camargue-Montagnette, la communauté d'agglomération Nîmes Métropole, la communauté de communes Terre de Camargue, la communauté de communes Beaucaire Terre d'Argence, la communauté de communes de Petite Camargue et un Département : le Département des Bouches-du-Rhône.

Depuis 2007, le Symadrem met en œuvre un programme de sécurisation des digues contre les crues du Rhône. 210 M€ ont d'ores et déjà été investis et 180 M€ sont programmés sur la période 2022-2027. Côté mer, une stratégie littorale pour faire face à l'élévation du niveau marin est en cours de déploiement.

Confortement d'une cale bretonne par injection de résine

Il y a quelques mois, cet ouvrage maritime a fait l'objet d'une pérennisation complète. Pour la bonne exécution de ce chantier, la technique de reprise en sous-œuvre par injection de résine exclusive a été préconisée.

UN PORT RÉELLEMENT FRAGILISÉ PAR LE TEMPS

Sur la côte du Morbihan, à l'extrémité du sud du port de Larmor-Baden, la cale de Pen Lannic était depuis déjà quelques années endommagée par le temps et les diverses agressions maritimes. Plusieurs désordres ont été repérés en amont par des inspections subaquatiques. Les résultats ont démontré des affaissements et fissures présents plus particulièrement en nez de cale, qui ont engendré des vides sous les remblais du corps de cale. Rebouchés en surface, il était indispensable pour la suite du processus de renforcer le sol d'assise de l'ouvrage. C'est dans ce contexte qu'Uretek est intervenue sur ce chantier.

UNE ACTION CURATIVE PAR INJECTION DE RÉSINE EXCLUSIVE

Connue pour sa faible invasivité et sa rapidité d'exécution, la solution d'injection de résine de l'industriel a été retenue dans le cadre de ce projet. L'équipe d'intervention présente sur place avait pour objectif de combler les vides du sol ainsi que d'améliorer sa portance pour renforcer l'ouvrage face aux différentes agressions qu'il peut subir.

Pour ce faire, l'intervention s'est déroulée en 2 étapes bien distinctes :

- la première consistait à traiter uniquement sous le mur de parement, en injectant de la résine jusqu'à 4 m de profondeur par rapport au terrain sur 3 niveaux ;
- la seconde portait sur le traitement du sol du corps de remblais de la cale. Plus de 1 000 m³ ont alors été traités entre 4,5 et 6,5 m de profondeur.



Mise en place des tubes à injections.

Contrairement aux techniques dites traditionnelles, telles que le coulis de ciment ou encore les micropieux, la résine exclusive du spécialiste en renforcement de sols par injection de résine expansive polymérise dans l'eau sans la polluer. Ce qui permet de traiter les désordres présents sur le port tout en respectant les eaux et les océans.

À chaque instant, les équipiers d'intervention devaient faire preuve de vigilance afin d'ajuster parfaitement les injections de résine aux besoins du site. Pour y parvenir, un contrôle au niveau laser a été positionné de manière à réguler la quantité de résine injectée sur chaque point d'injection en fonction des réactions de l'ouvrage en surface. À cela s'ajoutaient des tests pénétrométriques de contrôle pour vérifier les améliorations de sol lors des phases d'injection.

Ainsi, la juste quantité de produit était injectée dans le sol pour garantir l'atteinte des objectifs initialement fixés.

LES INTERVENANTS DU CHANTIER :

- Maître d'œuvre : **Atout Port**
- Rapport géotechnique : **Ginger CEBTP**
- Entreprise générale : **Colas**
- Amélioration de sols par injection de résine expansive : **Uretek**

L'UTILISATION DE LA TECHNIQUE MULTIPPOINTS

Afin de maximiser les temps d'intervention et de réaliser des injections homogènes, la technique Multipoints a été utilisée. Ce procédé totalement inédit consiste à diffuser la résine Geoplus via des canules pré-percées dans la longueur pour qu'elle se diffuse depuis les parois du tube et non plus par son extrémité. Cette mise en œuvre permet d'assurer une efficacité quasi instantanée. Une technique qui a permis d'effectuer l'intervention en seulement 11 jours. ■



Cale de Pen Lannic lors de l'intervention Uretek.

Olivia Pradel
Uretek

Confortement des ouvrages portuaires de Port-en-Bessin-Huppain

Premier port de pêche du Calvados, Port-en-Bessin-Huppain est protégé par deux digues artificielles, construites au milieu du 19^e siècle. La houle et les différentes tempêtes ont fragilisé ces digues du port qui présentent aujourd'hui des affouillements, des fractures, des déjoints, des dalles manquantes, des fissures... Le confortement, entre autres, des môles ouest et est ont donc été nécessaires.

Nous ne pouvons parler de Port-en-Bessin-Huppain sans refaire un peu l'histoire de la ville. Depuis plus de mille ans, la cité portaise est tournée vers la mer. Ce n'est qu'au 15^e siècle que les premiers ouvrages portuaires sont construits pour favoriser la pêche et le commerce. Le premier projet, porté par l'Église, consistait à créer un bassin côté terre, séparé par un pont à 7 arches, muni de vannes pour piéger l'eau et la libérer à marée basse. Malheureusement, l'ingénierie à cette époque n'est pas en mesure d'apprécier les forces de la nature et ces premiers ouvrages subissent très rapidement de gros dégâts et deviennent inutilisables. Ce n'est qu'au 19^e siècle que d'autres projets d'ampleur naissent, après une succession d'échecs les deux siècles précédents. L'avant-port est créé entre 1845 et 1864 avec les premiers ouvrages donnant sur la mer. C'est à ce moment que sont construits les deux môles principaux que nous connaissons aujourd'hui. Ici encore l'ingénierie sous-estime les tempêtes et l'effet des vagues, et le bassin présente une forte insécurité étant donné l'agitation qui y règne. En 1957, des épis complémentaires sont créés

dans l'avant-port afin de maîtriser cette agitation. L'étude est cette fois menée sur un modèle réduit (travail confié au laboratoire national d'hydraulique de Chatou) et les résultats sont bons.

Le port prend alors la forme qu'on lui connaît aujourd'hui.



Matthias Ferreira

On voit à travers ce bref rappel historique le combat incessant qu'il a été nécessaire de mener pour construire ces ouvrages portuaires en essayant d'anticiper les phénomènes naturels qui nous entourent ; les tempêtes et la houle sont souvent citées, mais n'oublions pas le contexte géologique complexe, avec des versants sujets aux glissements de terrain, ou encore des réseaux karstiques fortement développés dans le

secteur, pouvant se mettre en charge sous les marnes de Port-en-Bessin à la faveur d'épisodes pluvieux intenses.

À ce sujet, on notera que le dernier projet de création d'un troisième bassin dans l'arrière-port (année 1970) a été abandonné, justement en lien avec des arrivées d'eau non maîtrisées émanant du sous-sol. Il s'agit bien là de venues d'eau karstiques qui trouvent leur chemin jusque dans les perrés du port actuel. À ce propos, les documents d'archives mentionnaient déjà en 1850 que la présence de ces résurgences avait posé problème lors de la construction des ouvrages le long du rivage.

QUELQUES CHIFFRES :

- 400 ml de sondages carottés Ø146 ou Ø114mm
- 300 ml de sondages pressiométriques
- 40 essais lugeon ou Lefranc
- Plus de 150 essais en laboratoire

DÉSORDRES SUR LES OUVRAGES

Après 160 ans de mise en service, certains de ces ouvrages présentent une certaine fatigue et les assauts de la mer incessants, dont certains épisodes sortent du lot par leur violence (pour ne citer que les tempêtes de 1996 ou 2010), génèrent de nouveaux désordres sur nos ouvrages portuaires. Aujourd'hui, on note que les perrés présentent des vides localement sous la maçonnerie, que la maçonnerie elle-même se voit affaiblie (joints attaqués par les eaux salines, blocs manquants...). Les môles est et ouest s'avancent très largement sur la mer. Sur certaines parties, des enrochements ont été mis en confortement pour protéger ces ouvrages de la houle et des tempêtes. D'autres parties présentent des fissurations verticales qu'il conviendra d'analyser.



Forage sur le môle ouest.

© Hydrogeotechnique

FABRICANT FRANÇAIS

Tubes PVC et PEHD



PROMAFORSOVEMA

Partenaire & Fabricant de vos Solutions de Forage

www.promafor-sovema.fr



© Hydrogéotechnique

Intervention d'un cordiste sur le parement.

C'est dans ce cadre que le conseil départemental du Calvados a missionné la société Hydrogéotechnique pour mener un diagnostic géotechnique complet des ouvrages principaux du port. Cette mission a été menée sous la maîtrise d'œuvre d'Antea Group. L'objectif de la campagne a consisté à :

- par des moyens géophysiques, rechercher des anomalies sur les parements verticaux des ouvrages ;
- rechercher des zones de décollement effectif des parements et zones décomprimées ;
- évaluer la présence de matériaux gonflants dans les ouvrages ;
- évaluer l'état de fissuration et de conservation des corps de digue ;
- proposer des modèles géotechniques des sols d'assises et des remblais ;
- caractériser la piézométrie en arrière des perrés, au niveau des résurgences de l'avant-port ;
- proposer des solutions de confortement envisageables.

L'ensemble des investigations a nécessité des moyens d'investigations variés, complémentaires et adaptés aux différentes problématiques et aux conditions d'accès aux ouvrages.

Au niveau de l'enveloppe des ouvrages, les maçonneries en parement ont fait l'objet d'un diagnostic par géoradar moyenne fréquence (antenne 400 MHz), avec des auscultations selon des profils horizontaux et verticaux. Aucune détection n'étant possible sous nappe, seules les parties émergées à marées basses ont été auscultées, ce qui constitue une première difficulté. Les contrastes électromagnétiques mis en évidence ont fait

ressortir des zones potentiellement plus aérées et/ou décomprimées (anomalies), mis en forme par une cartographie 2D.

Ensuite, les radargrammes ont été analysés et confrontés aux observations de terrain pour établir des zones cibles où des techniciens cordistes ont réalisé des sondages carottés horizontaux sur les parements. Ces sondages ont permis de prélever les matériaux en place (pierre de parement, joint, mortier de remplissage), et également de vérifier *in situ* l'état du parement et les éventuelles zones de décollement. Chaque carottage a fait l'objet d'une auscultation systématique par caméra de forage pour vérifier l'absence de décollement, fissure, fracture voire zone de vide.

Plus largement, afin d'appréhender ou de confirmer la géométrie et la coupe type des ouvrages, une campagne d'investigations a été menée depuis les môles, épis et perrés à l'aide d'une foreuse au gabarit réduit. Elle a permis la réalisation de sondages carottés verticaux (\varnothing 114 à 146 mm), couplés à la réalisation de nombreux essais Lugeon. La description précise des carottes combinée aux résultats Lugeon sont les principales données d'entrée pour



© Hydrogéotechnique

Forage sur l'épi central.

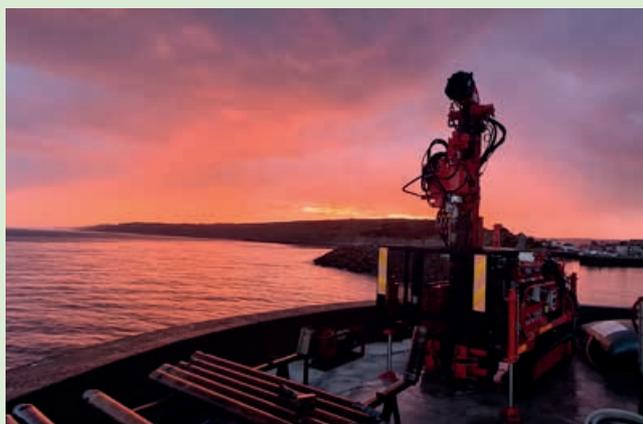
l'évaluation de la qualité de conservation des maçonneries. On soulignera ici qu'un maillage dense de sondages et d'essais est déterminant pour compartimer l'ouvrage en zones homogènes et proposer des emprises de traitement optimisées. Pour caractériser l'assise des ouvrages, ces sondages ont ensuite été poursuivis en carottage et/ou dédoublés avec des sondages pressiométriques. Ces sondages et essais avaient pour objectif de justifier les ouvrages d'un point de vue géotechnique (vérification de la géométrie, de l'assise, du fonctionnement monolithique de l'ouvrage...).

Cependant, d'autres pathologies fréquemment rencontrées sur les ouvrages portuaires sont en lien avec la présence de matériaux au potentiel gonflant, qui se révèlent en vieillissant sous l'attaque des espèces ioniques potentiellement agressives de l'eau de mer. Ce diagnostic s'est donc accompagné d'un panel d'essais en laboratoire pour la recherche de pathologies au niveau des pierres de parement, des mortiers de jointolement, et des matériaux de remplissage de la maçonnerie. Cette caractérisation des matériaux a été confiée au laboratoire du LERM.

Concernant les conditions d'accès aux ouvrages, elles ont nécessité d'employer des moyens spéciaux et des modes opératoires particuliers. Comme déjà évoqué, les cordistes du bureau Hydrogéotechnique sont capables d'aller réaliser des sondages horizontaux sur les parements. L'accès au musoir du môle est, surélevé de 2 m par rapport au môle, a nécessité de fabriquer une rampe provisoire sur mesure, capable de supporter le passage de l'engin chenillé d'un poids de 4 t. Sur d'autres secteurs,

les faibles largeurs des môles ne permettait pas localement d'obtenir une largeur de travail suffisante, qu'il a donc fallu élargir au moyen de plateformes provisoires en encorbellement. Une autre difficulté fût l'accès au môle est, qui s'est fait au moyen d'un grutage de la machine. Enfin, plusieurs sondages réalisés dans le bassin de l'avant-port ont été réalisés par des moyens nautiques.

Le cas particulier des résurgences de l'avant-port : les piézomètres ont été équipés de capteurs automatiques du niveau de la nappe et de la conductivité. Les enregistrements ont fait apparaître des écoulements transitoires, dont le sens d'écoulement permute selon le rythme des marées. La marée montante recharge les remblais en arrière des perrés, il s'agit d'eau de mer. À marée descendante, le régime d'écoulement s'inverse, et la charge piézométrique s'abaisse jusqu'à un niveau seuil :



Lever de soleil sur le musoir du môle ouest.

LES INTERVENANTS DU PROJET :

- Entreprise : Hydrogéotechnique Agence de Caen et Pôle Falaises et Cavités (cordistes)
- Ingénierie et mesures géophysiques (IMG) – Groupe Hydrogéotechnique
- Sous-traitant : LERM
- Maître d'ouvrage : Département du Calvados
- DGA Aménagement et Environnement
- Direction de la Mer et de l'Attractivité littorale
- Maîtrise d'œuvre : ANTEA Group

la salinité disparaît. Ce sont les résurgences d'eau douce qui prennent le relais. À l'époque, ces résurgences étaient utilisées par les lavandières. Aujourd'hui, cette particularité doit être prise en compte dans les solutions de réhabilitation.

Le travail réalisé par la société Hydrogéotechnique a permis d'apporter à cet ouvrage de plus de 160 ans, et qui s'inscrit dans une histoire millénaire, les compétences techniques indispensables pour lui donner une seconde vie. Cette mission géotechnique a par ailleurs enrichi la connaissance des points forts et points faibles de ces organes portuaires et des confortements à envisager. ■

Matthias Ferreira

Directeur Grand Ouest, Hydrogéotechnique

Arnaud Vandercamere

Directeur d'agence de Caen, Hydrogéotechnique



VENTE

LOCATION

RÉPARATION

PIECES DETACHEES



07 49 88 73 70
b.badens@travauxspeciauxmateriel.fr



Distributeur
exclusif France
OCMER

126 chemin de l'Ision
38670 Chasse sur Rhône



Matériels de Projections d'injections
et accessoires



07 49 87 05 35
c.latour@travauxspeciauxmateriel.fr

Renforcement des digues de protection contre les inondations par sol traité à la chaux

Les matériaux disponibles sur site ne sont pas toujours adaptés pour la construction de digues de protection contre les inondations, mais le traitement à la chaux peut être une solution pour améliorer leurs performances et permettre leur valorisation. Les projets de recherche et de développement relatifs à l'amélioration des sols par traitement à la chaux pour la construction d'ouvrages hydrauliques sont nécessaires pour valider les solutions techniques. Exemple d'une amélioration des performances face au risque d'érosion en Belgique.

C'est en effet dans ce cadre que la société Sol Solution intervient en collaboration avec la société Lhoist (service R&D) pour réaliser des essais d'érosion conformément au protocole INRAE lors des phases d'étude des formulations des mélanges sol-chaux.

LUTTER CONTRE L'ÉROSION

L'érosion représente plus de 80 % des causes de rupture de digues dans le monde. Il est possible de distinguer deux grandes familles d'érosion : l'érosion interne et l'érosion externe. La mise en place de filtres drainants, de parois étanches est une des solutions structurelles pour réduire ce risque sur les digues de protection contre les inondations. Des solutions alternatives et innovantes pour réduire le risque d'érosion avec des sols traités à la chaux sont étudiées. Pour vérifier l'efficacité de ses solutions dans le cadre de différents projets, Sol Solution réalise depuis 2015 des essais d'érosion interne pour le compte de la société Lhoist.

Sol Solution est une entreprise spécialisée dans le domaine de la géotechnique. Elle développe et commercialise des pénétromètres dynamiques et assure des missions d'ingénierie géotechnique depuis 30 ans. Son laboratoire de sol permet de réaliser les essais les plus fréquents (essai d'identification de sols, Proctor, CBR, IPI, essai de cisaillement, essais triaxiaux, essais oedométriques ...), mais aussi des essais innovants pour répondre aux demandes spécifiques de ses clients.

En 2013, la création de son activité dédiée à l'étude des barrages et digues en terre s'est accompagnée de l'installation du banc d'essai d'érosion HET (*Hole Erosion Test*) dans son laboratoire. Ce dispositif développé par les équipes de l'INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) d'Aix-en-Provence permet de déterminer la résistance à l'érosion interne d'un échantillon de sol. Cet essai est aujourd'hui reconnu comme une référence pour l'étude du risque d'érosion interne par conduit. Il figure notamment dans le Guide international sur les digues (édition Cerema, 2019).

Le groupe Lhoist est une entreprise minière familiale historiquement basée en Belgique et d'envergure mondiale, présente dans plus de 25 pays. Depuis plus de 130 ans, le groupe produit et fournit de la chaux, du calcaire et d'autres produits minéraux pour une large gamme d'applications. Le secteur des travaux publics est un marché important où la chaux est couramment utilisée depuis les années 1960 pour améliorer la maniabilité et les performances mécaniques des sols lors de la construction d'infrastructures telles que les routes, autoroutes, aéroports, chemins de fer ou encore les plates-formes industrielles. Depuis le début des années 2000, la société s'est engagée dans une phase de recherche et de développement visant à démontrer les bonnes performances des sols traités à la chaux pour la construction d'ouvrages hydrauliques en terre.

TESTER LE SOL EN LABORATOIRE

Sol Solution est en mesure de réaliser l'essai d'érosion interne HET grâce au contrat de licence sur savoir-faire accordé par l'INRAE depuis 2013. Seuls deux bureaux d'étude privés en France sont équipés pour réaliser ces essais. 180 essais HET ont été réalisés à ce jour dans le laboratoire de Sol Solution pour le compte de ses clients.

L'éprouvette de sol peut être préparée à partir d'un échantillon remanié ou à partir d'un échantillon intact.

Dans le premier cas le sol est compacté dans un tube en PVC de façon dynamique en plusieurs couches. L'échantillon ainsi obtenu mesure 15 cm de long et 8 cm de diamètre. La teneur en eau et la densité cibles sont choisies en fonction du projet.

Dans le cas d'un échantillon intact, un fragment de 15 cm de long et de 8 cm de diamètre est extrait de la gaine de prélèvement. L'échantillon de sol est placé dans un tube en PVC avec un dispositif assurant l'étanchéité entre les parois du tube et l'échantillon.

Un conduit de 6 mm de diamètre est percé dans l'échantillon de sol. Le tube est placé dans le banc d'essai. Le tube en PVC est rempli d'eau avec une pression de 2 bars. ●●●

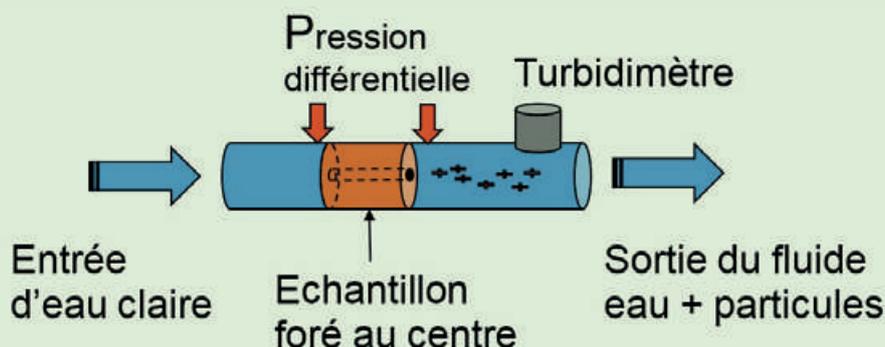


Schéma du principe de l'essai d'érosion HET.



**SONDAGES GÉOTECHNIQUES
ESSAIS EN LABORATOIRE
INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE**



SIAL
ingénierie du sol

- ▶ Bureau indépendant d'études géotechniques
- ▶ Intervient sur l'ensemble du territoire national
- ▶ Réalise des missions géotechniques (G1 à G5)

38 avenue Maurice Lévy
BP 20197 - 33708 MÉRIGNAC CEDEX
Tél : 05 32 00 00 77
contact@sial-bet.com
sial-bet.com



© Sol Solution

Banc d'essai dédié à l'essai d'érosion HET.

L'essai consiste à forcer le passage de l'eau dans le conduit traversant l'échantillon. Le débit est contrôlé par l'ouverture d'une vanne située en aval de l'échantillon. En ouvrant la vanne, le débit augmente progressivement et fait croître la différence de pression entre l'amont et l'aval de l'échantillon. La contrainte de cisaillement s'applique sur les bords du conduit par la circulation de l'eau. Quand l'arrachement des particules du sol commence, la contrainte critique de cisaillement est atteinte. Quand l'érosion est significative, le débit est stabilisé jusqu'à la fin de l'essai. L'érosion interne se traduit par l'apparition d'un nuage de particules à l'aval de l'échantillon. La matière en suspension est mesurée par un capteur de turbidité. L'arrachement des particules induit un agrandissement du conduit qui se traduit par une diminution progressive du gradient de pression entre l'amont et l'aval de l'échantillon. L'essai se termine quand le conduit cesse de s'élargir. L'eau s'éclaircit, la pression différentielle se stabilise.

« L'utilisation de produits à base de chaux dans la construction a montré un intérêt pour le renforcement et l'entretien des digues »

L'échantillon est retiré du banc d'essai. Le volume du conduit érodé est mesuré.

L'exploitation des enregistrements réalisés au cours de l'essai permet de déterminer les deux résultats de l'essai d'érosion : la contrainte critique de cisaillement exprimée en Pa et l'indice d'érosion.

Les deux résultats sont corrélés : plus la contrainte critique de cisaillement est élevée, plus la vitesse d'érosion est faible.

Pour un même matériau testé, la différence entre un sol intact et un sol remanié avec une densité et une teneur en eau identique donne des résultats très différents. La contrainte critique de cisaillement est généralement deux fois plus grande pour un matériau intact que pour matériau remanié.

DIGUE EXPÉRIMENTALE TRAITÉE À LA CHAUX

Entre 2016 et 2019, le centre de recherche de Lhoist a sollicité Sol Solution pour réaliser des essais d'érosion HET dans le cadre du projet expérimental de renforcement des digues de Vlassenbroek en Belgique.

Le chantier expérimental de Vlassenbroek s'inscrit dans le déploiement du plan Sigma initié par le gouvernement flamand et opéré par De Vlaamse Waterweg. Ce plan d'action vise à renforcer les protections contre les inondations de



© Lhoist

Chantier expérimental de Vlassenbroek.

l'Escaut et de ses affluents et comporte plusieurs chantiers de grande ampleur, dont la réalisation d'un bassin d'expansion de crues de 240 ha situé à Vlassenbroek. Ce bassin est ceint d'une digue périphérique et divisé en deux parties (nord et sud) par une digue de séparation afin d'optimiser la gestion de l'eau en cas de crues.

Dans ce contexte, sur une portion préétablie de la digue périphérique, De Vlaamse Waterweg a laissé ouverte la possibilité de financer et construire en 2019 une section expérimentale en sol traité à la chaux¹. La construction d'une section a été réalisée avec comme objectifs :

- valider en vraie grandeur, dans des conditions réelles de chantier, la mise en œuvre de sols traités à la chaux comme carapace de la digue en substitution des sols argileux utilisés couramment,
- évaluer à moyen terme les performances de la carapace en sols traités à la chaux vis-à-vis des sollicitations rencontrées en cas de crues, et particulièrement leur résistance aux phénomènes d'érosion externe,
- évaluer le respect des critères imposés sur la perméabilité des matériaux constitutifs de la carapace, leur stabilité, et la possibilité de re-végétalisation sur ces surfaces.

Le sujet principal du projet consiste à substituer les dernières couches périphériques de la digue sur une épaisseur de 1,10 m, classiquement mises en œuvre avec un sol argileux non traité, par un sol fin traité à la chaux. Le traitement à la chaux est réalisé sur une plateforme dédiée, avec les moyens classiques utilisés en travaux de terrassement.

L'ouvrage expérimental comporte deux sections qui correspondent à deux natures de sols traités différentes :

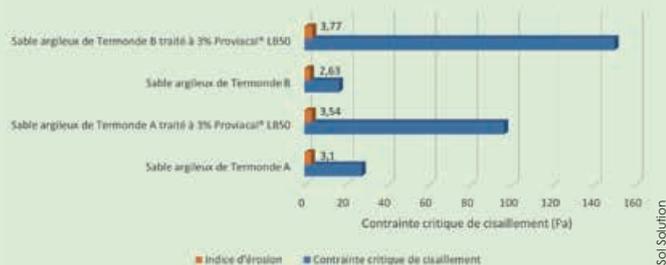
- le sol sableux du site, traité à 3 % de Proviacal LB50, un liant à base de chaux spécialement formulée pour son application en carapace,



© Sol Solution

Éprouvette de sol sableux non traité avant et après l'essai d'érosion HET

■ un sol limoneux d'apport qui présente des caractéristiques géotechniques adaptées à la même application, traité à 2 % de chaux Proviacal DD.



Visualisation des résultats des essais d'érosion HET après 28 jours de cure.

Un plan de suivi de l'ouvrage est appliqué pour une période de 5 ans avec *in fine* la réalisation d'essais de surverse à grande échelle prévus pour 2024.

Sol Solution a testé en laboratoire l'efficacité du traitement avant sa mise en œuvre sur le chantier expérimental.

Le graphique suivant présente les résultats des essais menés sur le sol sableux prélevé à proximité du site et traité à 3 % de Proviacal LB50.

Les résultats des essais HET montrent une faible résistance à l'érosion interne pour les échantillons naturels. Les contraintes critiques sont inférieures à 30 Pa et les indices d'érosion sont compris entre 2,5 et 3,5 ce qui correspond à des érosions très



Visualisation des résultats des essais d'érosion HET après 28 jours de cure.

rapides à modérément rapides d'après le classement proposé par Wan et Fell².

Le traitement au Proviacal LB50 permet d'accroître la contrainte critique de cisaillement jusqu'à une valeur de l'ordre de 100 Pa. L'indice d'érosion s'accroît avec le traitement au Proviacal LB50, mais dans une moindre mesure que la contrainte critique.

« La chaux, une technique innovante et une pratique écologiquement viable pour la valorisation des sols argileux »

Le graphique suivant présente les résultats des essais menés sur le sol limoneux prélevé à Jette (Belgique) et traité à 2 % de chaux Proviacal DD.

Les résultats des essais HET montrent une bonne résistance à l'érosion interne pour les échantillons naturels. Les contraintes critiques sont supérieures à 100 Pa et les indices d'érosion ●●●

websprint

**GAGNEZ EN EFFICACITÉ
ET EN RAPIDITÉ !**

La solution en ligne Websprint® est une application web dédiée au traitement et l'interprétation de vos données géotechniques.

ESSAI GRATUIT 1 MOIS

www.websprint.eu

**MOBILE
COLLABORATIVE
SÉCURISÉE**

- Compatible avec -



- CONTRÔLE DE COMPACTAGE -
RECONNAISSANCE DE SOL - CORRÉLATION -
CAPACITÉ PORTANTE

SOL SOLUTION
L'INNOVATION EN GÉOTECHNIQUE

sont compris entre 3 et 4 ce qui correspond à des érosions modérément rapides d'après le classement proposé par Wan et Fell².

Le traitement à la chaux Proviacal DD permet d'accroître la contrainte critique de cisaillement jusqu'à une valeur de l'ordre de 1000 Pa. L'indice d'érosion s'accroît légèrement avec le traitement, mais dans une moindre mesure que la contrainte critique.

ESSAIS SUR DES ARGILES DES PAYS-BAS

En 2019, Sol Solution a été mandaté par Lhoist R&D pour la réalisation d'une nouvelle campagne d'essais HET en laboratoire dans le cadre d'un projet de développement mené avec Deltares aux Pays-Bas.

Deltares est un institut technologique de renommée mondiale, mandaté par le gouvernement néerlandais, pour convertir les innovations de la recherche fondamentale en solutions applicables dans le domaine de l'eau et des sous-sols.

L'argile est traditionnellement un matériau largement utilisé pour la construction des digues aux Pays-Bas. Selon les exigences fonctionnelles requises, une large gamme d'argiles peut actuellement être utilisée pour renforcer ou construire les digues sous réserve qu'elle réponde aux normes de qualité en vigueur dans le pays. Ces normes ne s'appliquent qu'aux dépôts naturels et non aux argiles contenant des additifs. L'acheminement d'argiles par barges sur de longues distances est un fait courant dans le cadre de chantiers de renforcement de digues néerlandaises, mais une volonté grandissante de valoriser les matériaux locaux qui ne conviennent pas toujours à l'utilisation dans les digues commence à se manifester.

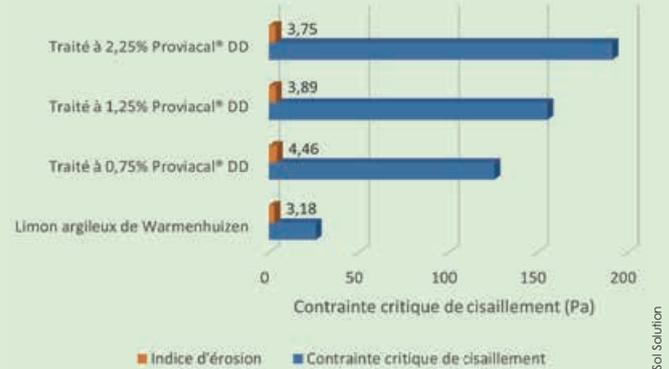
Depuis 2018, Deltares a montré son intérêt pour l'utilisation de produits à base de chaux dans la construction, le renforcement et l'entretien des digues, perçue comme une technique innovante et une pratique écologiquement viable pour la valorisation des sols argileux locaux. À cette fin, un projet de recherche collaborative multiphasés a débuté avec l'objectif d'établir une méthode de travail approuvée pour l'utilisation des argiles traitées à la chaux dans la modernisation des digues aux Pays-Bas.

Dans le cadre de la seconde phase du projet, un programme d'essais en laboratoire a été établi en 2019 dans le but d'évaluer si la technique de traitement à la chaux est efficace lorsqu'elle est appliquée à des argiles néerlandaises typiques^{3&4}. En effet, les argiles sont des sols abondants aux Pays-Bas et contiennent généralement de la matière organique dans une proportion de 2 à 5 %. Comme peu de rapports sont disponibles dans la littérature concernant le traitement à la chaux des argiles organiques, il convient d'évaluer comment ce type d'argile réagit à l'ajout de chaux.

Le sol d'étude de référence est une argile sableuse provenant de Warmenhuizen (Pays-Bas) et classifiée selon les normes de qualité néerlandais comme un matériau impropre pour la construction de revêtements de protection de digues. Plusieurs traitements à la chaux ont été retenus pour en évaluer l'effet :

- 0,75 % de chaux Proviacal DD, ce qui correspond au PFC⁵.
- 1,25 % de chaux Proviacal DD, ce qui correspond au PFC + 0,5 %.
- 2,25 % de chaux Proviacal DD, ce qui correspond au PFC + 1,5 %.

Les résultats des essais HET montrent une faible résistance à l'érosion interne pour l'échantillon non traité. La contrainte critique est inférieure à 30 Pa et l'indice d'érosion est compris



Visualisation des résultats des essais d'érosion HET après 28 jours de cure.

entre 2,5 et 3,5 ce qui correspond à une érosion très rapide à modérément rapide d'après le classement de Wan et Fell².

Le traitement à la chaux permet d'accroître la contrainte critique de cisaillement jusqu'à des valeurs supérieures à 100 Pa. De plus, il permet d'accroître l'indice d'érosion qui évolue d'une gamme de 2,5 - 3,5 (érosion très rapide à modérément rapide) à une gamme de 3,5 - 4,5 (érosion modérément rapide à modérément lent). Quel que soit le taux de chaux, le traitement des sols permet de faire croître les paramètres d'érosion.

CONCLUSION

Les essais d'érosion HET ont mis en évidence l'intérêt du traitement à la chaux pour renforcer un sol naturel face au risque d'érosion. Des projets expérimentaux à grande échelle permettent de vérifier l'efficacité de cette solution de renforcement en « carapace » en Belgique et aux Pays-Bas. Des essais de surverse in situ permettront finalement d'évaluer à grande échelle les performances de cette solution sur la digue de Vlassenbroek. Les essais en laboratoire sont une bonne solution en première approche pour orienter le choix des maîtres d'ouvrage et celui des entreprises dans la réalisation d'un ouvrage neuf ou sa consolidation. ■

Charly Peyre

Chargé d'affaires, Sol Solution

Jean-Christophe Pellez

Responsable de service, Sol Solution

Fabien Klotz

Ingénieur recherche, Lhoist

1. *Experimenteren met kalkbehandeling van de afdeklaag van dijken – MOW Vlaanderen - Grond/Weg/Waterbouw Magazine Nr 06 - 2020*

2. *Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, Journal of geotechnical and geoenvironmental Engineering, vol. 30, n° 4, pp373-380, 2004.*

3. *On the use of lime-treated clay dike upgrades. Phase 2 Laboratory research and possible applications. M. Konstantinou, T.P.Stoutjesdijk, Deltares, 2019, B*

4. *M. Konstadinou; G. Herrier; T. Stoutjesdijk; F. Losma; C. Zwanenburg; R. Dobbe. Forthcoming. "LIME TREATMENT: AN EVALUATION FOR USE IN DIKE APPLICATIONS IN THE NETHERLANDS". Journal of Materials in Civil Engineering. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004623*

5. *Le PFC est reconnu comme la quantité minimale de chaux à partir de laquelle commencent à se développer les réactions pouzzolaniques nécessaires à la stabilisation du sol. C'est la quantité de chaux, exprimée en pourcentage du sol sec, à ajouter pour atteindre la valeur de pH de 12,4 dans le sol.*



Pevefor



FABRIQUÉ
EN FRANCE

Développée dans les années 90 avec les foreurs, la gamme PEVEFOR de tubes et accessoires en PVC est fabriquée exclusivement dans les Hauts-de-France.

Avec PEVEFOR, vous bénéficiez de :

- Une fabrication Française
- Une Attestation de Conformité Sanitaire
- Une large gamme du 33 au 400 mm : 550 références
- Des avantages du PVC (légèreté, résistance à la corrosion et au vieillissement, inertie chimique)
- Un produit 100% recyclable
- Une équipe commerciale dédiée

Pour plus d'informations, consultez notre site internet www.dyka.fr.
DYKA - 62140 Sainte-Austreberthe -- +33(0)3 21 86 59 00

DYKA
Nature's Network



Protection végétalisable des digues et berges soumises à la submersion

Le secteur des basses plaines de l'Aude peut être confronté à des crues importantes du fleuve. Des digues de protection édifiées pour lutter contre les inondations permettent de limiter l'impact des intempéries sur les populations et l'activité économique locale, mais l'intensification et l'amplitude plus forte de ces événements climatiques devenus de plus en plus dévastateurs ont endommagé ces ouvrages de protection. Le syndicat mixte du delta de l'Aude (SMDA) a donc chargé le bureau d'études BRL Ingénierie de procéder à des études pour le confortement des digues et déversoirs dans le secteur entre Sallèles-d'Aude et Coursan.

Lors des crues du fleuve Aude, le risque de rupture de digue par surverse est important. L'objectif de l'opération était de reprendre les travaux de réparation déjà réalisés et de pérenniser l'ensemble du périmètre d'étude pour pouvoir résister aux écoulements en cas de débordement, tout en maintenant la cote altimétrique existante. En effet, lorsque la crue passe par-dessus la digue, on assiste à une érosion régressive du talus qui peut aboutir à une rupture totale de la digue en fonction de la durée et de la hauteur de déversement. Il fallait donc définir une solution de protection de surface de la digue, située côté plaine, pouvant résister à des hauteurs de surverse allant jusqu'à 15 cm.

C'est donc sur la base de nombreux essais de performance à petite échelle sur canal expérimental de laboratoire non végétalisé, et d'essais à grande échelle sur canaux végétalisés alimentés par des vitesses d'écoulement élevées, que la solution proposée devait avoir montré ses capacités de résistance à un écoulement de vitesse et de durée données.

ESSAIS DE PERFORMANCE RÉALISÉS SANS VÉGÉTATION

Il convenait ici de se placer dans le cas de figure le plus défavorable, c'est-à-dire de tester le revêtement de protection sur un sol particulièrement sensible à l'érosion hydraulique, en l'occurrence un sable de rivière non cohésif. La vitesse critique est définie comme la vitesse à laquelle le lit de sable commence à s'éroder ou à traverser le revêtement testé. La compilation de l'ensemble de ces résultats d'essais a permis d'établir un abaque fournissant, pour les différentes protections testées sans végétation, la vitesse de courant maximale admissible en fonction de la durée de l'événement ou de la phase transitoire non végétalisée. Il en ressort notamment que le sable de rivière non cohésif de $d_{50} = 0,60$ mm protégé par

le géomatelas EnkaMat A20 résiste pendant 10 h à une vitesse de courant de 2,5 m/s, vitesse maximale testée.

ESSAIS RÉALISÉS AVEC VÉGÉTATION

L'expérimentation s'est déroulée sur 10 canaux de section trapézoïdale de base 1 m, de profondeur 0,70 m avec flancs à 1H/1V, d'une longueur de 25 m, selon une pente de 2,5H/1V. Le sol support est une terre végétale permettant la bonne croissance des plantes herbacées. Le mélange herbacé est constitué de 40% de ray-grass, 30 % de fétuque rouge traçante, 20 % d'herbe des prés à tige lisse, 10 % d'agrostis stolonifère.

Les vitesses d'écoulement ont été mesurées à mi-profondeur, au centre du canal. L'essai comporte 3 phases de $\frac{3}{4}$ h, 1 h $\frac{1}{2}$ et 3 h, soit une durée totale maximale de 5 h $\frac{1}{4}$.

Sur le canal sans protection, la végétation fut endommagée pendant l'essai réalisé à 2,8 m/s avec la mise à nu en

surface des racines de certains plants de graminées et l'apparition d'affouillements ; la rupture est ensuite intervenue après 25 min pour une vitesse d'écoulement de 3,7 m/s, il y a eu localement arrachement du complexe sol/système racinaire et la transformation d'un affouillement en une rigole de 150 x 150 mm de section.

Sur le canal protégé par la solution EnkaMat A20, l'essai est allé jusqu'à son terme (5 h $\frac{1}{4}$) avec peu de dommages pour une vitesse de 3,9 m/s. La rupture s'est ensuite produite après 3 h $\frac{1}{4}$ d'essai, dont 2 h $\frac{1}{4}$ à 5,5 m/s et 1 h à 5,7 m/s.

LA SOLUTION ENKAMAT A20

L'EnkaMat A20 se compose d'une géonatte tridimensionnelle de 22 mm d'épaisseur, constituée de monofilaments en polyamide thermosoudés aux points de contact, spécialement dotée d'une semelle également filamenteuse pour permettre le remplissage du



Vue du géomatelas fixé avec amarres Fenox.

produit en usine avec un filtre minéral adapté, composé de gravillons calibrés et d'un liant bitumineux. La structure filamenteuse tridimensionnelle est conçue pour permettre une imbrication optimale du filtre minéral et de son liant. L'ensemble forme un géomatelas de protection végétalisable.

Cette solution présente de nombreux atouts : une grande perméabilité à l'eau qui évite les sous-pressions sous le produit, la grande porosité du produit permet également à la végétation de bien se développer au travers. Un poids propre de lestage de 20 kg/m², apporté par le filtre minéral et son liant, limite, par la contrainte induite, le déplacement des particules de sol de la berge ou du déversoir. Lors du débordement de la rivière, la forte rugosité du remplissage réduit la vitesse de l'eau au droit de la surface protégée.

L'utilisation sur ce projet d'amarres Fenox couplées à un disque en acier galvanisé comprime fortement le géomatelas sur le sol, on augmente ainsi durablement la cohésion du sol au voisinage de la surface ce qui contribue à une plus grande résistance des fixations. Cette option, avec une cadence de pose usuelle de plus d'une fixation/minute, n'affecte pas la rapidité de pose du géomatelas de protection.



Déroulement du géomatelas EnkaMat A20 sur la digue.

La surface totale de protection mise en œuvre représente 21 700 m².

LA SOLUTION À L'ÉPREUVE DES CRUES

BRL ingénierie s'est appuyé sur son retour d'expérience obtenu en restauration de berges sur les rivières Aude, Alzon et Les Seynes, pour prescrire la solution géosynthétique EnkaMat A20.

Rivières Alzon et Les Seynes (Gard)

Les travaux de restauration de berges avec géomatelas concernaient deux sites : l'un sur le cours d'eau Alzon au

lieu-dit « Pont-des-Charrettes » sur la commune d'Uzès, l'autre sur le cours d'eau Les Seynes situé dans la traversée de la localité de Serviers-et-Labaume. Les travaux ont consisté au remodelage de la berge et à sa protection par technique mixte comprenant génie végétal et génie civil. Sur les zones de plus fortes vitesses (à l'aval direct des ouvrages), le choix s'est porté sur la mise en œuvre du géomatelas EnkaMat A20. Cette solution offrait l'avantage de pouvoir être réalisée sans accès direct en pied ou crête de berge pour un engin. La protection est déroulée ...



terrasol

setec

L'ingénierie géotechnique à forte valeur ajoutée

www.terrasol.com



INGÉNIERIE
FORMATIONS
LOGICIELS

» Conception, Maîtrise d'œuvre, Expertise
Développement, Assistance technique «

Terrasol est un leader reconnu dans le domaine de **l'ingénierie géotechnique**, en France comme à l'étranger.

Parmi nos références récentes en France : Grand Paris Express, Eole, Quais Joannès Couvert et Hermant du Pasquier au Havre, Canal Seine Nord Europe, Projet Lyon Part-Dieu, Liaison ferroviaire Lyon-Turin, Déviation de Tarascon sur Ariège, Projet Cigéo à Bure, Dunkerque Cap 2020, Pont du Larivot, Galerie de la Sarenne, Bassin d'Austerlitz...

Et à l'international : Ligne à Grande Vitesse HS2 (UK), Tanger Med 2 (Maroc), EPR Hinkley Point et Sizewell (UK), Pénétrante de Tizi Ouzou (Algérie), Tour F (Abidjan), Tunnel Visnove (Slovaquie), Adia Tower (Emirats Arabes Unis), TER de Dakar (Sénégal)...

	<p>Paris</p> <p>Tél : +33 (0)1 82 51 52 00 Fax : +33 (0)1 82 51 52 99 Email : terrasol@setec.com</p>	<p>Lyon</p> <p>Tél : +33 (0)4 27 85 49 35 Fax : +33 (0)4 27 85 49 36 Email : terrasol@setec.com</p>	<p>Maroc</p> <p>Tél : +212 (661) 16 20 78 Fax : +212 (537) 77 48 41 Email : ahmed.skalisenhaji@setec.com</p>
	<p>Tunisie</p> <p>Tél : +278 71 23 63 14 Fax : +256 71 75 32 88 Email : info@terrasol.com.tn</p>		

grâce à une grue automotrice et un palonnier. Le délai de mise en œuvre de cette protection est rapide par rapport à une protection classique. La possibilité d'occurrence de crues pendant la durée du chantier imposait la plus grande vigilance de la part des intervenants.

Le site du Pont-des-Charettes était le plus complexe. Le talus à conforter s'apparentait à un remblai de type décharge dont la purge partielle, prévue dans le cadre des travaux, s'avérait délicate. Il n'existait aucun élément sur les types de matériaux ou autres éléments entresposés. L'accès au site pour les engins de chantier n'a pu se faire que par la rive droite, les entreprises ont donc dû prévoir une ou plusieurs traversées de cours d'eau (mise en place de gués temporaires) pour accéder à la berge concernée par les travaux de protection les plus importants. Les entreprises devaient veiller à conserver au pied des berges traitées, les arbres les plus intéressants pour la stabilité du talus et la qualité paysagère du site.

Le site de Serviers et Labaume concerne la traversée du village avec une intensité de travaux et techniques de protection variables sur les linéaires. La rive droite est celle qui est concernée par les travaux de confortement les plus importants. Le traitement paysager est particulièrement important en traversée de village. Là encore, il était attendu un soin particulier en ce qui concerne la mise en œuvre des protections afin d'aboutir à une reconquête la plus naturelle possible des talus.

Les berges traitées sont constituées de matériaux d'apport limoneux de type A1 et A2. Ils sont mis en œuvre après la purge et l'évacuation en décharge des matériaux présents sur site et impropres à une réutilisation (déchets, gravats, souches...). Une fois les remblais réalisés et le génie végétal mis en œuvre, les talus sontensemencés. Le mélange de semences est constitué de 30 % de raygrass, 15 % de fétuque rouge, 15 % de fétuque élevée, 10 % de fétuque traçante, 10 % de Plantin, 10 % de Lotier et 10 % d'agrostis, il a été appliqué par hydro-ensemencement. La dernière étape consiste à mettre les protections de surface. Ces dernières sont fixées aux remblais par la mise en œuvre de cavaliers en acier et d'ancres harpons en complément pour le géomatelas.

Après les événements climatiques locaux de la dernière décennie, notamment les crues de 2014 de l'Alzon, aucun dégât n'a été constaté.

Rivière Aude à Coursan (Aude)

Les aménagements consistent à stabiliser et protéger la berge rive gauche



Vue de la digue après végétalisation du géomatelas.

de l'Aude dans la traversée de Coursan sur environ 200 m en aval immédiat du pont de la voie ferrée. Dégradée lors des crues annuelles, la berge était affectée par des glissements de peau et des érosions qui menaçaient les habitations situées sur la crête. Les travaux ont eu pour objet le remodelage de la berge et la protection de celle-ci par technique mixte comprenant génie végétal et génie civil.

À l'aval direct du pont RFF, là où les sollicitations sont les plus fortes, le talus fut protégé par un géomatelas EnkaMat A20. Le choix de cette technique découle également du fait de la pente de talus plus raide qu'en section courante et des difficultés d'accès pour la mise en œuvre. Préalablement à la mise en œuvre du géomatelas, la surface est hydro-ensemencée avec un mélange de semences constitué de 40 % de raygrass, 30 % de fétuque élevée et 30 % de fétuque traçante.

L'Aude a également connu il y a quelques années une crue vicennale, +8,00 m environ de niveau d'eau à Coursan et des vitesses de l'ordre de 2,5 m/s. Aucun désordre n'a été constaté.

À cette époque, l'hydrogramme de l'Aude à Coursan présentait un plateau de crue à plus de 8 m se maintenant entre le 15 octobre 14 h (avec 8,10 m) et le 16 octobre 16 h (avec 8,09 m), soit pendant 26 heures, avec un maximum de 8,5 m entre 23 h et 3 h, avec un débit passant de 23 m³/s à plus de 600 m³/s en 8 h. Cette hauteur est légèrement supérieure à celle de la plus haute crue référencée (le 11 octobre 2010) sur cette station de jaugeage. La berge protégée ne présente pas de signe d'endommagement après cet événement exceptionnel.

La pérennité de ces protections confirme les choix réalisés au moment

des études. Le géomatelas EnkaMat A20 permet de réaliser des protections de surface de berges et digues dans des zones difficiles d'accès, dans un délai réduit et avec un aspect végétalisé à terme. Reste que cette solution ne doit pas être généralisée, mais étudiée au cas par cas en fonction des conditions hydrauliques, géotechniques, topographiques et géomorphologiques. De nombreux essais hydrauliques ont été réalisés dans différents laboratoires, puis à grande échelle, pour la mise au point de ce géomatelas. Ils ont permis de déterminer son champ d'application et d'établir ses performances, mais aussi d'identifier les points-clés de sa conception, à savoir une forte perméabilité à l'eau pour éviter les sous-pressions, un poids de lestage de 20 kg/m² pour empêcher le déplacement des particules du sol support, et une grande rugosité du matériau de remplissage pour réduire la vitesse de l'eau au contact de la surface protégée. De nombreuses réalisations, notamment dans le sud de la France, ont permis aux bureaux d'études spécialisés d'avoir un retour d'expérience concluant face à des événements climatiques exceptionnels et de reconduire cette solution de protection végétalisable, aussi bien en berge de rivière qu'en aval de digue soumise à la submersion. ■

Alain Hérault

Application Manager Enka Solutions
Global Business Unit Building &
Construction
Freudenberg

Miguel Fernandes

Ingénieur confirmé, chargé d'études
spécialisées dans le suivi des travaux sur
les projets liés aux inondations
BRL Ingénierie

CONCEPTION • INSTALLATION • ACCOMPAGNEMENT POUR VOTRE LABORATOIRE

Ils nous ont fait confiance !

CNERTP - COTONOU (BEN) | BOUYGUES TP | ALIOS
MATERIEL EQUIPEMENT | CESFA | ANTEA France -
ORLEANS | ANTEMYS | LHCC (AL) | UNIVERSITE DU HAVRE | APC INGENIERIE | BTP CFA PACA | CEREMA - BRON |
ACCOTEC | SOL STRUCTURE | CEREMA DTER Méditerranée | CEREMA DTER Normandie Centre | FONDASOL | ESTP
DIJON | CEREMA DTER OCCITANIE | IUT REIMS | CEREMA HAUTS DE FRANCE | CEREMA - TRAPPES | SOL SOLUTION
| CESI ASSOCIATION Region OUEST | CESI ASSOCIATION - REGION SUD-EST | SOCIETE DU CANAL DE PROVENCE |
GINGER CEBTP | CNRS GEOAZUR | CNRS - ISTO | CY CERGY PARIS UNIVERSITE | UNIVERSITE GUSTAVE EIFFEL - NANTES
| DE CERENVILLE GEOTECHNIQUE SA (CH) | TERREFORT SAS | E3MG DE MOANDA (GA) | INSA - ROUEN NORMANDIE
| ECOLE CENTRALE DE NANTES | ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES | RINCENT BTP SERVICE | ECOLE
POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE (CH) | UNIVERSITE DE SHERBROOKE (CA) | ECR ENVIRONNEMENT SUD
OUEST | EDF DIRECTION INDUSTRIELLE - TEGG | EGIS STRUCTURES & ENVIRONNEMENT | UNIVERSITE de FRANCHE-
COMTE | EIFFAGE INFRASTRUCTURES GD | ROUTE | IUT DU LIMOUSIN | ENISE | ENSAM | ENS
CACHAN | ENTRE | LABORATOIRE | CBTP | EPG GEOTECHNIQUE | ESIRIS IDF GEO | UNISOL |
ESITC CAEN | ESTP CACHAN | SAFE | ESTP PARIS - CAMPUS DE TROYES |
FONDOLIEUX NORMANDIE | LCTP (AL) | FUGRO BELGIUM SRL |
FUGRO FRANCE | GEOCENTRE | GEO EST | GEOLIA |
GEOLITHE | IRSN | GEOLITHE
OCEAN INDIEN | GEO S LAB |
GEOTEC DIJON | GEOTEC |
AFRIQUE | - GUINEE |
GEOTEC | BORDEAUX | IFP
EN | GEOTEC GUYANE | HEIG -
VD (CH) | GEOTEC
- NORD-OUEST / PARIS | GEOTEC - RHONE-ALPES | GRENOBLE INP - INSTITUT POLYTECHNIQUE
DE GRENOBLE | UNIVERSITY GENT (BE) | HYDROGEOTECHNIQUE CENTRE | LNHC (AL) | HYDROGEOTECHNIQUE NORD
OUEST | IFREMER Centre Bretagne | TRANSLAB LABORATORIUM (BE) | INGELABO - SAGA Ingénierie | INSA - LYON
| SOL ESSAIS | INSA - STRASBOURG | INSA - TOULOUSE | Institut Polytechnique UNILASALLE | IUT AMIENS | IUT
BETHUNE | IUT ST NAZAIRE | KARAKAS & FRANCAIS SA (CH) | LABORATOIRE 3SR | LABOROUTE CHAMPAGNE-ARDENNE
| LAFARGE Centre de Recherche | LBTP COTE D'IVOIRE | LE CNAM | LNBTP HAITI | LPEE (MA) | ENI BIZERTE
(TU) | NEXTROAD ENGINEERING | ORANO MINING | POLYTECH LILLE - UNIVERSITE DE LILLE | ROGER MARTIN SAS |
LNBTP ABIDJAN (CI) | SAGE - SOCIETE ALPINE DE GEOTECHNIQUE | SOGETEC INGENIERIE | SORBONNE UNIVERSITE |
TECHNOSOL | TERREFORT | UNIVERSITE CATHOLIQUE LOUVAIN (BE) | UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE | UNIVERSITE
DE LA ROCHELLE | UNIVERSITE DE LORRAINE | UNIVERSITE DE MONTPELLIER | UNIVERSITE DE PAU & DES PAYS DE
L'ADOUR | UNIVERSITE DE POITIERS | UNIVERSITE GUSTAVE EIFFEL | LACS | UNIVERSITE LIBRE DE BRUXELLES (BE)
| UNIVERSITE SAVOIE MONT BLANC | UNIVERSITE TOULOUSE III - PAUL SABATIER | UNIVERSITY OF CALGARY (CA) |
FACULTE DES SCIENCES HAITI | GEOTECHNIQUE SAS | COSIDER (AL) | LTPS (AL) ..

Sols Mesures Géotechnique & Agronomie

À La Rochelle, renforcement du quai jetée sud du terminal Chef de baie 4

Un diagnostic de la jetée réalisé en 2018 a mis en évidence des dégradations de la maçonnerie, principalement dues au vieillissement des matériaux. La régénération des maçonneries sur la totalité de l'ouvrage par injections du corps de la jetée est donc apparue nécessaire. Des travaux dont se sont chargés le groupement Merceron TP et Spie Batignolles fondations.

Démarré en novembre 2021 et achevé en juin 2022, ce chantier de confortement de la jetée Chef de baie 4 du grand port maritime de La Rochelle aura mobilisé au total plus de 50 personnes.

Les travaux qui ont donc duré 7 mois ont consisté au renforcement de la jetée, après reprise des parements maçonnés, par injection du corps de maçonnerie ; à la mise en œuvre d'ancrages verticaux et inclinés descendus jusque dans le substratum, ainsi que la construction d'une dalle et d'une poutre de couronnement en béton armé ; et à la « remise à niveau » du poste d'accostage (dépose des équipements existants, réparation/reconstruction des massifs d'accostage en béton armé, fourniture et mise en œuvre de bollards d'amarrage et défenses d'accostage).



Vue aérienne du chantier.

UN PROJET AUX MULTIPLES CONTRAINTES

Durant toute la phase des travaux, ce site sensible est resté en exploitation avec la présence des usagers du terminal, la circulation d'engins, et la présence de la faune et de la flore aquatiques. Des contraintes qui ont nécessité la mise en place de mesures environnementales et hydrologiques spécifiques ; ainsi qu'une bathymétrie monofaisceau bifréquence (210 - 33 kHz) qui a été effectuée avant le démarrage des travaux (bathymétrie initiale) et une autre à la fin des travaux (bathymétrie finale).

En effet, du point de vue environnemental, les travaux étant situés près d'un milieu aquatique, aucun stockage de produit dangereux n'était possible à proximité de l'estran. Les eaux issues de la base vie de chantier ont été stockées en cuves étanches et pompées pour leur retraitement (pas de fosse avec filtre). Des bennes à déchets étaient mises à demeure sur le chantier de manière à respecter le tri sélectif. De plus l'ensemble des personnels présents sur le site des travaux avait la charge de veiller à la bonne tenue du chantier et au respect des règles environnementales.

Quant aux mesures hydrologiques, les travaux se déroulant en zone de marnage, le planning et phasage des travaux a été conçu en tenant compte de cette contrainte. Lors d'épisodes de mauvaises conditions hydrologiques, une équipe d'astreinte a été mise en place et l'ensemble des coordonnées diffusé au maître d'œuvre. Cette équipe était composée au minimum

du chef de chantier et de conducteurs d'engins. Lors de ces astreintes, l'entreprise s'était engagée à faire intervenir sur place son équipe en moins de deux heures, l'ingénieur responsable du chantier devant être joignable par téléphone et ayant la responsabilité de la coordination.

MÉTHODE DE RÉALISATION : NETTOYAGE ET DÉCAPAGE

Afin de délimiter les reprises des ouvrages, l'ensemble des zones concernées a été dans un premier temps identifié et nettoyé. Les murs ont été grattés sur l'ensemble de la surface pour retirer des résidus de coquillages et autres déchets. Ceci a été complété par un nettoyage haute pression sur l'ensemble de la surface en fonction des marées.

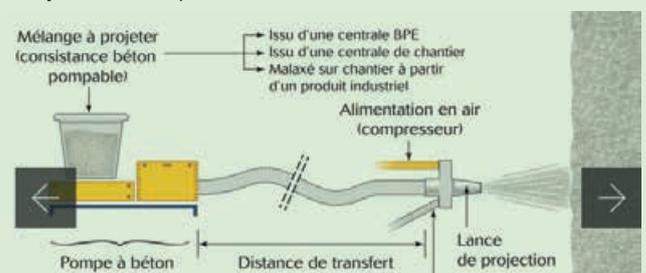
À l'issue de ce nettoyage, un mètre a été réalisé par un géomètre. Selon les zones, un ponton flottant ou un échafaudage négatif était nécessaire. Le même dispositif a été utilisé pour la reprise de joints et fractures au sein de l'ouvrage.

DÉMOLITION ET REJOINTEMENT

L'ouvrage est constitué d'un muret et d'une poutre de couronnement en béton devant être démolis. La première étape de ces travaux, une fois les équipements du quai démontés, a consisté au démantèlement de tous ces éléments en béton. Les déchets issus de cette déconstruction ont été triés et amenés en décharge sur le port de La Rochelle. La paroi a été préparée par sondage et grattage à la truelle de toutes les parties qui n'adhéraient plus, avec un piquetage des joints à la massette et au burin sur 1 à 3 cm de profondeur, selon l'aspect désiré. Le mortier de rejointoiement livré en sacs, a été versé dans la projeteuse à l'aide d'une pelle. Enfin, et avant la projection du mortier, le mur a été humidifié afin d'en favoriser l'accrochage. La température de mise en œuvre de l'air et du support devant être comprise entre + 5 et + 35 °C.

RAGRÉAGE DE SURFACES

Le béton projeté a été réalisé avec une projeteuse électrique. Afin de pouvoir accéder à la paroi du musoir, la mise en œuvre d'un échafaudage négatif a été nécessaire. L'approvisionnement de cette partie du chantier se faisait depuis le dessus du musoir. Le mélange qui a été projeté était composé de ciment, de sable, de graviers ou de gravillons et éventuellement d'eau, d'adjuvant ainsi que de fibres. ●●●





ArcelorMittal

EcoSheetPile™ Plus

La solution acier durable

XCarb®

De sources recyclées et renouvelables



Digue du Serrioz, Aix-les-Bains | France, 2019 ©NGE Fondations

Réduisez l'impact environnemental de vos projets avec les palplanches acier **EcoSheetPile™ Plus**.

Fabriquées à partir d'acier 100% recyclé et 100% d'électricité certifiée de sources renouvelables, leur production émet jusqu'à 81% de gaz à effet de serre de moins que les aciers conventionnels*.



Scanner pour plus d'information

ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l. | T +352 5313 3105 | +33 (0)3 82 59 11 20
palplanches@arcelormittal.com | palplanches.arcelormittal.com

*Référence : DEP pour les palplanches disponibles en Europe

Dans le cas de la projection par voie sèche, le mélange sec ou légèrement humide et de consistance pulvérulente était introduit dans la machine de malaxage. Le transfert du mélange de la machine jusqu'à la lance était assuré par un flux d'air comprimé (transfert à grande vitesse). L'eau était ajoutée à la lance.

TRAVAUX D'INJECTIONS

Modèle géotechnique retenu

Conformément à la campagne de reconnaissances menée sur l'ouvrage, le modèle géotechnique retenu au droit de la jetée peut être synthétisé comme suit :

Pour la zone A fondée au large :

Formation	Cote de la base (CM)	EM (MPa)	PI* (MPa)	K (m/s)
Maçonnerie calcaire avec mortier fracturée	+4.4 à +5.5	-	-	8.4×10^{-7} à 3×10^{-5}
Maçonnerie calcaire avec ciment très fracturée	-1.3 à -1.0	-	-	10^{-7} à 10^{-5}
Calcaire marneux très fracturé / décomprimé	Variable	3	0.28	-
Calcaire marneux	Non définie	39-223	5.58 à >9.8	-

Pour la zone B fondée à la marée :

Formation	Cote de la base (CM)	EM (MPa)	PI* (MPa)	K (m/s)
Maçonnerie calcaire avec chaux hydraulique fracturée à très fracturée	+4.5 à +5.5	-	-	10^{-5} à 5×10^{-5}
Maçonnerie calcaire avec ciment fracturée à très fracturée	+0.4 à +0.9	-	-	2×10^{-5} à 2×10^{-6}
Calcaire marneux	Non définie	39-223	5.58 à >9.8	-

Le niveau de la plateforme de travail lors des travaux d'injections est situé environ à la cote + 8,4 m CM. Certains forages ont été réalisés à marée basse, en particulier ceux nécessitant d'être forés depuis la cote + 6,4 m CM.

PRINCIPE DES TRAVAUX D'INJECTIONS

Les injections au sein des maçonneries et du calcaire marneux ont eu pour but de conforter l'ouvrage et d'en apporter une homogénéité en comblant les vides. Préalablement aux injections, une planche d'essai a été effectuée afin de comparer différentes techniques de forage et de valider les caractéristiques du coulis à mettre en œuvre lors des travaux d'injections.



Atelier de forage.

© Merceron TP/Spie batignolles fondations

Les travaux ont intéressé un linéaire total d'environ 157 ml de quai, sur la base de forages espacés de 3 m dans le sens longitudinal de la jetée. L'ensemble des forages s'ancrent de 1,5 ml dans le calcaire marneux, à l'exception de la zone présentant des calcaires décomprimés (sur les 30 ml à l'extrémité Ouest de la jetée) pour laquelle l'ancre est de 5 ml.



Alignement des forages.

© Merceron TP/Spie batignolles fondations

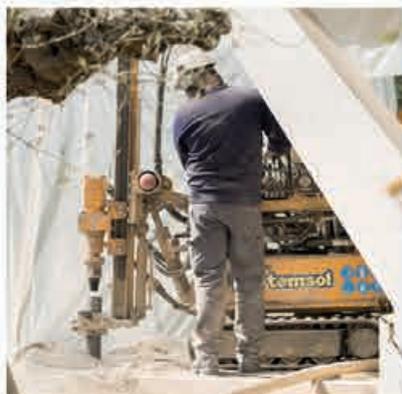
FORAGE

Les 237 forages ont été réalisés à travers la maçonnerie puis le calcaire marneux en diamètre 80 mm à l'aide de 2 foreuses de type MC600 et SM14 (pour un linéaire de 2 400 ml).

La méthodologie de forage adoptée à la suite de la réalisation de la planche d'essai a consisté au forage à l'eau en rotation (tricône). En effet, au regard de l'état de la jetée, il était impératif de limiter tout désordre ou déstabilisation de l'ouvrage par le biais d'éventuelles vibrations. Une fois le forage terminé, celui-ci était équipé d'un tube à manchettes métallique de diamètre extérieur 60,3 mm qui permet dans un premier temps d'injecter le coulis, puis d'y sceller la barre d'ancre. ...



L'ESSENTIEL DES FONDATIONS



- SONDAGES
- FONDATIONS SPÉCIALES
- REPRISE EN SOUS-ŒUVRE
- SOUTÈNEMENTS
- RENFORCEMENT ET RÉPARATION DE STRUCTURES
- INJECTIONS

NOS IMPLANTATIONS



- Agences existantes
- Agences en cours de création

NOUS CONTACTER

www.temsol.com
contact@temsol.com





© Merceron IP/Spie batignolles fondations

Centrale d'injection.

INJECTIONS

Après l'équipement du forage, un coulis de bentonite-ciment dosé à 750 kg/m³ a été fabriqué à l'aide d'une centrale automatique puis injecté par des presses PH2x5 capables de développer une pression atteignant les 50 bars. L'injection se faisait alors à travers le tube à manchettes à l'aide d'un obturateur par passes de 2 ml.

En effet, ce procédé adapté à la régénération de maçonnerie permet de traiter avec précision la hauteur visée en ciblant l'injection sur chacune des passes, tout en adaptant les paramètres d'injection en fonction des données mesurées en direct par la centrale. Ceci permet donc de contrôler l'injection et de l'adapter en fonction de la réaction du terrain (notamment à travers des paramètres débit/volume/pression).

Une fois que la pression d'injection atteignait le seuil d'arrêt de 200 kPa sous débit réduit, l'injection était alors terminée.

En parallèle de l'injection, plusieurs moyens ont été mis en place afin de limiter les risques de fuite du coulis à l'extérieur de la zone à traiter :

- Le rejointoiement des maçonneries avant les travaux d'injections créait une enceinte relativement étanche autour de la surface à traiter ;

- Un phasage adapté, comprenant en premier lieu des injections périphériques puis le traitement à l'intérieur, permettait d'emprisonner le coulis injecté dans la maçonnerie et le rocher sous-jacent et d'en limiter la propagation à l'extérieur de la zone à traiter.

Tout au long des travaux d'injections, les paramètres de forage et d'injections étaient enregistrés afin de contrôler

toute anomalie éventuelle pouvant survenir, en particulier dans le cas de chute de pression soudaine. Un contrôle visuel systématique des résurgences était réalisé afin de limiter les déperditions du coulis à l'extérieur de la zone à traiter. Dans le cas où un phénomène de résurgence était observé ou que le volume injecté dépassait 40 à 60 l/ml de forage (sans atteindre la valeur de pression seuil définie comme critère d'arrêt), l'injection était alors arrêtée, puis reprise 6 à 8 h après. Le but était de limiter la propagation du coulis à l'extérieur de la zone visée. En outre, en surface, des éléments de protection ont été installés en bord de jetée afin d'éviter tout déversement de déblais ou coulis dans l'eau.

Tout au long des travaux d'injections, des contrôles réguliers étaient menés sur le coulis mis en œuvre, afin d'en vérifier la qualité : densité, viscosité, dosage, résistance à la compression simple (6 éprouvettes par semaine).

Enfin, une fois l'injection terminée, une barre de type HA32 était descendue dans le forage avec une pelle mécanique munie d'un palonnier tant que le coulis était frais. Cette barre était mise en œuvre en un seul élément du fait du petit diamètre du forage. Elle permet de conforter la maçonnerie en la consolidant au calcaire marneux sous-jacent.

MISE EN ŒUVRE DES OUVRAGES BÉTON

Le projet était composé de plusieurs ouvrages béton à réaliser. Ces travaux ont été exécutés à la suite des travaux de forage et d'injections. Le premier élément béton mis en place était la poutre de couronnement, amenée préfabriquée depuis l'usine sur un lit de béton (propreté). Dans un second temps, une

dalle de 30 cm d'épaisseur était réalisée sur un béton de propreté préalablement coulé et recouvert d'un gros béton afin de pouvoir appliquer par la suite une couche de roulement en béton bitumineux. Le coulage du béton s'effectuait à l'aide de toupies avec tapis.

RÉNOVATION DES REDANS

La réhabilitation et création des redans nécessitaient des interventions en zones immergées, des plongeurs étaient nécessaires afin de réaliser cette partie des travaux. Un coffrage métallique était réalisé en atelier et mis en place sur le chantier à l'aide de la grue 70 t. Des plongeurs intervenaient afin de positionner le coffrage correctement. Le coulage du béton était réalisé depuis le haut de la jetée grâce à une pompe à béton, toujours à l'aide de plongeurs afin de mener au mieux cette opération. Les redans étaient réalisés en deux étapes : la partie basse dans un premier temps, puis la partie haute.

INSTALLATION DES ÉQUIPEMENTS

Les anciens équipements (bollards, échelles et défenses) présents sur le quai ont été démontés au début des travaux. Les nouveaux équipements étaient installés à la fin du chantier et respectent les implantations voulues. Huit nouveaux bollards de 20 t ont été positionnés sur la jetée, espacés de 15 m. Ils assurent l'amarrage des navires. Ils sont ancrés dans la poutre de couronnement à l'aide de tiges d'ancrages. Les échelles ont été mises en place par scellement dans le béton. Les échelons sont espacés de 25 cm et complétés par des poignées en surface. Ils sont galvanisés à chaud afin d'éviter toute corrosion.

Le système de défense vient protéger les redans de l'effort d'accostage des navires. Il est composé de deux éléments :

- une partie flottante en mousse située en partie haute ;
- une seconde cylindrique en partie basse assurant une sécurité anti-impact.

MISE EN ŒUVRE D'ENROBÉ ET ÉTANCHÉITÉ

Un complexe d'étanchéité de 3 cm d'épaisseur a pris place entre la dalle en béton armé et l'assise en gros béton de l'enrobé. Une couche de roulement en enrobé BBSG 0/10 de 6 cm est venue recouvrir la surface du quai. ■

Christophe Bienbeau

Directeur d'activités
Spie Batignolles Fondations

... Starting the future today, **together!**



MITO40

POIDS: 8 Tonnes - 120 Hp



FONDATIONS



AGENT POUR LA FRANCE

DPMF MATÉRIEL DE FORAGE
296 Zac du Baconnet
Allée des Érables, 67900 Montagny

Tel. 04 72 24 22 27
www.dpmf.fr
info@dpmf.fr



www.fraste.com



La surveillance par interférométrie de bruit sismique : un nouvel outil pour l'analyse d'intégrité de barrages

La surveillance de l'intégrité de digues ou barrages représente un enjeu majeur pour les producteurs d'hydroélectricité et les industries minières. En effet, l'effondrement de tels ouvrages non courants peut provoquer d'importantes pertes humaines, économiques et des dommages écologiques. En 2019, le désastre du barrage de résidus minier du Brumadinho, au Brésil, en est un triste exemple.

Sisprobe⁽¹⁾, startup internationale dans le domaine de la géophysique et filiale du groupe Egis, utilise et développe l'interférométrie de bruit sismique ambiant afin de prévenir au mieux ces événements, ou encore détecter des fuites ou une érosion interne dans un barrage.

Elle utilise aussi cette technique dans les domaines de la prévention des risques sismique, de l'exploration minière, de la géothermie et de la séquestration de CO₂.

Dans cet article, nous expliquerons d'abord la technique utilisée par Sisprobe, en définissant ce qu'est le bruit sismique ambiant et en présentant la technique d'interférométrie, puis nous l'illustrerons avec un exemple d'application.

LE BRUIT SISMIQUE AMBIANT

L'interférométrie de bruit sismique ambiant est basée sur les vibrations qui traversent la terre en permanence (voir figure 1). Les sources de ces vibrations sont :

- l'activité humaine (passage de véhicules, machines...);
- l'environnement naturel (tempêtes océaniques, vagues, vent dans les arbres...).

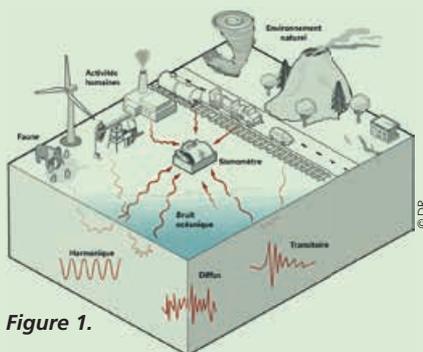


Figure 1.

Cette figure schématise les différentes sources de bruit sismique. Le bruit sismique est composé d'une somme de différents signaux : harmoniques (mono-fréquentiel), diffus (signaux

multiplement réfractés) et transitoires (signaux passagers comme un tremblement de terre). Ces signaux ont pour origine différentes sources : environnement naturel et les activités humaines.

En parcourant le sol, ces vibrations sont influencées par les différents matériaux qu'elles traversent et cumulent des informations sur leurs propriétés mécaniques : porosité, pression de pore, saturation en eau.

Ces vibrations peuvent être enregistrées par des fibres optiques via une mesure distribuée acoustique (connu aussi sous son acronyme anglais DAS – « Distributed Acoustic Sensing ») ou par des sismomètres. Ces enregistrements sont réalisés sur demande ou en continu si nécessaire, en fonction de la résolution temporelle désirée. Ils ne nécessitent pas d'intervention humaine ni de source contrôlée contrairement à des expérimentations de sismique passive.

De plus, pour le cas de la fibre optique, il est possible de profiter de fibres déjà installées dans des barrages ou des digues ; il suffit ensuite d'y brancher un enregistreur DAS.

Un autre avantage de la fibre optique est qu'il est possible d'utiliser plusieurs dizaines de kilomètres de fibre et d'obtenir des points de mesure tous les mètres si nécessaire.

L'INTERFÉROMÉTRIE DE BRUIT SISMIQUE AMBIANT

L'application de l'interférométrie de bruit sismique ambiant à ces enregistrements permet de mesurer les vitesses des ondes sismiques dans un barrage ou en profondeur sous la surface. Ces vitesses nous donnent des informations sur les propriétés mécaniques des matériaux.

De plus, l'étude des changements de vitesses sismiques dans le temps peut fournir des informations sur les changements de saturation en eau (invasion d'eau, fuite) ou des changements structuraux (fissuration, érosion).

Plus concrètement, l'interférométrie est basée sur l'opération de corrélation croisée de deux signaux de bruit sismique enregistrés par deux capteurs. Cette opération permet de reconstruire la réponse sismique des sols entre ces deux capteurs : c'est comme si l'un des capteurs était une source et l'autre un récepteur. On obtient donc la trace sismique enregistrée par le récepteur et qui représente la réponse des sols entre ces deux capteurs (voir figure 2). Cette figure montre deux capteurs A et B enregistrant du bruit sismique (représenté par les flèches noires ondulées). Les signaux enregistrés par les stations A et B sont représentés par les traces en noir (en bas). Une fois ces deux traces corrélées, on obtient la trace en rouge. La partie droite représente un signal qui s'est propagé de A vers B (A comme source, et B comme récepteur), et vice versa pour la partie gauche.

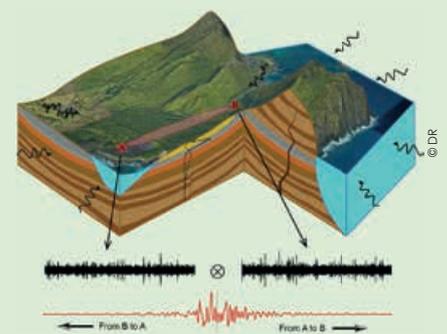


Figure 2.

Tout comme une trace sismique d'un tremblement de terre ou d'une source artificielle, la trace obtenue par corrélation croisée est composée de plusieurs types d'ondes. En théorie, elle peut être composée d'ondes P, S, ondes de surface (Rayleigh et Love) et coda. En pratique, ce sont les ondes de surface et de coda qui sont les mieux reconstruites.

Pour le cas des ondes de surface, elles nous permettent de mesurer la vitesse des ondes S (notée V_s) en ●●●

Le Banc de charges : un outil TECHNO PIEUX

Techno Pieux est une technologie qui nous vient du Québec. Importé en France sous sa forme actuelle il y a déjà 25 ans, le « Techno Pieux » ne cesse de surprendre : simple et efficace. Et puis, il interroge aussi : est-ce que ces « morceaux » de tube vont vraiment pouvoir supporter ma construction ? Il faut avouer qu'il y a de quoi se poser la question : il nous faut des preuves. Pour cela, essayons de comprendre ce qu'est un « Techno Pieux ».

Le Techno Pieux est avant tout un appui capable de reprendre des charges. Les efforts appliqués en tête du Techno Pieux et occasionnés par la structure supportée sont principalement des efforts de compression. Nous retrouvons ici le poids des éléments constitutifs de la construction, les charges d'exploitation, les charges climatiques, etc. Et point caractéristique de leur conception, les Techno Pieux sont pourvus d'une hélice en pied de fût permettant, certes, le fonçage par vissage du pieu, mais surtout cette hélice leur procure une excellente tenue à l'arrachement. C'est pourquoi nous les retrouvons régulièrement dans tous les ouvrages nécessitant des tirants ou soumis à des prises au vent.

Exceptionnel ! Une fois le Techno Pieux installé, seule sa partie émergée est visible, et lors de l'enfoncement l'installateur n'a que le relevé de pression de son équipement d'installation, son expérience, sa qualification et l'étude de sol pour déterminer la capacité du Techno Pieux à accepter les sollicitations pour lesquelles il a été dimensionné.

Le banc de charge Techno Pieux, voilà l'élément-clé permettant de rassurer, de vérifier, de caractériser. L'idée est de se servir de la technologie pour tester la technologie. Un banc de charge est un système composé de 3 poutres disposées en H et en appui sur 4 Techno Pieux mis en place spécifiquement à cette intention. À l'aide d'un vérin placé entre le banc de charge et le Techno Pieux test, nous appliquons des charges progressives par paliers sur le Techno Pieux testé soit en compression, soit à l'arrachement. Les Techno Pieux du banc de charges travaillent de ce fait, inversement, soit à l'arrachement, soit en compression.



RASSURER

Ici, il s'agit d'ôter tout doute d'installation lorsque l'installateur constate une incohérence entre la réaction de la machine, la pression de vissage et les données de l'étude de sol. Les motifs d'écart entre l'attendu et la réalité peuvent être multiples, depuis le défaut de vissage jusqu'à l'hétérogénéité non prévisible des couches de sol. Quel que soit le cas, l'outil à privilégier est le banc de charge dont l'exploitation des données permet de retrouver, soit l'élément défectueux du système, soit de corriger l'analyse, et, en tout cas, de constater la capacité portante réelle du Techno Pieux installé.

Nous comprenons aussi que nos clients ont besoin de comprendre, de voir, de ressentir concrètement cette capacité des Techno Pieux à reprendre les charges de leur projet, pour certains d'entre eux il est même question du projet de leur vie.

Là, la mise en charge du Techno Pieux par l'intermédiaire du banc de charge et son comportement sous la charge appliquée sont extrêmement explicites. Il faut le voir pour le croire !



VÉRIFIER

Pourquoi vérifier encore et toujours des installations par un banc de charges quand la technologie a montré, sur 3 décennies et plus de 400 000 ml de pieux installés par an dans le monde, sa fiabilité inégalée ? C'est aussi simple que la technologie Techno Pieux peut être simple : nous sommes les leaders et nous voulons le rester ! Pour cela, l'erreur ne nous est pas permise. Le banc de charge avec sa capacité à appliquer sur les pieux de l'ouvrage des charges réelles donne des résultats intangibles : le Techno Pieux peut reprendre les charges demandées.

CARACTÉRISER

Vous connaissez le secret de la technologie, il s'agit bien de ce constat génial que la portance du Techno Pieux est proportionnelle au couple de vissage. Oui ! Cependant vous conviendrez qu'entre une marne et du sable, qu'entre de l'argile et de la craie, les matériaux sont tellement différents que la corrélation doit varier quelque peu. Effectivement et c'est d'ailleurs la raison pour laquelle nos tableaux de corrélation considèrent toujours le type de sol le plus défavorable dans cette relation afin de vous proposer une installation sécurisée. Aussi, toujours dans un souci d'optimiser la qualité de nos installations et pour profiter au maximum des caractéristiques mécaniques du sol rencontré lors du vissage des Techno Pieux, il convient d'ajuster ce tableau de corrélation à la particularité du sol du projet, là encore le banc de charge Techno Pieux est l'outil idéal.

Vous l'aurez compris le banc de charge Techno Pieux, bien plus qu'un système de poutres, 4 Techno Pieux et un vérin, est l'instrument simple et essentiel au service d'une technologie simple et sûre, leader de son marché : Techno Pieux. ■

••• profondeur d'un barrage ou sous la surface du sol. Il est possible d'effectuer des images successives, à des fins de surveillance, avec une résolution temporelle de plusieurs jours.

Pour le cas de la coda, elle nous permet d'effectuer de la surveillance en quasi-continu (résolution temporelle d'une heure à un jour) des changements relatifs de V_s . Ces changements peuvent être interprétés comme des changements de saturation d'eau dans des matériaux ou des changements de structure ou encore les deux changements simultanément. Par nature, la coda est sensible à un volume. En effet c'est une onde qui s'est propagée et a été réfractée de multiples fois par les hétérogénéités du milieu. Ainsi la coda accumule de l'information et permet de détecter des changements de vitesse de l'ordre de 0,1 %.

En résumé, grâce à l'interférométrie de bruit sismique, nous avons deux techniques :

- imagerie : modèle statique 2D ou 3D des vitesses sismique V_s dans la zone d'installation des capteurs ;
- surveillance : mesure des changements relatifs de V_s dans le temps entre des paires de capteurs.

EXEMPLE D'APPLICATION SUR LE BARRAGE TEST ÄLVKARLEBY² EN SUÈDE

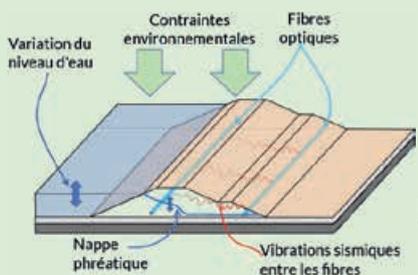


Figure 3.

L'interférométrie de bruit sismique profite des récentes avancées technologiques dans l'utilisation des fibres optiques et des DAS. Actuellement, les fibres optiques installées dans des barrages sont utilisées pour la détection de fuite en mesurant la température ou la déformation (voir figure 3). Cependant, ces mesures sont locales à la fibre et ne permettent pas d'étudier un barrage dans son volume. En utilisant le DAS et l'interférométrie, Sisprobe fournit un nouvel outil d'analyse pour la détection d'anomalies dans un volume. La figure 3 représente une digue ou barrage avec une installation de fibre optique. Les propriétés physiques du barrage sont influencées par plusieurs facteurs :

- les variations du niveau d'eau provoquent des variations du niveau des

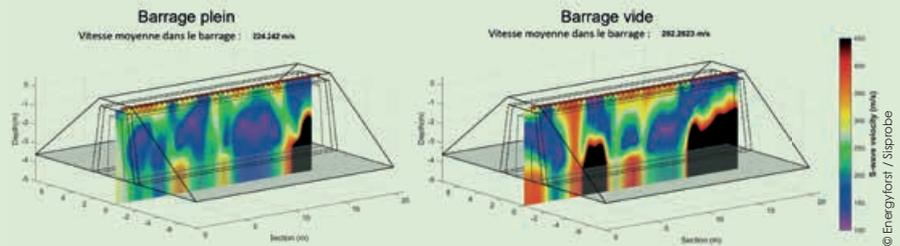


Figure 4. Image des vitesses sismiques V_s quand le barrage est plein (à gauche), quand il est vide (à droite). Les triangles rouges représentent les différents points de mesure pris en compte le long de la fibre.

nappes phréatiques et des changements de pression sur le barrage ;

- les contraintes environnementales, telles que la pluie ou les changements de pression atmosphérique.

Les changements de propriétés physiques du barrage impliquent des changements dans les vibrations sismiques. L'interférométrie sismique permet de mesurer ces changements.

Sisprobe a appliqué l'interférométrie de bruit sismique à un barrage « test » en Suède. Ce barrage a été construit délibérément avec 6 défauts et dans un environnement contrôlé. Ces défauts représentent des dommages qui pourraient conduire à une rupture du barrage. Leurs positions n'ont été communiquées qu'après la livraison des résultats. Le barrage a une longueur de 20 m et une hauteur de 3,6 m. Il est composé d'un noyau central entouré de deux zones perméables et de remblais.

Une fibre a été installée sur la crête du barrage. Un DAS a été utilisé pour enregistrer en continue des données sismiques, et l'eau contenue par le barrage a été vidée progressivement pendant la période d'enregistrement.

Deux images de V_s ont été produites : une lorsque le barrage est plein, et une autre lorsqu'il est vide (voir figure 4). On peut voir que la vitesse moyenne est plus basse quand le barrage est plein que lorsqu'il est vide. Cela s'explique par les infiltrations d'eau dans le matériau qui de manière générale provoque une diminution de V_s .

De plus, en utilisant la méthode de surveillance continue on voit que la vitesse V_s augmente avec la baisse du niveau d'eau. Cependant, les changements de vitesse ne sont pas identiques le long du barrage. Cela indique que certaines parties semblent plus ou moins réagir au changement de saturation en eau suite à la vidange.

Ces méthodes ont permis de détecter 4 défauts sur 6.

AUTRE APPLICATION : LES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Dans le domaine minier, la stabilité de

verses, glissements de terrain, de côtés inclinés en gradin dans les mines à ciel ouvert est un problème récurrent. Par exemple, à la mine à ciel ouvert de Las Cruces en Espagne, un glissement de terrain d'environ 15 millions de mètres cubes s'est produit en janvier 2019.

Tout comme pour un barrage, des fissures, infiltrations d'eau, compaction peuvent se produire dans un glissement de terrain. Ces paramètres peuvent être mesurés indirectement par l'interférométrie de bruit sismique.

Dans des expériences menées sur le terrain par Sisprobe, nous avons pu voir que la méthode de surveillance est très sensible au changement de niveau de nappe et se corrèle avec les mesures piézométriques. Comme les niveaux de nappes ou saturation d'eau peuvent être signe d'instabilité d'un glissement de terrain, alors la méthode de surveillance peut être un nouvel outil pour gérer les risques.

Dans certains cas, les niveaux de nappes ne sont pas toujours corrélés avec un glissement de terrain. Cela a été le cas pour le glissement de terrain au Pont Bourquin (Suisse) où le suivi du niveau de la nappe n'a pas été suffisant pour prévenir le glissement. Dans l'article de Mainsant et al., 2012b³, un suivi par interférométrie de bruit sismique a été réalisé et montre des signaux précurseurs au glissement.

On voit donc que l'interférométrie de bruit sismique peut apporter une information complémentaire pour la compréhension et gestion des risques lié à un glissement de terrain. ■

Roméo Courbis
Géophysicien

Olivier Gay

Directeur de Sisprobe et Département Instrumentation d'Egis Grands Ouvrages et Géotechnique

1. www.sisprobe.com

2. <https://energiforsk.se/program/dammsakerhet/rapporter/distributed-acoustic-sensing-for-detection-of-defects-2022-874/>

3. Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction (<https://doi.org/10.1029/2011JF002159>)



Construction d'un parc
d'activités tertiaire
et logistique, Trélazé

Le spécialiste de l'amélioration des sols

Menard conçoit et met en œuvre des solutions innovantes, efficaces et toujours plus respectueuses de l'environnement pour fonder et adapter au sol tout projet de construction au moyen de fondations superficielles. Nous améliorons les sols mous et compressibles afin d'offrir à vos projets des fondations solides et stables.



22 rue Jean Rostand 91400 Orsay | France
Tél. : 01 69 01 37 38

www.menardfrance.fr

Suivez-nous



menARD

DTF Géotechnique : quatre ans et déjà grande

Le 31 octobre 2022, DTF Géotechnique a fêté ses quatre ans. Créé en 2018 par Dominic Torlini, alors âgé de seulement 27 ans, le bureau d'études n'a cessé de se développer et a su se faire une place dans le monde de la géotechnique du Grand Est.

Tout juste diplômé en tant que géotechnicien, Dominic Torlini est embauché par l'entreprise Compétence Géotechnique Grand Est. Frédéric Filipe va lui faire découvrir la réalité du métier, très concrète et bien éloignée de ce qu'il avait pu entrevoir durant ses études, et faire naître chez lui une véritable passion. « J'ai commencé sur le terrain. Dans un premier temps, il m'a envoyé sur les chantiers. Après avoir fait mes preuves, j'ai commencé à réaliser des offres commerciales. Et ce n'est qu'après que j'ai réellement travaillé en tant que géotechnicien. C'était une formation un peu dure, mais une très belle expérience qui m'a beaucoup apporté et sans laquelle je n'en serais sûrement pas là aujourd'hui », raconte-t-il. Une expérience qui lui permet aujourd'hui de casser le fossé qu'il peut y avoir parfois entre le bureau et la réalité du terrain, qu'il connaît bien. Durant l'année 2012, le secteur du bâtiment est en berne et les chantiers se raréfient. La collaboration entre les deux hommes s'arrête. Dominic Torlini enchaîne alors les contrats courts dans différentes sociétés. Puis, tandis qu'il travaille dans un bureau d'études, il entend parler de la loi Élan. « J'ai alors recouru aux services d'un juriste afin de mesurer l'impact que cela aurait sur l'activité. J'avais toujours eu envie de créer mon entreprise, et j'ai pensé que c'était peut-être le moment. » C'est ainsi qu'en 2017 et 2018, il prépare son projet. « Le plus

difficile a été de trouver une assurance décennale qui accepte de travailler avec moi. J'ai déposé une cinquantaine de dossiers, et finalement une seule assurance, ORT Assurances, a cru en mon projet. » En parallèle, il obtient un prêt bancaire pour acquérir sa première machine. « J'ai acheté ma première foreuse auprès de Pascal Sauvage de Socomafor. Il a pris le projet très au sérieux et m'a traité comme tous ses autres clients. C'était très appréciable », poursuit-il. Il trouve par ailleurs un associé, Étienne Mahler. « Il a investi dans le capital de l'entreprise. C'est un ami et soutien. Il a une grande expérience dans l'entrepreneuriat et me conseille sur les grandes décisions à prendre d'un point de vue social et financier. »

Le 30 octobre 2018, DTF Géotechnique est immatriculée, et dès le 1^{er} novembre Dominic Torlini part sur ses premiers chantiers grâce à la prospection qu'il avait réalisée en amont. « J'ai voulu commencer seul, mais ce n'était pas prudent. J'ai donc embauché mon père quelques semaines avant de recruter mon premier assistant-foreur. » Les affaires démarrent bien et les résultats sont rapidement au-delà des espérances. « La première année, j'avais prévu un chiffre d'affaires de 150 000 €, et finalement nous avons fait 250 000 €. » Des résultats très encourageants que le président de l'entreprise attribue au fait d'avoir su créer l'entreprise au bon moment, avec du matériel adapté, des partenaires

fiables, mais aussi, et surtout, beaucoup de travail. En effet, Dominic Torlini ne ménage pas ses efforts et ne compte pas ses heures. « Je faisais tout : les chantiers, le commercial, l'ingénierie et l'administratif. » Mais son travail paie, et son associé lui conseille d'investir dans du matériel et d'embaucher davantage de collaborateurs.



Sur ce chantier en Alsace, DTF Géotechnique a réalisé un forage tricône avec barres 60 Craelius à la boue de bentonite, profondeur 15 m avec essais pressiométriques.

DES RESSOURCES SUPPLÉMENTAIRES

Ainsi, tous les ans, Dominic Torlini achète une nouvelle machine et embauche une équipe supplémentaire. « Nous avons commencé à deux en 2018, et aujourd'hui nous sommes 15 dont 6 techniciens et un conducteur de travaux. » Tous les collaborateurs sont en CDI, un point très important pour le gérant qui a souffert dans sa vie de salarié de contrats précaires. Le chiffre d'affaires ne cesse également de progresser. La deuxième année, DTF Géotechnique réalise 510 000 € et la 3^e année 1 150 000 €. « Nous avons ainsi pu poursuivre nos investissements. » L'entreprise bénéficie aujourd'hui d'un parc matériel adapté aux différents chantiers. Toutes les foreuses proviennent de chez Socomafor, entreprise avec laquelle le dirigeant entretient de très bons rapports. DTF Géotechnique dispose ainsi d'une foreuse de 10 ch pour les chantiers restreints et nécessitant peu de profondeur, et deux de 35 ch, équipées pour les forages profonds. « Elles sont très polyvalentes et on les envoie souvent sur les chantiers en Alsace. » Récemment le gérant a agrandi son parc de véhicules et réfléchit aux futurs



Dominic Torlini a commencé sa carrière sur le terrain au sein de l'entreprise Compétence Géotechnique Grand Est ce qui lui permet de comprendre et de maîtriser l'ensemble des projets de son entreprise.

investissements en matériel. Il attend toutefois que la vision sur le marché soit un peu plus claire. « J'investis régulièrement, mais toujours de manière mesurée et réfléchie afin d'assurer la viabilité de l'entreprise. »

De telle sorte, DTF Géotechnique dispose de tout le matériel pour réaliser des essais pénétrométriques enregistrables par système Apadyn, et des essais pressiométriques enregistrables par système Geospad 2. « Toutefois, nous travaillons plutôt à l'ancienne, sauf demande spécifique des clients. Les enregistreurs permettent de gagner en efficacité, mais



L'entreprise a investi dans 2 machines Socomafor 35 et 1 machine Socomafor 10 équipée d'un pénétromètre dynamique lourd type B avec enregistreur Apadyn.

je préfère avoir quelqu'un qui dépouille les essais. Peut-être que nous y viendrons. Mais dans tous les cas, je ne souhaite pas le "tout-tablette". Je veux que les techniciens de chantier nous voient et ainsi garder le lien. Ça me paraît capital. » Les équipes passent donc tous les jours au bureau, quitte à perdre un peu de temps. Pour compléter, Dominic Torlini a mis en place un réseau d'échanges, avec photos de chantiers, qui permet d'être en lien direct. « Et à chaque fin de chaque sondage, avant de replier le matériel, ils m'appellent, ou mon adjoint, et nous donnent les résultats des essais, des coupes et des niveaux d'eau. Et si les essais ne semblent pas concluants, on leur demande d'en faire davantage ou en plus grande profondeur. Cela permet de s'adapter en temps réel et d'apporter des résultats concrets et fiables au client. »

GAGNER LA CONFIANCE DES CLIENTS ET LE RESPECT DE SES PAIRS

Car c'est justement sur la qualité des prestations et la confiance que s'est construite l'entreprise. « C'est notre philosophie. » Dominic Torlini n'a jamais voulu pénétrer le marché en cassant les prix afin de gagner le respect de ses pairs. « Il est vrai que cela peut être tentant au départ d'autant que les charges d'une TPE sont moins importantes que celles d'un grand groupe. Mais le calcul n'est pas bon, car au fil des années les charges vont augmenter, il faudra donc monter les tarifs et ce sera difficile à expliquer aux clients. Et puis surtout, il y a un prix de marché, il n'est pas loyal par rapport à la profession de casser les prix. » Par ailleurs, Dominic Torlini veille à ne prendre que des chantiers qu'il a la certitude de pouvoir bien réaliser. « Par exemple, je ne vais pas sur des chantiers trop longs qui vont mobiliser des ressources importantes, même si techniquement nous sommes capables d'y répondre. » Toutefois, ●●●



PETROMETALIC

Petrometalic SAS (1948)
Capital 700 000€



SPÉCIALISTE EN MATÉRIELS DE CIRCULATION ET DE RÉGULATION DES FLUIDES

Après l'externalisation de 3 départements, la société est recentrée sur les activités spécifiques :

- **Tuyau dilatable** réalisé en collaboration avec Michelin - soit :
 - Abattage hydraulique du charbon, vendu dans le monde depuis 1975
 - Obturateur / packer Bimbar pour la consolidation des sols, vendu depuis 1975
- **Accessoires de forage**
- **Haute Pression et Très Haute Pression** : surpresseurs et connecteurs avec une spécialité hydrogène
- **Spécialité de skids** pour la désalinisation des puits pétroliers (30 skids au Sahara)

Déstockage important - Connecteurs, vannes HP inox MHA, accessoires pétroliers etc.

SIÈGE SOCIAL
32 rue de l'Ermitage
78000 VERSAILLES

ACTIVITÉ COMMERCIALE
Rue des Ecluses de Selles
59400 CAMBRAI
Tél : 03 27 72 06 60

petrogelam@petrometalic.com

Philippe MAZUREL
Président Directeur Général - CEO

www.petrometalic.com



© DTF Géotechnique

Pose d'inclinomètres verticaux et essais pressiométriques 12 m dans le cadre d'un suivi et d'un diagnostic sur un glissement de talus.

l'entreprise étend petit à petit son champ d'action, comme en témoignent des campagnes de sondage allant désormais jusqu'à 30 m de profondeur. « Mais toujours avec un risque limité, s'empresse d'ajouter le dirigeant. Je préfère refuser un chantier que décevoir un client. »

Une stratégie payante, car si au départ 80 % des chantiers provenaient du site internet, aujourd'hui 50 % sont issus du réseau et les recommandations, preuve de la satisfaction client. « Au départ, nous travaillions essentiellement auprès de particuliers. Au fil du temps la clientèle s'est diversifiée avec les communautés de communes, les maîtres d'œuvre, les grands groupes industriels auprès desquels nous réalisons des essais. Et nous intervenons aussi en entretien d'ouvrage pour l'Ineris, par exemple, ou encore nous faisons des diagnostics sur des structures d'ouvrage... », indique-t-il.



**PLUS DE
30 ANS
D'EXPÉRIENCE**

IMPORTATEUR - DISTRIBUTEUR
Equipements de perforation
Pièces d'usure



- Matériel de forage
- Taillants fond de trou

- Taillants hors trou
- Taillants coniques
- Service affûtage

+ de 20000 références sur 1600m² de stock

Zone du Placis - 24 rue du Placis
35230 BOURGBARRÉ (SUD DE RENNES)
 Tél. +33(0)2 99 62 71 60- www.samco-forage.com

DTF GÉOTECHNIQUE... EN BREF

- Activité : bureau d'études géotechnique
- Création : 2018
- Siège social : Pompey (Meurthe-et-Moselle)
- Rayonnement : Grand Est
- CA 2021 : 1 150 000 €
- Références : entre 700 et 1 000 chantiers / an

Le tout en veillant à conserver la proximité avec les clients. « Nous prenons le temps d'expliquer aux clients les essais et les résultats », ajoute Dominic Torlini, qui rappelle régulièrement à ses collaborateurs que l'amabilité et le délai de réponse comptent pour beaucoup. « Il nous arrive de faire des erreurs, comme tout le monde. Mais nous essayons à chaque fois de les comprendre afin de ne pas les reproduire, et nous les assumons. » Par ailleurs, il veille à des délais de réponses courts. « J'ai aussi embauché pour cela, notamment deux assistantes et un adjoint. Et j'ai appris à déléguer et faire confiance », indique le dirigeant, avant d'ajouter : « Lorsque nous sommes contactés, nous apportons une réponse dans les 24/48 h, sauf réel afflux. Ensuite, nous programmons l'intervention sur le chantier. Et surtout, nous nous engageons à remettre le rapport dans les 15 jours qui suivent l'intervention. J'ai mis en place un process au sein de l'entreprise où chacun a une tâche bien définie qui nous permet de tenir ces délais. Ainsi, le client a une garantie de remise du rapport, et il est très rare que le délai ne soit pas tenu ; parfois même nous remettons le rapport en avance. » Après près de 4 ans d'existence et entre 700 et 1 000 chantiers par an, l'entreprise gagne également en efficacité. « Nous cartographions toutes nos interventions, ce qui nous permet d'avoir une idée du sol que nous allons sonder et de la profondeur des essais à réaliser, et donc de la machine à envoyer. Et, plus nous aurons de références, plus nous serons efficaces, car cela permet d'anticiper pas mal de points. »

VERS UNE DIVERSIFICATION DE L'ACTIVITÉ

Pour l'avenir, Dominic Torlini souhaite dans un premier temps pérenniser son entreprise. Ensuite, il a pour objectif d'ouvrir des agences dans l'Hexagone. « Mais pour cela, il faudra embaucher une personne, la former pour lui transmettre les valeurs DTF Géotechnique, puis l'envoyer sur l'ouverture d'une nouvelle agence. » En attendant, le dirigeant souhaite continuer de développer le parc matériel et les compétences de l'entreprise. « Je veux faire en sorte que l'on parle de DTF Géotechnique, tout comme on parle de Fondasol et de Géotec, par exemple, avec la même reconnaissance. » Dominic Torlini a également un petit laboratoire qu'il souhaite développer davantage tout en continuant de sous-traiter à une entreprise du secteur.

Enfin, concernant la diversification, pour le moment l'entreprise réalise des forages, des sondages pressiométriques toutes profondeurs, des essais pénétrométriques, des essais de perméabilité de type Matsuo, des poses de piézomètres et d'inclinomètres... Les prochains investissements prévus auront pour objectif de permettre la diversification et de gagner encore en efficacité. Il souhaite donc investir dans un phicomètre pour dimensionner les parois de soutènement, ou encore un atelier pressiométrique pour pieux autoforeurs pour certains sondages, notamment en Alsace ou dans les Vosges. ■

Maylis Roizard



Créateur de **Solutions**



- Paroi moulées & Soutènements
- Pieux de fondations & Micropieux
- Sondage de reconnaissance
- Clous & Tirants d'ancrage
- Reprise en sous-oeuvre
- Complements de carrières
- Traitement de terrains
- Jet grouting
- Congélation de sol
- Fondations de pylônes & éoliennes

Pour en savoir plus, suivez-nous sur [Linked in](#) ou rendez-vous sur notre site <http://www.botte-fondations.fr>

NOUS CONTACTER

Siège Social
01.49.61.48.00

Agence Sud
04.42.13.30.50

Agence Rhône-Alpes
04.42.13.30.50

Agence Nord
03.20.00.11.11

Agence Ouest
02.51.88.44.30

Agence Sud-Ouest
05.57.91.18.10

Groupe Gengis : agile et réactif

Le groupe Gengis, spécialiste de l'ingénierie des géosciences et de la structure, œuvre sur l'ensemble du territoire français. Sa force : une organisation originale dans laquelle chacune des entreprises qui le composent est experte dans son domaine et complémentaire l'une de l'autre.

En 1993, le groupe JEI a été fondé. Il sera le berceau de la rencontre des 5 sociétés qui composent aujourd'hui le groupe Gengis : Technosol (ingénierie géotechnique), Forensol (investigation des sols), Iddea (ingénierie de l'environnement et des sites et sols pollués), Geother (géothermie et hydrogéologie) et enfin IPC (diagnostics et études de structures).

2007 est une année charnière dans la vie du groupe JEI. « *Nous nous sommes structurés et les bureaux d'études se sont regroupés au sein d'un pôle d'activité ingénierie. J'ai intégré le groupe à ce moment-là pour y créer Iddea. JEI avait racheté Technosol en 1999 et a créé la société Forensol* », explique Stéphane Sabatier, Président du groupe Gengis. L'année suivante, Xavier du Chayla, fonde la société Geother. Michaël Reboul rejoint le groupe en 2011 pour reprendre la direction de Technosol et de Forensol alors que Denis Courcoux rejoint le groupe en 2015 en tant que directeur d'IPC.

Jacques Ergand, alors président du groupe JEI, avait indiqué aux directeurs que lors de son départ en retraite chacun pourrait reprendre la société qu'il dirigeait. « *Mais il nous est apparu comme une évidence de rester unis et de continuer à travailler ensemble* »,

raconte Stéphane Sabatier. Aussi, en juin 2020, après deux ans de travail pour construire ce projet de groupe, Stéphane Sabatier, Xavier du Chayla, Denis Courcoux et Michaël Reboul se sont associés pour fonder le groupe Gengis en rachetant les 5 entreprises.

UNE ORGANISATION ORIGINALE

« *Nous avons la volonté d'entreprendre ensemble tout en préservant l'autonomie de chacune des structures et ainsi d'éviter l'acquisition des entreprises par un grand groupe* », explique Stéphane Sabatier. L'idée est donc née de créer une structuration qui est originale dans le monde de l'ingénierie avec des sociétés autonomes au sein d'un groupe, dans lequel s'expriment de fortes capacités de synergie, avec des services mutualisés au niveau de la holding (comptabilité, ressources humaines, informatique, QSE). Le groupe est ainsi dirigé par ses quatre fondateurs, ce qui permet de s'appuyer sur les forces de chacun. « *Cela nous permet de prendre les grandes décisions ensemble et de donner satisfaction à l'ensemble de nos collaborateurs, tout en conservant l'autonomie des structures. Nous pouvons ainsi avancer de façon pragmatique sans rien imposer aux uns et aux autres, mais avec des intérêts communs.* »

Au fil des années, les dirigeants ont créé différentes agences pour être au plus proche de leurs clients. « *Nous avons actuellement 9 agences sur l'ensemble du territoire, dont certaines ont été ouvertes ensemble, ce qui nous permet de limiter les charges et d'unir les forces commerciales sur ces secteurs* », précise Michaël Reboul, directeur général délégué du groupe. Mais ces agences ne sont pas gérées comme des centres de profit de façon à garder une émulation et une entraide entre toutes pour le bien de chaque entreprise et, *in fine*, celui du groupe.

L'HUMAIN AU CŒUR DE GENGIS

Le groupe Gengis est né en veillant à préserver une valeur commune à tous : l'humanisme. « *Nous voulions conserver les avantages des PME tout en bénéficiant de la force du groupe. Et nous avons réussi. En se structurant ainsi nous conservons une certaine agilité et nos marques restent les sociétés* », indique Stéphane Sabatier. « *Elles sont chacune reconnues pour leur expertise et leur savoir-faire dans leur domaine* », ajoute Michaël Reboul. En effet, chaque entreprise a son propre dirigeant ce qui permet des circuits de décision courts, une liberté et un pragmatisme indispensables dans la gestion quotidienne.



De gauche à droite : Stéphane Sabatier, Michaël Reboul, Xavier du Chayla et Denis Courcoux.



Forage de sondes géothermiques verticales en fond de fouille sous un futur bâtiment de bureau.

Cela permet aussi de rester proche des équipes. Car la force du groupe, c'est avant tout les femmes et les hommes qui le composent. Les dirigeants y sont très attachés et souhaitent préserver ce lien. « *C'est fondamental pour nous.* » L'organisation leur permet de ne pas être noyés dans la masse et d'appartenir avant tout à une entreprise, tout en

s'identifiant au groupe. « Il y a un vrai attachement de leur part aux marques et aux entreprises. Les collaborateurs se sentent bien au sein des structures. » Il est essentiel pour les dirigeants que les collaborateurs se sentent accompagnés et soutenus pour qu'ils s'épanouissent. « Et, nous les impliquons beaucoup dans le développement d'outils pour faciliter le travail. »

RÉACTIVITÉ ET SYNERGIE D'EXPERTISES SUR LES PROJETS

« Ce que nous recherchons au sein de notre groupe c'est d'être le plus réactif possible. L'agilité de nos structures alliée à l'expertise de chacune est l'une de nos forces », indique Michaël Reboul. « Et les multiples compétences du groupe sont un atout pour les clients, car si le projet

nécessite plusieurs expertises, la porte d'entrée peut se faire par l'une des structures, mais celle-ci se rapprochera spontanément des entreprises sœurs pour répondre aux besoins du client et du projet de manière optimale », complète ce dernier.

5 ENTREPRISES, 5 DOMAINES D'EXPERTISE

Technosol maîtrise toutes les missions géotechniques du sondage à l'ingénierie et au suivi de chantier. Ses valeurs fortes sont la technicité et la qualité de l'encadrement. « Nous avons des équipes avec un fort taux d'encadrement. Nous veillons à l'accompagnement technique et commercial des uns et des autres, ce qui permet rapidement à de jeunes ingénieurs d'être mobilisés sur des projets ambitieux », décrit Michaël Reboul, dirigeant de Technosol. La société est performante dans la gestion des grands marchés publics multi-projets, le plus souvent en cotraitance avec les autres sociétés du groupe. « Nous savons répondre à tout type de projet et nous ne nous limitons pas au bâtiment ou au génie civil ; notre compétence est par exemple reconnue dans le domaine ferroviaire. »



© GENGIS

Collecteur de sondes géothermiques verticales enterré.



SOLUTION GÉOPHYSIQUE SOUS-SOL & OUVRAGES

une société du groupe :



www.innogeo.fr





Pollution aux hydrocarbures d'une nappe affleurante au droit d'un ancien site pétrolier de 14 ha. Missions : diagnostic et plan de gestion (IDDEA).

Elle dispose pour cela de ses propres ressources pour les reconnaissances au sein de sa filiale Forensol, avec 14 ateliers de sondage de divers gabarits, pour répondre aux besoins de l'ingénierie. « Nous avons des ateliers de forage polyvalents en termes de puissance et de typologie de sondages effectués : carottage, pressiomètre, destructif, pénétromètre. Nous avons aussi notre propre laboratoire de géomécanique, qui nous permet de maîtriser l'ensemble du process de recueil de données », décrit Michaël Reboul.

Iddea, bureau d'études, de conseil et d'ingénierie en environnement, est spécialisé dans les sites et sols pollués, mais est aussi un acteur généraliste de l'environnement intervenant sur des sujets de désamiantage, déconstruction (en lien avec les SSP), ou encore sur des sujets réglementaires, de protection de la ressource en eau, avec une expertise très reconnue « sur le milieu karstique », explique Stéphane Sabatier. Dans tous nos domaines, nous défendons une forte expertise. Cela passe par la transmission et le développement de nos talents, notamment par un compagnonnage fort de nos jeunes recrues, une écoute permanente par le management participatif à la recherche constante de leviers d'efficacité. Nous travaillons ainsi sur des projets complexes pour de gros clients publics ou privés qui nous font confiance et nous sont fidèles. À titre d'exemple, Iddea travaille auprès d'industriels de l'automobile depuis 5 ans ou de grands groupes pharmaceutiques depuis 9 ans. « Nous fidélisons nos clients par la qualité de notre expertise et de notre accompagnement. »

Geother est, pour sa part, spécialisée dans la géothermie. « Nous intervenons dans tous les domaines de l'ingénierie depuis la conception, le dimensionnement et jusqu'à la maîtrise d'œuvre des travaux de la boucle primaire géothermale. Les solutions techniques que nous proposons sont très larges puisqu'elles concernent autant les projets de géothermie sur nappe que sur sondes, qu'elles soient superficielles ou profondes [jusqu'à 2000 m de profondeur, ndlr] », explique Xavier du Chayla. Ces solutions sont aujourd'hui une véritable alternative aux énergies fossiles et s'inscrivent pleinement dans la décarbonation pour répondre aux enjeux du dérèglement climatique. Elles concernent tous les projets immobiliers depuis l'habitation privative en passant par les bâtiments collectifs ou tertiaires et jusqu'aux quartiers entiers au travers du développement de réseaux de chaleur géothermiques et des boucles d'eau tempérée. L'entreprise a également une compétence reconnue en hydrogéologie et hydrogéotechnique pour les problématiques de gestion des eaux pluviales et d'eau souterraine dans le sous-sol liées aux travaux de construction. « Elle travaille là en lien étroit avec Technosol dans cette logique d'expertise. »

Enfin, IPC est un bureau d'études structure du groupe. « Ce sont les diagnostics et la pathologie des ouvrages qui font vraiment le lien avec le reste du groupe. Mais l'entreprise, assure aussi la maîtrise d'œuvre structure de projets ainsi que des missions d'exécution. » L'entreprise se consacre pour l'instant au bâtiment, mais a la volonté de développer les infrastructures de génie civil.

CHIFFRES-CLÉS DU GROUPE GENGIS

- 5 sociétés
- 9 implantations en France
(3 agences en région parisienne, 2 en Normandie, 1 en Centre-Val de Loire, 1 en Pays de la Loire, 1 en Auvergne-Rhône-Alpes et 1 en Nouvelle-Aquitaine)
- 170 collaborateurs
- 22 M€ de chiffre d'affaires en 2021
- + 1 500 projets par an

Son organisation spécifique, les valeurs partagées et les moyens à disposition font du groupe Gengis un acteur de premier plan des grands projets d'infrastructure nationaux où les sociétés du groupe interviennent, par exemple, en synergie sur le Grand Paris Express, les ouvrages des JO 2024 et des projets d'aménagements routiers et ferroviaires.

LES AMBITIONS DU GROUPE

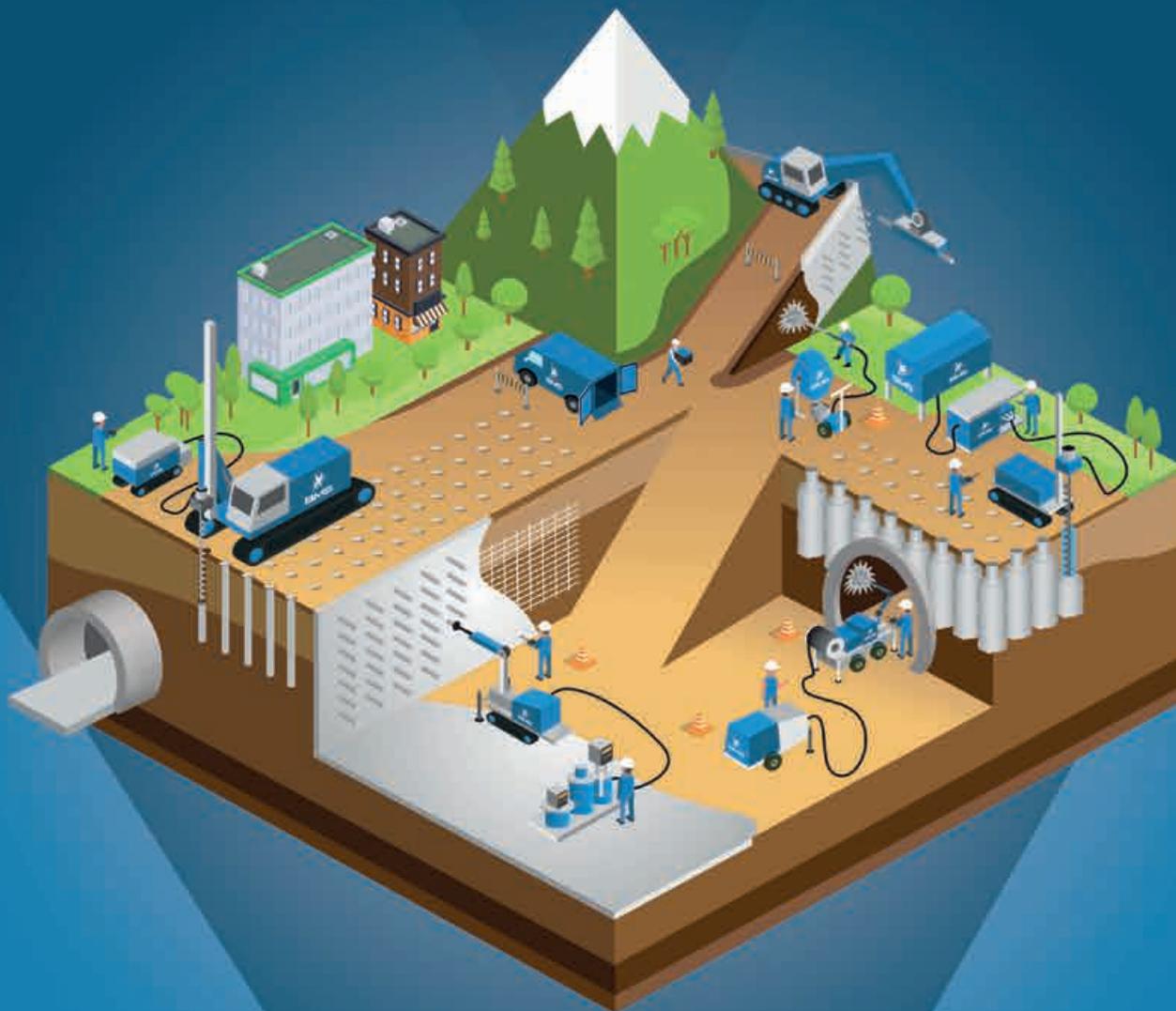
Le groupe Gengis affiche plusieurs ambitions. La première : se développer géographiquement. « Nous voulons nous rapprocher de nos clients et nous envisageons notamment une implantation dans le Grand Est en 2023. » La deuxième est le développement de la synergie du groupe. « Nous partageons déjà beaucoup de choses comme nos services supports, mais nous pouvons faire encore plus notamment avec une plus grande synergie commerciale. »

L'objectif étant que chacune des entreprises se consacre à son métier et que le groupe vienne en support de ses sociétés. Enfin, le développement du groupe passe également par la diversification des métiers et des marchés. « Iddea a ainsi intégré la déconstruction et le désamiantage. » Par ailleurs le groupe veut développer les activités liées à l'écoconstruction, à la géothermie. « Ce sont des opportunités qui s'offrent à nous, nous voulons les saisir. »

L'ambition du groupe est donc de se développer, mais de façon maîtrisée, mesurée et opportuniste. Il ne s'agit pas là d'une croissance à tout prix. « Nous voulons ainsi poursuivre notre développement, innover pour nos clients, pour nos collaborateurs que ce soit dans nos domaines d'expertise métiers ou dans la digitalisation, tout cela en veillant à ne jamais perdre nos spécificités et le lien avec nos équipes », conclut Stéphane Sabatier. ■

Maylis Roizard

Votre fournisseur de solutions
**POUR VOS FONDATIONS SPÉCIALES
ET TRAVAUX SOUTERRAINS**



INJECTION
PROJECTION
FORAGE

Agence
BMS LYON
(siège)
04 37 44 15 15

Agence
BMS PARIS
01 34 34 50 50

Agence
BMS TOULOUSE
05 54 72 03 10

www.bmssolutions.fr

Suivez-nous 



Franck Bouché, président de l’UPDS : « Nos techniques de dépollution doivent faire la part belle aux technologies les moins invasives, les moins consommatrices de carbone et les plus respectueuses de l’environnement »



Franck Bouché, président de l’UPDS

L’UPDS - Union des professionnels de la dépollution des sites - vient de rejoindre le « club » des parrains de SOLSCOPE. Depuis plus de vingt ans, Franck Bouché travaille dans le domaine de la géotechnique et des problèmes environnementaux qui en ont découlé ces dernières décennies. C’est donc très logiquement que ce dernier est aujourd’hui à la présidence de l’UPDS et que nous lui consacrons notre rubrique « Tête d’affiche ».

Franck Bouché, pouvez-vous vous présenter ?

Franck Bouché : Ingénieur géotechnicien et géophysicien, j’ai commencé ma carrière en 1993 dans le domaine de la géotechnique en souterrain pour de grandes sociétés du BTP, filiales aujourd’hui de Vinci Construction. En 1998, j’ai intégré l’une de ces filiales, spécialisée en désamiantage et maintenance nucléaire, puis le pôle appelé Geovalorisation qui regroupait les métiers du démantèlement, désamiantage, dépollution et terrassement spéciaux. En 2007, j’ai rejoint le groupe Valgo, spécialisé dans la dépollution et la reconversion des sites pollués et des friches industrielles, avec pour objectif de développer les domaines techniques liés à leur réhabilitation environnementale. Aujourd’hui et âgé de 52 ans, j’en suis l’actuel Vice President International Business Development.

Vous êtes président de l’UPDS (Union des professionnels de la dépollution des sites), depuis avril 2019. Pouvez-vous nous en dire plus ?

L’UPDS (www.upds.org), chambre syndicale des entreprises de la dépollution des sites regroupe 50 entreprises spécialisées en ingénierie et travaux de dépollution représentant plus de 2 500 salariés et 550 M€ de chiffre d’affaires. L’UPDS est un des syndicats de la FNADE*. Depuis 2018, de nouvelles

entreprises nous rejoignent en tant qu’adhérents associés et nous ouvrons cette année l’adhésion aux microstructures de moins de 2 salariés (experts, start-up, ingénieurs-conseils, etc). Notre vocation est de défendre nos entreprises et notre profession en participant activement aux évolutions réglementaires (loi Asap, loi Agec, loi climat résilience...) et méthodologiques. Notre objectif est de faire progresser les savoir-faire en lien avec notre expérience de terrain.

Cette année, l’UPDS fête ses 30 ans et nous avons organisé un colloque le 11 octobre dernier afin de marquer cette date anniversaire. Cela a été notamment l’occasion de faire une rétrospective sur les grandes étapes qui ont jalonné l’histoire de notre métier et d’exposer notre vision pour l’avenir de la profession.

Quelles sont, selon vous, les prochaines innovations dans votre domaine, et celles qui vont émerger ?

L’heure est à la sobriété et à l’efficacité. Nos techniques de dépollution et notre manière d’envisager les projets de remise en état des fonciers dégradés doivent donc faire, tout en conservant une action essentielle sur les zones de pollutions concentrées, la part belle aux technologies les moins invasives, les moins consommatrices de carbone et les plus respectueuses de l’environnement. Dans ce cadre, nos techniques, notamment de traitement *in situ* ou

sur site qui sont réputées les plus respectueuses de l’environnement, doivent évoluer vers encore plus d’efficacité énergétique, plus de sobriété, le tout en proposant des solutions de régénération du sol et de ses fonctionnalités essentielles.

Dans le même temps, les polluants émergents jusqu’à récemment passés sous silence ou méconnus impactent non seulement l’actualité, mais surtout notre sécurité sanitaire. Ils devront faire l’objet de recherche, de réglementation et de solutions techniques adaptées.

Quels sont les sujets de préoccupations actuels et futurs de l’UPDS ?

L’UPDS travaille avec le ministère et ses organismes de tutelle sur une série de guides qui dresseront l’état de l’art et les bonnes pratiques sur des sujets aussi divers que la valorisation des terres excavées et des sédiments dans le cadre de projets d’aménagement ou d’infrastructures linéaires de transport ; les réponses aux questions que se posent les donneurs d’ordre lors de la découverte d’un site pollué ; la terminologie dans le domaine des sites pollués ; et les modes de réception des traitements *in situ* et sur site. L’UPDS travaille également sur un guide de bonnes pratiques en matière de consultation des entreprises.

D’un point de vue réglementaire, l’UPDS sera vigilante également sur les décrets d’application des différentes lois qui ont

vu le jour dans les 2 dernières années. La loi Asap a consacré l’obligation de recourir à des sociétés certifiées dans le domaine des sites et sols pollués (selon la norme NF X31-620) pour délivrer un certain nombre d’attestations visant à améliorer la maîtrise technique des projets de reconversion. L’UPDS milite pour une loi sur les sols qui permettrait d’être l’outil approprié pour rassembler toutes les questions liées au sol dans leur complexité : aspects préventifs, connaissance, information, gestion des pollutions, levée des verrous de la valorisation de friches. Dans ce cadre, nous demanderons que le recours aux sociétés certifiées selon la norme NF X31-620 dans le domaine des travaux de dépollution soit rendu obligatoire pour garantir la maîtrise technique des solutions de dépollution, l’atteinte des objectifs et la traçabilité des déchets. Cette loi sur les sols pourrait voir le jour lors de la transposition de la future directive européenne sur la santé des sols.

L’UPDS vient de publier un guide BRGM/UPDS des analyses en contexte SSP**. Pouvez-vous nous en dire plus ?

Effectivement, nous sommes très heureux de l’aboutissement de ce travail commun avec le BRGM, mais également avec les laboratoires d’analyses dont plusieurs sont adhérents associés de l’UPDS. En effet, lors de la réalisation des prestations Sites et Sols Pollués, les bureaux d’études et les entreprises de travaux sont souvent confrontés à des questionnements concernant le processus analytique ainsi que l’influence de celui-ci sur les résultats fournis par les laboratoires. Ce guide a été élaboré pour répondre à ces interrogations. Il décrit également le parcours de l’échantillon au laboratoire depuis la réception jusqu’à la fourniture des résultats et vise à encourager un échange entre les laboratoires d’analyses et les demandeurs

d’analyse ou clients (bureaux d’études, entreprises de travaux, donneurs d’ordre, industriels, collectivités...). N’existant qu’en version web, nous avons fait en sorte qu’il soit facile d’utilisation. Ainsi, il contient de nombreux liens afin d’en faire un document interactif dans lequel l’utilisateur peut évoluer au gré de ses interrogations, sans avoir à lire la totalité du document.

L’UPDS a fait le choix de devenir parrain de SOLSCOPE et intègre, entre autres, le comité de rédaction du magazine « Solscope Mag ». Qu’est-ce que cela représente pour vous et pour l’UPDS ?

Nous sommes ravis de rejoindre les parrains de SOLSCOPE. Les métiers de la géotechnique sont connexes aux nôtres et plusieurs de nos adhérents sont également des professionnels de l’ingénierie géotechnique.

Nous œuvrons sur les mêmes enjeux (la professionnalisation, la réglementation, la technologie et la reconnaissance de nos métiers), les mêmes projets, et pour le compte des mêmes clients ; nous travaillons également les fonctionnalités des sols sous l’angle environnemental.

Nous pensons que la complémentarité de nos angles de vue permettra d’enrichir la pertinence de nos communications, la collaboration entre nos entreprises, l’accompagnement H&S de leurs compagnons sur les opérations de dépollution et les messages que nos métiers souhaitent faire entendre. ■

*Propos recueillis par
Aude Moutarlier*

* Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l’Environnement

** Sites et Sols Pollués

ENTREZ DANS LA DIMENSION 4.0

PRÉDICTION

CLOUD

BIG DATA

INGÉNIERIE

CONSTRUCTION

AUTOMATION

IA

BIM

À vivre uniquement avec

GRUPE
fondasol
CRÉATEURS DE POSSIBLES

www.groupefondasol.com

Les 47 millions de tonnes des terres excavées du Grand Paris Express, un enjeu de taille pour la Société du Grand Paris

La Société du Grand Paris étudie toute piste de valorisation des 47 millions de tonnes de déblais issues de ses chantiers et nécessaires à la construction du Grand Paris Express. Elle s'efforce à réduire la production grâce au réemploi et à la réutilisation sur ses propres ouvrages, mais aussi en nouant des partenariats avec des porteurs de projets tiers pour l'apport de terres de remblais pour des aménagements, reconversions de friches, etc. Elle a aussi lancé une ambitieuse démarche de caractérisation de ces gisements et de formulations d'écomatériaux pour développer un écosystème favorable à la transformation et à l'utilisation de terres excavées dans le domaine de la construction. Explications.

Le projet d'extension du métro, le Grand Paris Express, piloté par la Société du Grand Paris, nécessite la construction de 200 km de lignes supplémentaires. Du fait de la forte densité urbaine des zones traversées, ce tracé sera à 90 % souterrain avec des profondeurs d'excavation pouvant dépasser 60 m.

Environ 47 Mt de terres seront excavées pour ce projet, avec de très rares opportunités de réemploi sur les chantiers, là aussi du fait de l'occupation en surface. C'est l'équivalent d'un rehaussement de plus de 20 cm de tout le territoire de la ville de Paris, bois de Boulogne et de Vincennes compris.

Ces travaux ayant lieu sur une période relativement courte, 10 à 15 ans, les cadences d'excavation et de gestion des déblais représentent un enjeu fort à l'échelle locale (jusqu'à 7 Mt excavées en un an, soit une hausse de 20 % de la

production francilienne des déchets de construction) mais également au-delà grâce à l'axe Seine, notamment.

Éviter la saturation des sites de stockage existants et réduire l'impact environnemental du projet sont deux défis de la thématique déblais, qui ont amené la Société du Grand Paris à se fixer (il n'y a pas de contrainte réglementaire sur le sujet) un objectif ambitieux de valorisation de ses terres excavées dès 2012. Les marchés de travaux passés par la Société du Grand Paris comportent ainsi des clauses visant à utiliser 70 % des déblais à des fins utiles, en substitution à des ressources naturelles.

CARACTÉRISATION DES TERRES

Plusieurs voies de valorisation existent avec des critères de sélection très différents. Pour une utilisation en remblai, la portance sera par exemple regardée,

tandis que pour une utilisation en clinker l'absence d'impuretés chimiques sera décisive.

C'est pourquoi il est déterminant qu'en plus de réaliser une caractérisation chimique systématique de chaque lot de terre (tous les 200 m³ pour les creusements verticaux, tous les 500 m³ pour les creusements au tunnelier), une analyse des propriétés physiques soit conduite sur des échantillons représentatifs.

La Société du Grand Paris a ainsi conduit une campagne de prélèvements sur ses chantiers en cours d'excavation en 2018 pour réaliser en laboratoire une caractérisation étendue de matériaux représentant plus de 80 % des couches géologiques traversées.

VALORISATION EN REMBLAI

Au-delà du réemploi limité sur ses propres chantiers (remblais techniques, merlons, rampe d'accès aux viaducs, aménagements de parvis), la Société du Grand Paris cherche à nouer des partenariats avec des porteurs de projets définitifs en terres, qu'ils soient publics ou privés. Reconversion de friches, confinement de pollution sur d'anciens sites industriels, modelé paysager, nombreuses sont les applications possibles. Bien sûr, la compatibilité des terres d'apport avec le fond géochimique local est vérifiée pour chaque site.

Ainsi, plus de 500 000 t de déblais du Grand Paris Express ont été transportées par barges sur l'ancien site pétrolier de Petit-Couronne pour contribuer à sa reconversion menée par la société Valgo.

660 000 t ont également été acheminées, notamment par bande transportée, vers le site de la plaine du Sempin



Thomas Gaudron



Échantillons des terres du Grand Paris Express et exemples d'écomatériaux.

pour sa reconversion en parc urbain par ECT pour le compte de la SAFER, dans le cadre d'un partenariat existant depuis 2016 avec la Société du Grand Paris.

La Société du Grand Paris a également fourni les résultats de ses sondages pour contribuer à établir la cartographie des fonds pédo-géochimiques des régions Île-de-France et Normandie au travers de l'initiative GéoBaPa. Grâce à une meilleure connaissance des sites en place, il est plus aisé de vérifier la compatibilité chimique avec des terres d'apport grâce à l'approche de niveau 2 des guides de valorisation hors site des terres excavées publiés par le ministère de la Transition écologique et le BRGM, et d'adopter des seuils adaptés au contexte local.

La consistance très pâteuse des marins de tunnelier, qui représentent la moitié des volumes excavés, oblige à mettre en œuvre des dispositifs d'accueil spécifiques : constitution de digues, alternance de déblais secs et humides... Profiter de cet état presque liquide pour conforter des terrains menacés par des fontis du fait de la présence d'anciennes galeries souterraines ou de la dissolution de gypse, situation très répandue en Île-de-France, constitue donc un axe d'études. Cela répond à un besoin local qui peut représenter d'importants volumes et peut permettre de réduire les coûts parfois très élevés de ces opérations de confortement.

Des essais avec des matériaux du Grand Paris Express ont ainsi été menés pour des injections sous pression à partir de boues issues des eaux d'exhaure par Terbis.

Un projet de comblement d'anciennes carrières est à l'étude avec le conseil départemental du Val-de-Marne sur le parc des Lilas à Vitry-sur-Seine.

VALORISATION EN FILIÈRE ÉCOCONSTRUCTION

La connaissance des matériaux a permis de lancer une seconde phase d'études portant sur l'introduction de déblais dans la formulation de matériaux classiques de la construction en substitution des matériaux généralement issus de carrières. Le respect des performances techniques attendues conditionnait le taux maximum d'incorporation des déblais.

Un test d'innocuité environnementale permettait ensuite de veiller au non-relargage de potentielles espèces chimiques dans l'environnement par lessivage des eaux de pluvie.

Environ 80 études de formulations couvrant technique routière, génie civil, étanchéité... ont ainsi été conduites, ce qui a permis de constituer un corpus technique nécessaire à la publication en 2019 d'un appel à manifestation d'intérêt à destination des plateformes de valorisation.

Plus d'une trentaine d'acteurs ont ainsi candidaté pour une centaine de sites en mesure de recevoir les déblais du Grand Paris Express pour la production de matériaux destinés au secteur de la construction.

Ces formulations sont en accès libre sur le site de la Société du Grand Paris pour faciliter une appropriation la plus large possible par les acteurs du secteur.

Une thèse est également à l'étude pour la formulation de matériaux pour le bâtiment à partir de matières recyclées, dont les terres excavées au premier chef. Cela répond à un double objectif, mieux valoriser nos terres tout en utilisant des produits plus respectueux de l'environnement dans les bâtiments du Grand Paris Express (gares, mais aussi projets immobiliers tout autour de ces dernières).

La Société du Grand Paris participe également à plusieurs groupes de travail régionaux ou nationaux sur ces thématiques dont le Projet national terre crue, qui a vocation à développer la construction à partir de terre.

La boucle n'aurait pas été complète si une incitation à une plus large utilisation d'écomatériaux et d'écoproduits n'avait pas été faite sur les chantiers de la Société du Grand Paris, mais ●●●



© Anne-Claude Barberis/SCP

Évacuation par bande transporteuse de déblais du puits de tunnelier Bel-Air à Chelles jusqu'au projet d'aménagement de la plaine du Sempin.

APROMÉTAL → **BMS MÉTAL**

Aprométal rejoint le GROUPE BMS et opérera sous le nom de **BMS MÉTAL**.

CHAUDRONNERIE & STRUCTURES MÉCANO-SOUDÉES

Travaux maritimes

Travaux souterrains et Fondations spéciales

Travaux de génies civils

Négoce de profilés parachevés

bmsmetalsolutions.fr

Pièce de Boulay - 57365, ENNERY
+33 (0)3 87 30 16 75
contact@bmsmetalsolutions.fr

GROUPE BMS

aussi plus largement par la commande publique. En effet, le sujet des débouchés est prégnant et constitue un frein récurrent au développement de nouvelles capacités.

Des clauses incitatives dans les cahiers des charges et une évaluation de la circularité des offres (du côté des déchets de construction comme des approvisionnements) en vue de l'attribution ont ainsi complété la démarche.

De même, la Société du Grand Paris a noué des partenariats avec des collectivités motrices sur ces thématiques (Plaine commune, Est-Ensemble, métropole du Grand Paris) pour généraliser cette démarche sur des chantiers tiers.

Elle a également publié le guide *Matières à faire : le kit de l'économie circulaire**, à l'attention des maîtres d'œuvre et d'ouvrage, en libre accès, expliquant cette méthode et mettant à disposition les résultats et outils développés par la Société du Grand Paris.

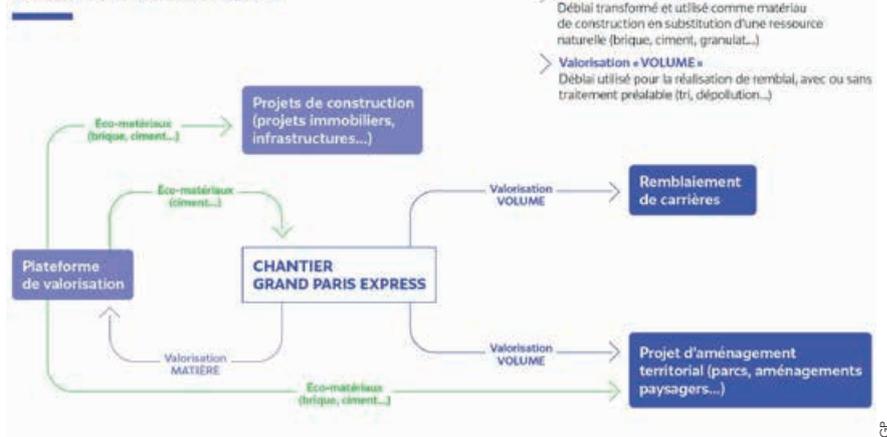
La Société du Grand Paris participe également à la chaire économie circulaire et métabolisme urbain de l'université Gustave-Eiffel, en partenariat avec la métropole du Grand Paris, pour créer de nouveaux outils et améliorer les pratiques.

ANTICIPER L'ÉVOLUTION DES PRATIQUES

Le Grand Paris Express se veut un laboratoire de pratiques de construction plus vertueuses. Laissant une grande place à l'innovation, des solutions peuvent ainsi être testées à large échelle.

Dans le domaine de la traçabilité, Trex, un outil numérique de suivi de chaque

VALORISATIONS MATIÈRE ET VOLUME



Boucles d'économie circulaire des déblais.

lot de terre (par unité de transport) harmonisant les formats des bordereaux de suivi a ainsi été développé par la Société du Grand Paris et mis en place dès 2017. Trex gère ainsi plus de 1 million de bordereaux de transport vers des sites préalablement agréés par la Société du Grand Paris. Il a ainsi préfiguré le registre national des terres et sédiments ou l'outil Track Déchets, tous deux développés par l'administration, et dont l'utilisation est imposée depuis 2022.

Cette somme de données permet à la Société du Grand Paris de dresser des cartographies précises de l'avancement des terrassements et des sites de réception utilisés par ses entreprises de travaux. Celles-ci sont transmises aux services de l'État sur une base régulière dans un souci de transparence sur ses pratiques.

De la même façon, un partenariat entre l'OCLAESp (Office central de lutte contre les atteintes à l'environnement et à la santé publique) de la gendarmerie nationale et la Société du Grand Paris nous permet d'améliorer les pratiques et de limiter les risques de détournement vers des sites non autorisés.

Les entreprises de travaux se sont emparées du sujet de la caractérisation chimique en déployant des outils de caractérisation chimique plus rapides, à l'aide de tests de lixiviation accélérée et de laboratoires de terrain, comme l'outil *Diagnosol Express* de NGE, identifié lors de l'appel à manifestation d'intérêt de la Société du Grand Paris « Le Grand Paris des déblais » lancé en 2016.

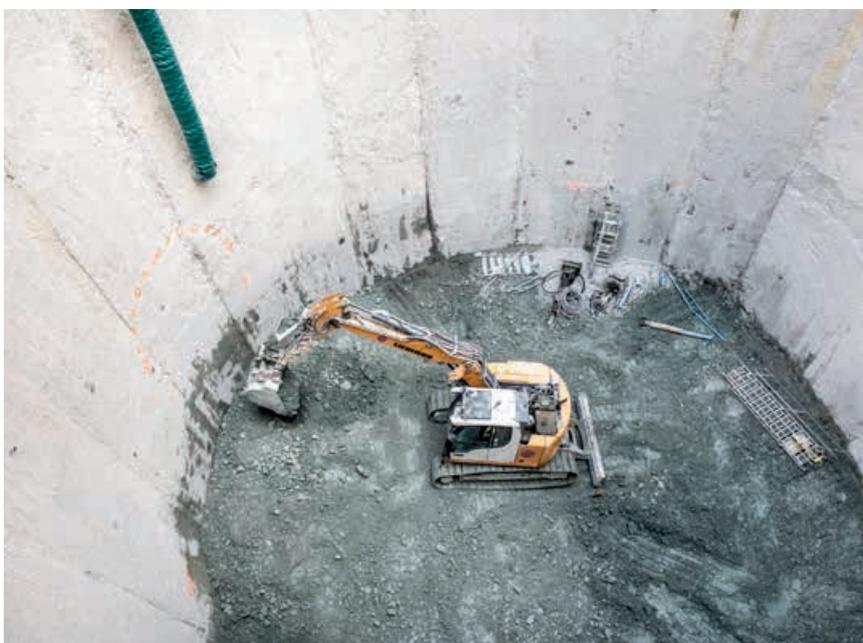
Des boucles d'économie circulaire ont également été créées avec, par exemple, plus de 200 000 t de calcaires qui ont été extraites de nos chantiers et traitées en cimenterie pour y revenir sous forme de bétons.

La gestion des déchets, terme réglementaire malheureusement connoté négativement pour le grand public, est un secteur-clé pour une transition écologique très attendue. Une plus grande économie circulaire des terres excavées permettra de réduire la pression sur des ressources déjà en tension comme sur les sables et d'améliorer l'impact environnemental des projets. Cela nécessite cependant anticipation, investissement et échanges des bonnes pratiques. ■

Thomas Gaudron

Responsable terres excavées
& économie circulaire
Société du Grand Paris

* À l'adresse : <https://kiteconomiecirculaire.societedugrandparis.fr/>

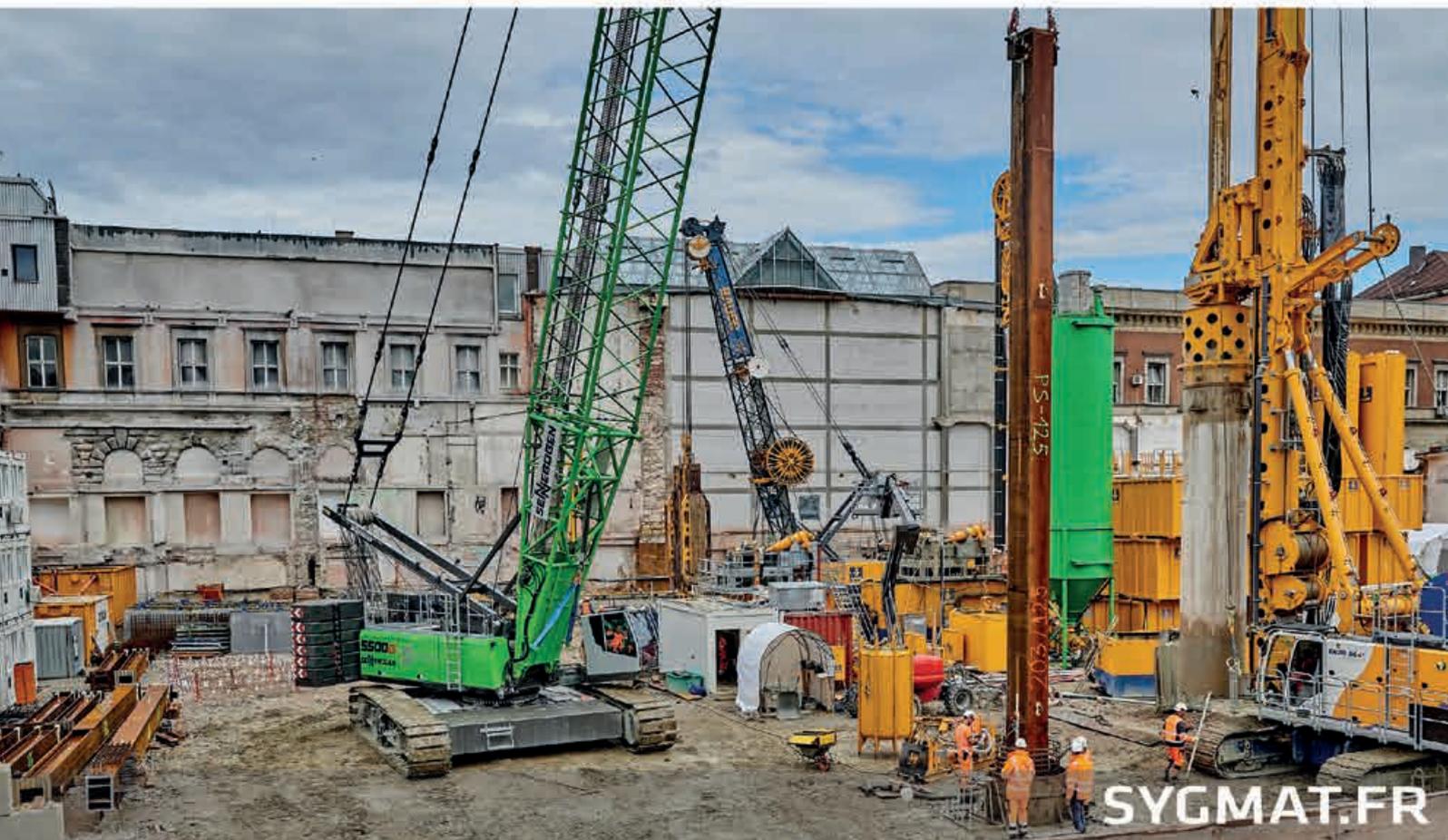


Chantier de l'ouvrage de service OA1 aux pieds des pistes de l'aéroport d'Orly.

SYGMAT distributeur exclusif SENNEBOGEN

Des gammes complètes adaptées aux travaux de construction, fondations spéciales, forage, travaux maritimes et fluviaux :

- Pelles à câbles de 13.5 à 300 t
- Grues treillis sur chenilles de 50 à 300 t
- Grues télescopiques sur chenilles de 16 à 130 t



Reconstruction du poste n°1 au grand port maritime de l'île de La Réunion

Le poste n°1 du grand port maritime de La Réunion est situé sur la façade ouest de l'île, au sud-ouest de Saint-Denis. Ce dernier vient de faire l'objet d'une démolition et d'une reconstruction.

Parmi des diverses infrastructures civiles et militaires du grand port maritime de La Réunion situées sur la commune du Port se trouvent des entreprises telles que Lafarge, la SRPP et les entrepôts de la Sapmer, l'une des plus importantes entreprises de pêche de l'océan Indien. Ses entrepôts sont situés sur le quai dit « du poste n°1 ». Ce quai accueille quotidiennement les navires de la flotte de la Sapmer, qui viennent y débarquer leurs cargaisons de thons, légines australes ou encore de langoustes de Saint-Paul.

Ce poste n°1 a été construit en deux phases. « En 1957 : construction d'un quai d'environ 12 m de largeur constitué d'une dalle reposant sur des poutres et des colonnes en béton armé ; et en 1965 : construction d'une extension du quai côté terre. Et en 2008, il a subi un aménagement de la darse de pêche hauturière avec une réduction de sa longueur », explique Nadjim Bacar Fadhuli, directeur général de Rocs et directeur des grands projets de NGE Fondations. Le quai présente un tirant d'eau minimum de 9 m, d'une longueur de 129 m, une largeur d'environ 20 m permettant le déchargement des navires qui peuvent être des chalutiers-caseyeurs-congélateurs (longueur : 76,60 m, largeur : 14,60 m) ou des palangriers – congélateurs (longueur : 55 m, largeur : 11 m).

UN OUVRAGE FRAGILE

Le front d'accostage originel du poste n°1 est constitué de 9 colonnes en béton espacées tous les 15 m. Ces colonnes sont reliées les unes aux autres par une poutre frontale. En 1957, le mur de soutènement positionné 10 m en recul du front d'accostage était l'un des 2 appuis des poutres transversales en béton armé. Ces poutres espacées de 2,50 m sont encastrées dans la poutre frontale.

Suite à l'extension du quai côté terre réalisée en 1965, le mur de soutènement a été supprimé. Il a été remplacé par des poutres consoles permettant de soutenir les poutres transversales de la structure réalisée en 1957.

L'espacement entre les poutres console est de 5 m. Ces poutres s'appuient sur des massifs bétons circulaires de 2,50 m

de diamètre. Elles sont reliées entre elles par des entretoises équipées de corbeaux permettant de soutenir chaque poutre transversale de la structure de 1957.

Côté terre, dans l'axe des massifs circulaires de 2,5 m un mur de soutènement liaisonne les poutres consoles. Les poutres de 20 m situées derrière chaque massif circulaire de 2,50 m, jouent le rôle de contrepoids et reposent sur une semelle filante de 3 m de largeur ; sauf au droit des colonnes de l'ouvrage, où des butées ont été réalisées.

Mais suite à l'expertise et l'inspection détaillée menées par le CETE Méditerranée ces dernières années, de nombreux désordres ont été relevés sur la structure du poste n°1. Il s'agit essentiellement d'éclatements de béton avec armatures corrodées apparentes. Puis, un contre-calcul a montré une erreur de dimensionnement lors de l'élargissement de 1965, entraînant une sous-évaluation des sollicitations dans la structure d'origine et réduisant fortement la capacité portante de l'ouvrage dès sa construction et entraînant un potentiel risque de rupture brutale.

CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU QUAÏ

Les autorités du grand port maritime de La Réunion ont alors pris la décision de démolir et reconstruire le quai pour assurer sa pérennité et la sécurité de son exploitation, tout en veillant à préserver l'environnement marin immédiat. « L'étude de préféabilité avait envisagé plusieurs solutions de reconstruction intégrant notamment la possibilité de conserver les piles existantes, mais un diagnostic sous-marin réalisé a révélé des désordres menant à l'instabilité de certaines fondations, cette solution a donc été écartée », explique Nadjim Bacar Fadhuli.

Et pour ces travaux de démolition de l'ancien quai consistant à l'enlèvement des corbeaux, des poutres frontales, des colonnes... et sa reconstruction, c'est un groupement associant les entreprises Rocs et NGE Fondations, toutes deux filiales du groupe NGE, qui en ont la charge.

« La société Rocs a intégré le groupe NGE Fondations en 2005. Elle affiche aujourd'hui une soixantaine



Mise en place des poutres longitudinales.



Démolition des piles.

en effet, à réaliser une structure de fondations reposant sur 40 pieux métalliques de diamètre 1016 mm et d'épaisseur 22 mm avec des longueurs unitaires de 19 m. Ces derniers sont espacés transversalement de 10,90 m et longitudinalement de 7,50 m. Leur mise en œuvre s'est faite par vibrofonçage et battage. Un guide de battage assurait la mise en place conforme des tubes.

Après la mise en œuvre des pieux, des chapiteaux et un réseau de poutres et dalles préfabriquées ont été installés. Une dalle de compression a été ensuite coulée en place avant la réalisation des voiries, réseaux divers et équipements.

La partie environnementale a été également très importante sur ce chantier : « On a dû au titre de ce marché favoriser la biodiversité, et créer par exemple des nurseries pour les poissons au pied des pieux », ajoute ce dernier.

LA FORCE D'UN GROUPE

C'est tout naturellement que les deux entités du groupe NGE ont donc pu se répartir les tâches au sein du groupement pour engager les travaux : NGE Fondations assure les travaux de réalisation des pieux qui soutiendront la structure et Rocs gère les opérations de génie civil du chantier.

Les deux cotraitants avaient également besoin de moyens de levage capacitaires et polyvalents pour mener à bien leurs travaux respectifs. « Sur l'île de La Réunion, les opérations de vibrofonçage et de battage ne sont pas courantes ; c'est donc du matériel qui a été mobilisé spécialement pour l'opération », ajoute Nadjim Bacar Fadhuli.

Ils ont pour cela pris attache avec ABC Maxilift, l'un des principaux acteurs dans le domaine du levage et de la manutention à La Réunion et dans l'océan Indien. Jean et Nicolas Cheung-Ah-Seung, respectivement dirigeant du groupe éponyme et directeur d'exploitation de l'activité levage/transport, se sont engagés depuis 2020 dans l'acquisition d'une pelle à câbles Sennebogen 6140HD après avoir finement étudié avec le support de Sygmat les opportunités de développement grâce à ce type de matériel polyvalent. L'engin est arrivé à l'île de La Réunion en avril 2021.



Phase de battage des pieux.

LE CHANTIER EN BREF

- Maître d'ouvrage : Grand Port maritime de La Réunion
- Le maître d'œuvre : Egis
- L'entreprise adjudicataire est un groupement constitué de sociétés du groupe NGE qui sont Roc (mandataire et filiale de NGE sur l'île de La Réunion) et NGE Fondations
- Fin du chantier : avril 2022

Fraîchement débarquée, la pelle a immédiatement rejoint son premier chantier. « La 6140HD équipée d'une flèche de 35 m offre des capacités de levage supérieures à 17 t avec 24 m de portée ; cela répond parfaitement aux besoins du chantier pour la mise en place des pieux battus les plus éloignés », a expliqué Nicolas Cheung-Ah-Seung, justifiant son choix d'engin.

La polyvalence de l'engin a été également un critère essentiel pour guider l'investissement du groupe. Ainsi sur le chantier la grue/pelle à câble assure-t-elle divers travaux de levage et de manutention, mais elle peut aussi et surtout assurer des travaux lourds et dynamiques, tels que le vibrofonçage des tubes de fondations, avec la structure HD de la grue et ses deux puissants treuils de 350 kN ; le maintien et la commande d'un mât de battage lourd Delmag, grâce aux deux treuils de l'engin ; l'excavation des matériaux à l'intérieur des tubes à l'aide d'une benne bi-câbles, avec la synchronisation des treuils et le dispositif de mesure de profondeur programmable ; et les opérations de trépannage, avec recours aux treuils en chute libre de la pelle à câbles.

« Ce premier chantier avec notre grue – pelle à câbles est une vraie réussite ! Sa polyvalence ne s'arrête pas aux chantiers de génie civil ; nous avons également pensé cette machine unique sur la zone de l'océan Indien pour répondre à bien d'autres besoins dans l'industrie pour des manutentions lourdes avec une flèche jusqu'à 58 m, pour des travaux de fondations spéciales à la benne à parois, pour des opérations de dragage à la benne, au grappin ou encore avec un godet de dragline... C'est pour nous une acquisition que nous inscrivons dans une démarche de développement à long terme de nos activités », a précisé Jean Cheung-Ah-Seung. ■

Nadjim Bacar Fadhuli

Directeur général de Rocs et directeur des grands projets de NGE Fondations



PÉRENNISATION EN GÉNIE CIVIL

ENSEMBLE, PRÉSERVONS VOS INFRASTRUCTURES



STABILISEZ & CONFORTEZ VOS OUVRAGES

Infrastructures
ferroviaires

Infrastructures
maritimes

Infrastructures
routières

Ouvrages
d'arts

Grâce à un savoir-faire technique reconnu depuis plus de 25 ans dans l'amélioration de sols, URETEK® a développé des **procédés d'injection de résine adaptés à chaque problématique** et aux spécificités des infrastructures de génie civil.



REACTIVITÉ,
FLEXIBILITÉ



PRIX
FORFAITAIRE



EXPLOITATION
PRÉSERVÉE



SOLUTION
NON INVASIVE



ENVIRONNEMENT
RESPECTÉ



LA RÉFÉRENCE



www.uretek.fr
grandscomptes@uretek.fr

0 800 312 312 Service & support gratuits

Renforcement de base de remblai routier sur zone à risque de cavité de fort diamètre

En France, de nombreuses régions sont sujettes à des problèmes de remontée de cavité, entraînant des affaissements du sol ou des effondrements. La route départementale RD 6002 reliant Nice à Thonon par les cols des Alpes est un axe essentiel pour le département des Alpes-Maritimes, mais une éventuelle interruption aurait des conséquences élevées pour les habitants de la région. Afin de se prémunir d'un risque d'ouverture d'une cavité de diamètre pouvant atteindre un maximum de 9 mètres, deux niveaux de géogrilles de résistance 1500 kN/m ont été installés. Visite de ce chantier au cœur de la partie maralpaine.

Les cavités peuvent être d'origine naturelle (dissolution de roches solubles ou lessivage des particules fines par un écoulement d'eau) ou d'origine anthropique (carrières souterraines, catacombes ou mines). Mais le dérèglement climatique risque d'aggraver le risque de remontée de cavités, notamment à cause de l'augmentation des battances saisonnières des nappes phréatiques. En été, l'assèchement des sols est accru et les pompages des nappes sont de plus en plus intenses. À l'inverse, en hiver, la pluviométrie est plus intense et les crues plus régulières, ce qui sature les sols. Cette variation importante de la saturation en eau peut déstabiliser les sols. Il faut ajouter que l'acidification des eaux d'infiltration, due à sa pollution, accélère aussi la dégradation des roches. Le risque d'effondrement est donc un phénomène de plus en plus fréquent.

Mise en œuvre de deux niveaux de géogrilles de résistance 1500 kN/m

INVESTIGATIONS GÉOTECHNIQUES

Lorsqu'un site est dans une zone présentant un risque de cavité, il convient de réaliser des investigations géotechniques. Elles reposent sur les bases de données, les PPRN, et l'utilisation de techniques géophysiques, telles que la microgravimétrie, la résistivité électrique, la sismique réflexion ou les méthodes électromagnétiques qui peuvent permettre de cartographier les hétérogénéités.

Des sondages permettent ensuite de confirmer et de mieux connaître la taille des cavités ou des décompressions importantes. Lorsque des cavités ouvertes sont découvertes, elles sont le plus souvent comblées. Le traitement des cavités existantes ne supprime pas le risque d'effondrement futur lié à de nouvelles

cavités. Les matériaux en profondeur sont évolutifs et de nouvelles cavités peuvent se développer non loin des cavités déjà traitées.

LES GÉOGRILLES, UNE SOLUTION EFFICACE

Pour réellement limiter le risque de cavité durant toute la durée de vie de l'ouvrage et sur la totalité de la zone à risque, les géogrilles de renforcement sont une solution particulièrement efficace et pertinente.

Les géogrilles sont des géosynthétiques de renforcement, elles fonctionnent par effet membrane et pontent le sommet des cavités. Grâce à un coût bien plus faible que le comblement ou la réalisation de dalles béton (facteur de 3 à 10), elles offrent la possibilité de se prémunir d'un risque important à moindre coût. Leur conditionnement en rouleaux à la dimension de la zone à traiter permet une installation aisée et rapide qui s'intègre parfaitement au terrassement.

Les géogrilles sont caractérisées par une forte résistance à la traction (jusqu'à 2000 kN/m). Elles sont constituées de polymère : elles doivent se déformer d'environ 3 à 6 % pour reprendre efficacement des efforts en traction.

Ainsi, elles sont rarement utilisées sous des bâtiments, car la déformation nécessaire à la mobilisation de la géogrille est en général trop importante pour qu'elle soit acceptée par le bâtiment. À la différence des géotextiles tissés (utilisés en renforcement provisoire), dans lesquels le polymère de renfort n'est pas protégé de l'environnement, la plupart des géogrilles possèdent une enduction ou, mieux, une gaine qui isole le renfort de l'environnement.

Par ailleurs, les géogrilles sont des géosynthétiques ouverts, comportant des mailles, dans lesquelles le sol s'imbrique pour ajouter de la butée en plus des frottements, et optimiser l'ancrage. Les géogrilles sont principalement utilisées en protection contre les cavités sous



Chantier très contraint avec d'une part le train des pignes et d'autres part le travail en demi chaussée.

les infrastructures linéaires (route, rail), sous les parkings, les zones de dépôt, les installations de stockage de déchet, les bassins...

SE PRÉMUNIR DU RISQUE D'OUVERTURE D'UNE CAVITÉ DE DIAMÈTRE MAXIMAL DE 9 MÈTRES

La route départementale RD 6002 constitue la partie maralpine de l'ancienne nationale 202 qui reliait Nice (Alpes-Maritimes) à Thonon (Haute-Savoie) par les cols des Alpes. Cette route est un axe essentiel pour le département des Alpes-Maritimes, elle longe le principal fleuve des Alpes-Maritimes, le Var, et donne accès aux hautes vallées et au département des Alpes-de-Haute-Provence, vers Digne. Une interruption de cette route stratégique aurait des conséquences élevées pour les habitants des vallées. La RD 6002 longe également la voie ferrée des Chemins de fer de Provence et traverse les villages d'Entrevaux et de Puget-Théniers. À l'est de ce dernier, au niveau du hameau des Blanqueries, la RD 6002 et la voie ferrée traversent une zone d'environ 30x80 m, soumise à des remontées de fontis récurrentes depuis des décennies. D'un point de vue géologique, cette zone repose sur les dépôts d'un glissement

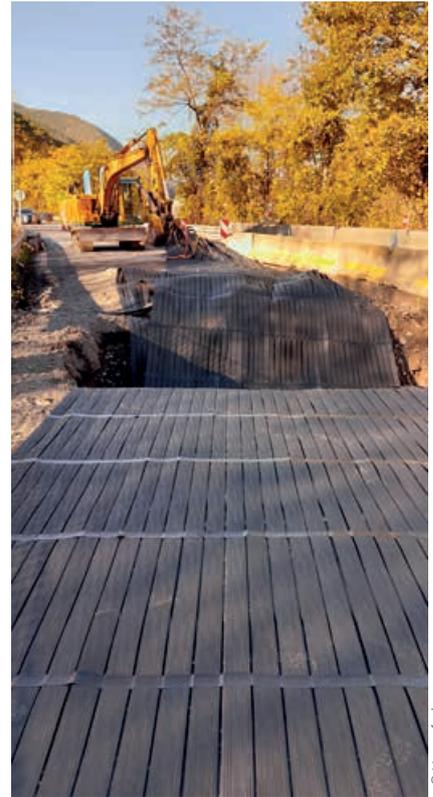
gravitaire massif qui obstrua la vallée du Var à la suite de la dernière grande glaciation.

On peut observer sur le versant opposé de la vallée du Var des glissements actifs de ces dépôts. Ils sont constitués de matériaux très hétérogènes comportant à la fois une matrice argileuse avec des lentilles de gypse et des blocs pluri-centimétriques.

CHIFFRES-CLÉS

- 3 000 kN/m en 2 niveaux de géogrilles
- 3 300 m² de géogrilles ParaLink

Des investigations géotechniques ont eu lieu sur la RD 6002 au droit des zones d'affaissement, et aucun vide franc n'a été détecté. Des zones décompressées ont été identifiées ainsi que des poches de gypse supposées à une profondeur supérieure à 35 m, dans la nappe alluviale du Var. Ce serait la dissolution de ces gypses qui entraînerait une décompression des terrains sus-jacents, puis l'entraînement des fines par la circulation d'eau décompresserait les dépôts et aboutirait aux affaissements en surface. ●●●



Vue de la tranchée d'ancrage depuis la zone protégée. En arrière-plan, la longueur de recouvrement à rabattre sur la tranchée après remblaiement et compactage.

© Maccferri



Suite de logiciels pour l'ingénierie géotechnique



Stabilité des ouvrages



Essais et sondages



Ecrans de soutènement



Modèle géologique 3D



Murs de soutènement



Coupes stratigraphiques



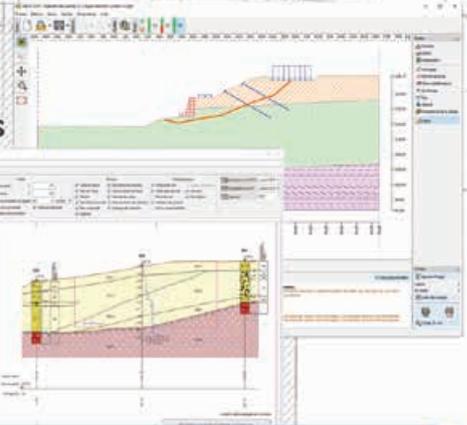
Fondations profondes



Fondations superficielles



BIM géotechnique !



Version d'essai gratuite et sans engagement sur www.finesoftware.fr



Editeur et distributeur de logiciels depuis 1986
Votre interlocuteur direct pour toute question technique ou commerciale

8 quai Bir Hakeim
94410 - Saint Maurice
geo5@itech-soft.com
T: +33 1 49 76 12 59



Mise en œuvre de la ParaLink 1500.

Le 23 août 2016, un effondrement brutal de 9 m de longueur et 5 m de largeur s'est produit : le Département a dû mettre en place un alternat par feux tricolores, compliquant la circulation dans la vallée. Un deuxième fontis est apparu le 4 octobre 2018, à quelques dizaines de mètres du premier. Les remblaiements réalisés à l'époque n'ont pas permis de conserver la route plus de 5 ans, et en 2021, suite à un nouvel affaissement, le conseil départemental a émis le souhait d'installer des géogrilles de renforcement afin de se prémunir de l'ouverture brutale d'une nouvelle cavité dans le futur. De nombreuses études ont été réalisées pour aboutir à la pose de 2 niveaux de géogrilles de résistance extrêmement élevée (1 500 kN/m), une première dans les Alpes-Maritimes. Les géogrilles constituent une forme d'assurance pour le maître d'ouvrage : en cas de survenue d'une cavité, la géogrille évite l'effondrement total, dans lequel un véhicule pourrait tomber. Elle reprend les efforts de la structure sus-jacente et conduit à un simple affaissement en surface, moins dangereux pour l'utilisateur et permettant à l'exploitant de détecter la cavité et d'intervenir avant que son diamètre n'évolue.

Face à la complexité de ce chantier, la société Cozzi (groupe Colas) a fait appel à la société Maccaferri pour dimensionner une solution de renforcement par géogrille. En concertation avec le conseil départemental, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- le système devait permettre de se prémunir d'une ouverture brutale jusqu'à une cavité d'un diamètre de 9 m ;
- la surcharge routière a été prise égale à 20 kPa afin de résister à des convois exceptionnels.

La gamme de géogrille ParaLink est dédiée aux applications les plus exigeantes : elle est certifiée par le BBA (British Board of Agreement), l'organisme de référence sur les géogrilles qui produit des certificats complets reprenant l'ensemble des informations nécessaires au dimensionnement.

Le dimensionnement a été réalisé selon la norme XPG 38065 et la justification des géogrilles repose sur des facteurs



Tranchée d'ancrage. Un engin à pneu peut circuler directement sur la ParaLink.

LES INTERVENANTS DU CHANTIER :

- Maîtrise d'ouvrage : Département 06
- Bureau d'études : Département 06
- Entreprise : COZZI (Groupe Colas)

de réduction (fluage, endommagement à la mise en œuvre et dégradation chimique) certifiés par le BBA. Ce dimensionnement a abouti à l'installation de deux niveaux de ParaLink 1 500 kN/m qui sont en mesure de limiter la déflexion au centre de la cavité à 70 cm pour un diamètre de cavité de 9 m. La plupart des cavités sont évolutives, il est probable que la prochaine cavité soit d'abord métrique avant d'évoluer vers un diamètre plus important. Pour ce faire une idée de l'apport des géogrilles sur une cavité plus réduite, les déflexions en surface (flache) pour des diamètres plus faibles ont été estimées :

- tant que la cavité fera moins de 3 m, elle ne sera pas détectable par une flache en surface ;
- lorsque la cavité atteindra 4,5 m, une flache de 25 cm devrait survenir, il rendra la cavité détectable alors que les usagers seront toujours en sécurité ;
- lorsque la cavité atteindra 6 m, la flache atteindra alors 40 cm ;
- lorsque la cavité atteindra 9 m, la flache atteindra alors 70 cm.

L'installation des 3 300 m² de ParaLink 1500 s'est déroulée en septembre 2021. Les rouleaux ont été produits en longueur sur mesure afin de limiter au maximum les pertes et les recouvrements. Les rouleaux les plus longs (100 m) pesaient plus de 1 700 kg, ce qui a nécessité la construction d'un dérouleur spécifique. Le calepinage et le phasage de pose des deux niveaux de géogrilles ont été particulièrement contraints par le fait que la zone à protéger soit courbe, par la voie ferrée, et par une intervention sur route ouverte en demi-chaussée. Afin de reprendre les efforts de part et d'autre de la zone d'aléa, deux géométries d'ancrage ont été retenues : soit un ancrage à plat de 26 m, soit une tranchée d'ancrage de 1 m de profondeur par 5 m de largeur. L'installation de la géogrille a été un franc succès, salué par le président du Département lors de visite sur le site, le 4 novembre 2021. ■

Sébastien Gastaud
Responsable du département
géosynthétiques
France Maccaferri

A fond les fondations !

En battage ou forage, la LRB 18 fait des prouesses dans l'amélioration des sols.
www.liebherr.com

LIEBHERR

Fondations spéciales LRB 18



À Beaucaire, l'écluse de Nourriguier se remet à flot

Depuis plus de cent ans, l'écluse de Nourriguier à Beaucaire dans le Gard assure la navigation sur le canal du Rhône, l'irrigation des terres agricoles et la protection du port de Beaucaire. L'ouvrage donnait ces dernières années (et pour cause) des signes de vieillissement, notamment au niveau des portes et de l'étanchéité des parois. Une rénovation importante s'imposait. Les travaux menés par VCMF en groupement avec SGC Travaux Spéciaux pour les fondations, se sont révélés particulièrement techniques.

D'une longueur de 89 m, l'écluse de Nourriguier située à Beaucaire (Gard) avait besoin d'une importante réhabilitation. Pour ce type d'ouvrage hydraulique, seules les entreprises spécialisées dans les travaux maritimes et fluviaux peuvent répondre aux marchés. « L'entreprise Vinci Construction travaux maritimes et fluviaux (VCMF) nous a consultés au stade de l'appel d'offres pour l'étude technique et financière des travaux de fondations, notre spécialité. Forts de précédents chantiers en commun, comme le quai Caronte à Martigues, les quais de Saône à Lyon ou les barrages sur la Meuse, la confiance est établie techniquement entre nos entreprises. Ainsi après obtention du marché, VCMF nous a confié les travaux spéciaux sur cette opération. VCMF réalise de son côté le gros de travaux de génie civil », explique Olivier Colombi, responsable de l'agence Sud de SGC et en charge des travaux à Nourriguier. « Pour autant, les chantiers maritimes et fluviaux ne représentent que 15 % de l'ensemble des travaux de fondations spéciales réalisés par notre agence Sud, mais ils permettent de nous positionner sur des travaux à forte technicité », estime-t-il.

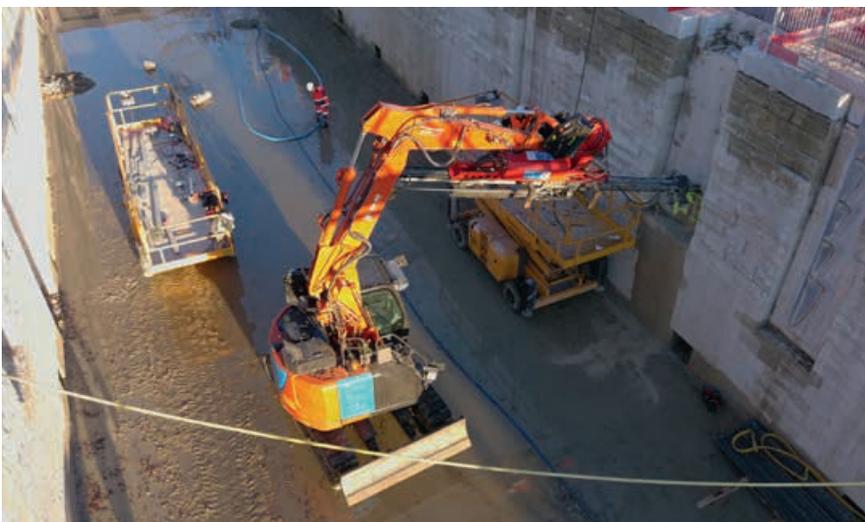
DES TRAVAUX DE FONDATION VARIÉS

Les travaux consistaient à changer les portes et leurs attaches, à refaire toutes les parois en béton, en y ajoutant plusieurs fixations d'amarrage pour les bateaux, telles que des bollards ou des barres d'amarrage. Le radier en partie basse a également été traité dans ses zones de faiblesses principales. Des travaux d'injection ont également été réalisés afin de garantir l'étanchéité qui n'était plus assurée. Pour SGC Travaux Spéciaux, en charge d'une partie de ces travaux, chaque intervention a été techniquement différente.

Le chantier a débuté en novembre 2021, avec la mise en place par VCMF de batardeaux provisoires à l'amont et l'aval de l'ouvrage afin d'assécher l'écluse. Indispensable. « En décembre, nous avons démarré avec les fondations des dalles d'appuis pour les grues mobiles, reprend Olivier Colombi. 24 micropieux au total pour ces dalles définitives utilisées pour le chantier, mais aussi pour les grues qui viendront par la suite faire l'entretien des portes. »

LES PORTES : 82 TONNES DE CHARGES À PRENDRE

Les nouvelles portes en acier aval et amont, d'une largeur totale de 12 m et une hauteur de 7 m (2 x 4 vantaux) et d'un poids total de 82 t, ont nécessité la réalisation de nouvelles attaches. « Sur cette partie de l'ouvrage, nous sommes venus reprendre les efforts de manœuvre avec des micropieux et des tirants. Après avoir préforé plusieurs mètres de maçonnerie, nous avons réalisé 16 tirants en technique autoforante pour reprendre les efforts de manœuvre des portes en tête, et 6 micropieux verticaux installés pour reprendre les efforts d'appuis des portes de l'écluse. Pour la porte aval, rive droite par exemple, il a fallu réaliser 2 micropieux verticaux et 5 tirants », précise encore le responsable. Les tirants ont ainsi été réalisés au fur et à mesure, en 3 interventions avec une équipe de 3 personnes sous la direction du chef de chantier en fondation, de janvier à début mars 2022. Une des difficultés a été la mise en station de la machine de forage, pour ces travaux en hauteur, en rétro ou en « plongée » depuis le haut de l'écluse. Le choix d'une glissière de forage montée sur une pelle a donc été retenu pour faciliter les mises en station et accès au poste de forage.



Au bout de la pelle, le système de glissière de forage pour forer les barres d'amarrage sur la paroi. Pourvues de taillants de carbure, ces barres sont ainsi capables de traverser plusieurs mètres de paroi rocheuse et de s'ancrent ensuite dans le sol.

LES INTERVENANTS :

- Maître d'ouvrage : VNF
- Maître d'œuvre : BRL Ingénierie
- Travaux de génie civil et travaux fluviaux réalisés par VCMF
- Travaux de Fondations : SGC Travaux Spéciaux
- Conception et pose des portes : Hydro
- Début du chantier et fermeture de l'écluse : novembre 2021.
- Réouverture de l'écluse : juin 2022.



La pelle travaille ici du haut de l'écluse, en rétro, le bras de la pelle tendu, avec la glissière horizontale qui fore sous les chenilles de la pelle.

FIXER LES OUVRAGES D'AMARRAGE SUR LES PAROIS

Sur les nouvelles parois, SGC devait également réaliser les fixations des bollards d'amarrage en tête, et des barres d'amarrage sur toute la hauteur des parois de l'écluse. Ces ouvrages de fixation pour les bateaux sont eux aussi ancrés à l'aide de tirants réalisés en technique autoforante. Grâce à une pelle Hitachi mécanique de 21 t, équipée d'une glissière de forage Wimmer, ainsi que d'une centrale de fabrication de coulis de scellement (du ciment prise mer en raison de la présence d'eau), cette technique a répondu aux contraintes géotechniques, avec la traversée des parois en pierre maçonnées puis le forage dans un sol peu cohérent sous nappe.

Les clous autoforants sont constitués de barres de 38 mm, fixées à un marteau hors trou qui vient les mettre en rotoperçusion. Pourvues de taillants de carbure, ces barres sont ainsi capables de traverser plusieurs mètres de paroi compacte et de s'ancrer ensuite dans le sol. « Au total, nous avons réalisé 50 clous autoforants au droit des barres d'amarrage et des bollards pour reprendre les efforts d'amarrage », poursuit le responsable avant de rappeler que bien choisir sa technique de forage au départ est primordial, même si une incertitude technique demeure toujours dans le métier du forage. « Il a fallu s'adapter à la coactivité avec Vinci sur le chantier, avec des temps de grutage de l'atelier de forage en fonction de la position des barres d'amarrage, en haut ou en bas de l'écluse, et d'une rive à l'autre, ce qui a imposé des contraintes de phasage importantes », ajoute-t-il.

SOUS LE RADIER, LA NAPPE

Le radier au fond de l'écluse n'avait pas échappé à l'usure du temps. À certains endroits, et afin de soutenir les futurs nouveaux murs de 30 cm d'épaisseur, le radier a ainsi été renforcé au niveau des semelles grâce à 30 micropieux, avec une contrainte majeure pour SGC, la présence de la nappe en charge directement sous le radier. « Percer dans ces conditions revenait à provoquer de véritables geysers vu la sous-pression de l'eau », indique le responsable. La solution technique proposée par SGC a consisté à ancrer (préalablement au forage) des tubes métalliques Ø 200 mm de 5 m de hauteur sur le radier par scellement chimique. « Lors du forage, ces tubes

PRÉPARATION DU CHANTIER

Au moment de l'appel d'offres, les quantités et le dimensionnement des micropieux et tirants sont estimés, car tous les calculs ne sont pas réalisés avec une aussi grande précision qu'au stade de l'exécution. « Par la suite, lors de la préparation du chantier et en phase exécution, le bureau d'études de Vinci nous fournit les efforts générés par leurs ouvrages de génie civil, et le bureau d'études SGC calcule les ouvrages de fondation (micropieux et tirants) en fonction de ces efforts et des terrains en présence. Ce dimensionnement EXE indique pour chaque ouvrage géotechnique : la section d'acier, la longueur, le diamètre de forage, l'inclinaison », explique Olivier Colombi, SGC Travaux Spéciaux.

permettent de stabiliser l'eau (qui remonte à l'intérieur du tube) à la cote du niveau de nappe, de supprimer la pression et la circulation de l'eau et ainsi, de forer dans un milieu hydraulique stabilisé. Le forage a été réalisé à l'intérieur de ces tubes, en technique autoforante avec notre glissière de forage, pour atteindre le radier, le traverser et forer les terrains sous-jacents, le tout en injectant du coulis dans une eau non circulante, ce qui permet sa prise. Après séchage du coulis le tube est découpé à la cote du radier pour retrouver la barre constituant le tirant », relève encore Olivier Colombi avant de conclure : « La variété des techniques utilisées ici est aussi l'une des forces de l'entreprise SGC, capable d'intervenir sur ces chantiers de fondations pour les ouvrages maritimes et fluviaux. » ■

Veronica Velez

DOOSAN



Power to Renew

Distributeur officiel moteurs Doosan
Solutions Stage V et Hybrides

Contactez-nous pour plus d'informations sur la gamme

NPS Driven
Powertrain Technologies

Tel : +33 (0)2 4000 5000 | www.npsdriven.com/fr | contact@npsdriven.com

Trélazé : amélioration et renforcement de sols par compactage dynamique

La commune de Trélazé, dans le Maine-et-Loire, haut lieu angevin de l'ardoise, a connu une longue histoire industrielle depuis le milieu du 16^e siècle jusqu'à son épilogue en mars 2014 et la fermeture des dernières ardoisières. Menard est intervenu d'avril à juin 2022 pour renforcer les sols de cette friche industrielle et lui permettre d'entamer une deuxième vie avec la construction d'un parc d'activités tertiaire et logistique.

Le site sur lequel Menard est intervenu est un ancien site minier ardoisier d'où ont été extraites des ardoises schisteuses durant près de six siècles. L'exploitation ardoisière du site remonte au 15^e siècle et témoigne des évolutions industrielles de chaque époque.

Au plus fort de leur exploitation au début des années 1900 dans le bassin de l'Anjou, il y a plus de 6 000 ardoisiers qui produisent environ 250 000 t d'ardoises par an. Cette riche histoire industrielle se voit aujourd'hui encore sur les toitures de nombreux bâtiments (églises, châteaux) le long de la Loire (Tours, Amboise, Blois, Orléans...), mais également de Paris et de Normandie où les ardoises pouvaient être acheminées par les canaux reliant la Loire à la Seine.

Le site est aujourd'hui localisé au cœur d'un territoire urbanisé. La mine est devenue, comme d'autres terrains, une friche industrielle que la commune réinvestit progressivement pour donner vie à de nouveaux quartiers, pôles culturels et sportifs, ou encore des espaces tertiaires.

C'est dans ce contexte que Menard s'est engagé pour améliorer le sol d'un terrain de 11 ha entre les mois d'avril et

juin 2022 afin d'y construire un projet d'infrastructure immobilière.

L'ensemble immobilier projeté prévoit : un bâtiment logistique de stockage d'une surface de 12 500 m² ; un bâtiment d'activité atelier et bureaux d'une surface de 1 700 m² ; un bâtiment de formation de 900 m² ; un bâtiment de lavage et pompe de 600 m² ; une aire de stockage extérieur de 4 700 m² ; ainsi que des aires de stockage de poids lourds en béton sur 12 700 m².

Un riche passé de carrières d'ardoise

AMÉLIORATION DES SOLS : LE CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Jusqu'en 2021 des ateliers de fabrication ou de transformation des schistes, ainsi que des bâtiments de stockage et des vestiaires étaient encore présents sur le site. Les travaux de démolition ont mis à jour de nombreuses galeries correspondant à des tunnels peu profonds et servant à la circulation de wagonnets.

Dans la perspective de la construction de nouveaux bâtiments pour créer un parc d'activités tertiaires et logistiques, les concepteurs du projet ont donc dû identifier des solutions permettant de s'adapter aux contraintes laissées par le passé industriel du site :

- présence de terrains remaniés en surface composés de fragments de schistes ardoisiers (épaisseur 0,4 m à 5,5 m) ;
- identification de couches de sables argileux à argiles sableuses peu compacts recouvrant le substratum schisteux avec un niveau d'altération très variable ;
- forte variation latérale de faciès nette à l'échelle de la parcelle passant de schistes compacts affleurants à des schistes altérés ± fortement recouverts de dépôts sablo-argileux ;
- vestiges de construction (anciennes galeries, partiellement détruites et comblées, quelques vestiges de fondations laissés malgré la démolition).



Densification du sol par compactage dynamique.

LA SOLUTION DE FONDATIONS ADAPTÉE AU SOL

Pour le spécialiste de l'amélioration des sols, l'étude d'un projet de renforcement et d'amélioration de sol commence toujours par une étude approfondie permettant de proposer à chaque site la solution la plus adaptée à ses contraintes géotechniques, tout en garantissant le meilleur rendement coût/performance.

L'étude du dossier a montré que deux solutions d'amélioration de sol pouvaient être envisagées : les inclusions rigides de type colonnes à module contrôlé (CMC) et le compactage dynamique.

L'analyse approfondie des données a permis d'identifier certains risques qui ont orienté le choix final vers la solution de compactage dynamique :



L'équipe du chantier.



© Yves Chamoff pour Menard

Grue de compactage en action.

■ la découverte probable d'anciennes galeries non répertoriées. La technique du compactage dynamique permet de simplifier à l'extrême les opérations de purge et de remblaiement, et supprime ainsi la nécessité des préforages dans le cas des inclusions ;

■ la difficulté de dimensionner précisément les inclusions de béton en raison de la présence possible de cavités ou vides francs dans les remblais.

Pour ce chantier, le compactage dynamique présente plusieurs avantages :

■ l'approche forfaitaire est possible et intègre l'ensemble des aléas identifiés ;

■ les vestiges, vides dans les remblais, blocs ou autres obstacles ne présentent pas de risque pour la fiabilité des fondations et la sécurité des équipes ;

■ la technique du compactage dynamique est facilement modulable selon des hauteurs de sols à renforcer, la profondeur du toit du rocher étant très hétérogène sur le site ;

■ le compactage dynamique est l'une des techniques les plus sobres en émissions de CO₂. Pour ce chantier, la solution retenue permet de diviser par 4 la facture de CO₂ par rapport à la solution des inclusions, en tenant compte des émissions liées au transport des hommes, du matériel et des matériaux.

Après 2 mois de travaux de compactage, les différentes zones du projet ont pu être réceptionnées par la maîtrise d'ouvrage.

Les sondages de contrôle, réalisés grâce au pressiomètre Menard, ont montré des caractéristiques de sol améliorées d'un facteur 3 à 4 suivant les zones, ainsi que des valeurs homogénéisées sur l'ensemble de l'emprise du chantier et sur la hauteur des différents faciès géotechniques présents.

Les objectifs définis en amont par les équipes Menard lors des études d'exécution ont donc été atteints, voire dépassés. Les garanties de portance sous fondation et de tassements absolus et différentiels sous dallage sont confirmées.

Les premiers poteaux à peine levés, la grue de compactage Menard est déjà mobilisée sur sa prochaine opération ; celle de la construction d'un centre de tri dans la Drôme. Quant aux débris ardoisiers de Trélazé, ils sont prêts pour leur nouvelle vie ! ■

La seconde
vie d'une
friche
industrielle

Pierre-Yves Bellec

Responsable de l'agence Ouest de Menard

Conseils et Ingénierie - Géosciences et Structure



IDDEA
GROUPE GENGIS
Ingénierie de l'Environnement



GROUPE GENGIS



GEOETHER
GROUPE GENGIS
Géothermie et Hydrogéologie

Synergie d'expertises



TECHNOSOL
GROUPE GENGIS
Ingénierie et Expertise Géotechnique

Le Groupe Gengis rassemble sous sa bannière des entreprises expertes, à taille humaine, qui travaillent ensemble à la résolution de vos problématiques du sous-sol, de l'environnement et de la structure. Notre groupe cultive son indépendance, son dynamisme et son pragmatisme. Nos entreprises se développent sur tout le territoire pour mieux vous accompagner.



IPC
GROUPE GENGIS
Ingénierie et pathologie de la construction

geother-gengis.fr |
 iddea-gengis.fr |
 ipc-gengis.fr |
 technosol-gengis.fr |
 groupe-gengis.fr



Israël : Les tirants d'ancrage précontraints en fibre de verre Astec Active Anchor

La société Bodendip, responsable du projet Tel-Aviv Weizmann Street choisit les ancrs polymères de la société Dextra pour les ancrages provisoires.

Les travaux de fondation en zones urbaines plus ou moins denses sont de plus en plus contraignants, et notamment sur le plan légal ou de l'encombrement. La stabilisation de parois provisoires après excavation l'est tout particulièrement en raison de l'interdiction ou de la lourde taxation des tirants d'ancrage en acier laissés dans les sols après utilisation. C'est pourquoi les entreprises de fondation font appel soit à l'utilisation de butons, soit à des ancrages en acier démontables : les butons posent néanmoins des problèmes d'encombrement de la fouille, gênant les travaux, sans parler des problèmes de disponibilité et de logistique ; les tirants d'ancrages démontables présentent, de leur côté, un caractère aléatoire sur leur bon fonctionnement et plus particulièrement l'opération d'arrachage des tirants une fois la structure permanente érigée.

Une nouvelle solution de tirants d'ancrage précontraints en fibre de verre AAA, conçue et fabriquée par la société Dextra depuis plus de 10 ans, permet de répondre très simplement à cette problématique, rencontrée notamment sur de nombreux chantiers à Tel-Aviv, en Israël.

PROJET TEL-AVIV WEIZMANN STREET

Ces solutions d'ancrage précontraint en fibre de verre sont largement utilisées sur les chantiers de Tel-Aviv, les butons étant trop contraignants aux yeux des entreprises générales de construction, et les ancrages acier démontables peu utilisés pour des raisons de fiabilité.

C'est le cas pour ce projet résidentiel en plein cœur de Tel-Aviv, Weizmann Street, immeuble de luxe de 5 étages, avec 2 niveaux de parking.

La société Bodendip, responsable du projet, avait déjà choisi les ancrs polymères Dextra en sous-traitance de Shikun & Binui (l'un des leaders de la construction en Israël), et a renouvelé sa confiance à Dextra dans le cadre de ce projet.

Après forage selon les diamètres préconisés par Dextra et l'ancre mise en place, un système de vérin classique permet la mise en tension afin d'assurer la précontrainte sur les câbles acier au niveau de la tête d'ancrage, et cela pour une durée de 12 à 24 mois selon les projets.

SELON THAER SHAMA, LE CHEF DE PROJET

« La société Bodendip privilégie systématiquement des ancrs, plutôt que des butons, facilitant grandement la circulation et la gestion du chantier et donc la rapidité d'exécution. Les butons limitent les choix de méthodes de construction, et leur approvisionnement en début de chantier et l'évacuation en fin de chantier génère une activité de manutention et un trafic routier important, accentuant la gêne occasionnée aux riverains et augmentant considérablement la pollution et l'impact carbone. »

« L'autre avantage de cette solution est son aspect modulaire qui nous permet de dimensionner à souhait l'ancre en jouant sur le nombre de tendons. Ainsi, dans le cas où les conditions géotechniques évoluent au fur et à mesure de la fouille et différentes des campagnes géotechniques menées en amont du projet, il est toujours possible d'adapter le dimensionnement de nos ancrages actifs provisoires, un grand avantage pour la gestion du projet. »

« Une fois la phase d'utilisation active des ancrs achevée, il ne reste plus qu'à détendre les ancrs par ruptures du câble acier, et nous pouvons laisser le tirant dans le sol, même hors limite de propriété, ce qui le cas de ce projet. »



Thaer Shama



75 ancrs de 12 m avec 2 m de câble, chaque ancre étant composée de 4 torons permettant de développer au total 60 t, avec la moitié en longueur libre à gauche (gaine plastique protégeant du scellement) et longueur scellée à droite.



© Dextra

LES ANCRS FRP AAA PAR DEXTRA

Le principe de ce tirant est de combiner une armature en fibre de verre dans le terrain à une armature métallique au droit de la paroi. La fibre de verre par sa capacité à être facilement découpée permet à tout engin de creusement ou de forage d'opérer au travers de l'armature sans être gêné. L'armature métallique en tête, qui est un toron de précontrainte, permettant une mise en tension traditionnelle (tête d'ancrage et vérin standard).

Le développement de ce nouveau procédé s'est fait autour de 3 technologies connues :

- la fibre de verre est déjà largement utilisée en renforcement des sols pour des ancrages passifs (clous et boulons en tunnel notamment). La fabrication des barres en fibre de verre et les techniques de scellement sont parfaitement maîtrisées. Des armatures passives en fibre de verre sont utilisées dans des cas similaires à ceux visés par l'utilisation du tirant AAA, comme passage de tunnelier, destruction par des outils de forage, gestion des courants vagabonds. L'utilisation de ce matériau est donc apparue comme évidente pour cette application ;

- le toron de précontrainte acier :

dans les cas habituels d'ancrages passifs en fibre de verre, l'effort admissible sur la tête d'ancrage est très limité. Dans le cas des tirants d'ancrage précontraints, l'effort maximal se situe au niveau de la tête d'ancrage, et une traction d'épreuve à 1,15 x effort de service doit être appliquée. Par le passé, des solutions ont bien été étudiées pour réaliser

une tête d'ancrage sur des barres en fibre de verre (notamment pour des essais), mais aucune n'a pu aboutir à un système utilisable à l'échelle d'un chantier, car elles sont trop coûteuses, trop encombrantes et trop longues à mettre en œuvre. En revanche, l'utilisation du toron de précontrainte comme continuité du tirant permet d'adapter une tête d'ancrage parfaitement maîtrisée puisque issue d'un système de précontrainte éprouvé ;

- connexion mécanique entre le toron acier et le tendon en fibre de verre :

le système Griptec, développé initialement par la société Dextra pour le raboutage d'armature – notamment sur des projets nucléaires, de par ses hautes performances mécaniques – a été adapté afin de permettre la connexion entre le toron de précontrainte en acier et le tendon en fibre de verre.

Cette technologie consiste en un système de manchons filetés sertis par un système breveté d'extrusion à froid.

UNE TOUTE NOUVELLE APPROCHE

De par sa conception, les matériaux utilisés et ses performances, le tirant AAA de Dextra s'inscrit dans la prise de conscience collective actuelle qui tend à limiter l'impact sur l'homme et sur l'environnement pour laisser une place nette aux générations futures. C'est une technique de soutènement « discrète » à tout point de vue, y compris sur l'impact CO₂ : de nombreuses études démontrant que les armatures en fibre de verre ont un impact 35 % plus faible que celui des armatures en acier. ■

Vincent Leclerc

Dextra Europe



© Dextra

Confortement durable des digues à l'aide des palplanches en acier

Pour le confortement de la digue Gorinchem-Waardenburg (GoWa) aux Pays-Bas, des palplanches en acier sont utilisées à grande échelle pour protéger la digue contre les risques de ruptures dues à une défaillance de stabilité générale ou à des phénomènes de boulangement et d'érosion régressive (renard hydraulique). De nombreux efforts sont entrepris pour réduire l'impact environnemental du projet, notamment en réutilisant des palplanches de réemploi, fabriquées à partir d'acier recyclé.

La maîtrise des eaux aux Pays-Bas a toujours été importante pour la survie du pays : environ 2/3 des Pays-Bas sont vulnérables aux inondations et aux submersions marines, alors que 1/3 de la surface du pays se situe au-dessous du niveau de la mer. Les premiers grands travaux hydrologiques pour gagner des territoires sur les eaux remontent au XIII^e siècle, et aujourd'hui un réseau de plus de 17 500 km de digues protège les 6 000 km de canaux qui parcourent le pays. En particulier, 3 750 km de digues constituent la défense primaire contre les inondations, protégeant les Pays-Bas contre les crues de la mer du Nord, de la mer des Wadden et des principaux fleuves.

Lancé à la suite des inondations dramatiques de 1953, le grand plan « Delta » a permis d'améliorer la sécurité des terres gagnées sur les eaux. On estime que le risque d'inondation a été réduit à moins d'une fois tous les 4 000 ans en Zélande, et même une fois tous les 10 000 ans dans la région de Rotterdam. Les travaux de confortement et de rehaussement des digues se poursuivent à travers le pays, et surtout sur les 1 850 km

de digues qui ne répondent pas encore aux normes de sécurité requises d'ici à 2050.

Dans le cadre du confortement de la digue Gorinchem-Waardenburg (GoWa) aux Pays-Bas, le maître d'ouvrage – Graaf Reinald Alliantie – a choisi d'utiliser des palplanches en acier sur plus de 6 km de la digue, longue de 23 km au total. Elles sont utilisées à grande échelle pour protéger la digue contre les risques de ruptures dues à une défaillance de stabilité générale ou à des phénomènes de boulangement et d'érosion régressive (renard hydraulique).

Ici, les palplanches sont une solution idéale pour soutenir la digue et la renforcer contre ces deux types de ruptures, en particulier là où l'espace environnant est limité et ne permet pas l'extension de l'emprise de la digue au sol. Dans ce cas, la construction d'un seul mur de palplanches permet d'assurer les deux tâches de confortement.

L'étendue du projet, et la récente intégration de critères environnementaux dans les procédures d'appel d'offres aux Pays-Bas (décrite plus loin dans l'article) imposent de réduire autant que possible

l'impact environnemental des solutions sélectionnées.

Le maître d'ouvrage et ArcelorMittal ont collaboré pour réduire l'empreinte carbone du projet en appliquant les trois principes importants de l'économie circulaire : réduire, réutiliser, recycler.

RÉDUIRE

Réduire la consommation de matières premières est une façon de préserver l'environnement. Ce précepte est fondamental pour l'industrie sidérurgique, qui s'efforce de fabriquer des produits toujours plus légers et plus performants. Les efforts constants de recherche améliorent les performances techniques des produits en réduisant le poids total : nouvelles nuances d'acier qui permettent de choisir une palplanche plus légère pour la même performance, optimisation des profils, amélioration des procédés... Ainsi, l'innovation dans la technologie de l'acier et du laminage, ainsi que dans les équipements d'installation, a permis de réduire en quelques décennies de plus de 50 % la quantité d'acier nécessaire pour réaliser exactement le même mur de soutènement.

Les bureaux d'études qui conçoivent les infrastructures optimisent le dimensionnement, pour choisir les meilleures solutions pour optimiser les coûts, le poids total d'acier, la consommation de ressources et l'impact environnemental.

C'est ainsi que sur le projet GoWa les palplanches sont fournies avec un acier de haute qualité S430 GP, pour obtenir la résistance requise avec un profil de palplanche plus léger.

Le programme de recherche public « POV Macrostablieit » aux Pays-Bas a été lancé en 2015 pour améliorer les techniques de confortement des digues. L'essai d'effondrement en grandeur nature sur la digue renforcée d'Eemdijk de 2018 a montré que le renforcement structurel d'une digue avec un mur continu présente des avantages importants*. Non seulement il offre la possibilité de redistribuer les charges à la fois dans l'axe vertical et longitudinal de la



© Waterschap Rivierland

Confortement de digue à Wolferen – Sprok.

digue, mais il est démontré qu'après une défaillance structurale le rideau de palplanches en acier contribue toujours à la capacité de rétention d'eau de la digue. L'essai a également montré qu'il est possible de sélectionner des palplanches plus courtes et plus légères que ce qui a été fait jusqu'à présent, en vue d'optimiser le volume total d'acier de ce type de projets.

RÉUTILISER



Test de rupture.

La réutilisation des palplanches de réemploi est une excellente solution pour les applications temporaires, telles que les fosses de construction temporaires. Même si cela reste plus rare, les palplanches de réemploi sont également employées de façon permanente, comme pour le confortement d'une digue. Pour le projet Gorinchem-Waardenburg, le maître d'ouvrage Graaf Reinaldalliantie a choisi délibérément d'utiliser des palplanches de réemploi aux endroits présentant un risque de défaillance hydraulique. Pour protéger la digue contre un renard hydraulique, il faut allonger la longueur du chemin d'infiltration afin que le phénomène ne puisse plus se produire. En effet, dans cette application, un mur de palplanches de réemploi peut remplir cette fonction aussi bien qu'un mur de palplanches neuves. La principale différence est que la totalité des émissions de gaz à effet de serre de la phase de production des palplanches en acier n'a pas à être incluse dans le bilan environnemental du projet, car elles ont déjà été partiellement incluses dans les applications temporaires précédentes.

RECYCLER

Les palplanches sont livrées directement depuis l'usine d'Arce-



Digue à Saint-Laurent-du-Var.

lorMittal au Luxembourg en privilégiant des modes de transport peu émetteurs, tels que le train ou les voies navigables. L'acier y est produit par la filière du four à arc électrique (FAE). Un four à arc électrique est alimenté uniquement avec de la ferraille issue des filières du recyclage, et par conséquent aucun minerai de fer brut n'est utilisé. La production d'acier en four à arc électrique produit moins de résidus que la production primaire en haut-fourneau, et ses émissions de dioxyde de carbone sont jusqu'à cinq fois plus faibles.

Depuis plusieurs décennies, la production de palplanches « EcoSheetPile » fabriquées par la filière électrique en utilisant 100 % de matériaux recyclés n'émet que 520 kg d'équivalent

DES PROJETS IMPORTANTS AUSSI EN FRANCE

L'association France Dignes recense plus de 6000 km de digues en France. Les solutions acier d'ArcelorMittal Palplanches sont régulièrement sélectionnées pour des projets d'extension ou de confortement de digues.

CO2 par tonne de produits finis. Lancée en 2021, la nouvelle marque de palplanches en acier « EcoSheetPile Plus », intégrée à l'initiative « Xcarb de sources recyclées et renouvelables » du groupe ArcelorMittal, fait un pas de plus pour la réduction des émissions de production d'acier par la filière électrique en utilisant exclusivement de l'électricité provenant de sources renouvelables solaires ou éoliennes. Cela permet d'atteindre une empreinte carbone 30 % plus faible qu'avec le mix énergétique habituel, et bien plus encore si on la compare à la sidérurgie conventionnelle. Certifiée par une déclaration environnementale de produit (DEP) spécifique, la production de la gamme EcoSheetPile Plus n'émet que 370 kg d'équivalent CO2 par tonne de palplanche produite. Elle bénéficie également d'une « garantie d'origine » certifiant les sources renouvelables de l'électricité, vérifiée par un auditeur externe.

Contrairement à d'autres matériaux utilisés dans les murs de soutènement et les fondations profondes, les palplanches ...

Kaëna
GÉOTECHNIQUE

GAGNONS SUR LE TERRAIN

PREVENIR - OPTIMISER - PERENNISER

SONDAGES

LABORATOIRE

INGÉNIERIE

ST VINCENT DE MERCUZE (38)
Siège social tél: 04 76 97 94 64

ANNECY (74) tél: 04 58 10 05 74

KAENA RECRUTE...
www.kaena.fr

en acier peuvent être extraites du sol à la fin de la durée de vie de la structure et recyclées à 100 %. Même en fin du cycle de vie, l'acier conserve ses propriétés et peut être recyclé, par exemple dans un four à arc électrique pour produire de nouveaux produits en acier de qualité identique, voire supérieure.

Le confortement de la digue de Gorinchem-Waardenburg a une durée de vie théorique de 100 ans. La corrosion des palplanches dans un corps de digue étant minime, les palplanches pourront être retirées de la digue même après 100 ans. Certaines des palplanches retirées pourront être réutilisées dans d'autres projets. Tout ce qui ne pourra pas être réutilisé sera alors entièrement recyclé comme matière première pour la filière électrique.

ArcelorMittal dispose des DEP spécifiques pour les palplanches des gammes EcoSheetPile et EcoSheetPile Plus, qui

CONFORTEMENT DE DIGUE À SAINT-LAURENT-DU-VAR

Le plan de prévention risques inondations (PPRI) pour la basse vallée du fleuve Var a mis en évidence la nécessité de revoir la protection de la ville de Saint-Laurent-du-Var. La révision du programme d'actions de prévention des inondations (PAPI) retient de protéger la digue sur 1 100 m supplémentaires. Les travaux concernent près de 2 000 habitants, une zone d'activité artisanale, des infrastructures sportives et culturelles et le centre-ville. Le confortement de la digue de Saint-Laurent-du-Var s'inscrit dans la complémentarité du système d'endiguement des deux rives. Les travaux de confortement de la digue matérialisée par la route métropolitaine 95 représentent un linéaire de 1,6 km. Le confortement s'effectue au moyen d'un double rideau de palplanches pour les secteurs de berge à emprise suffisante : des AZ 23-800 de 12,7 m à 14,5 m en rideau principal et des AZ 18-800 de 2,5 m à 7,5 m en rideau d'ancrage, en nuance d'acier S 355 GP, pour un total de 2 315 t.



Confortement de digue à Saint-Laurent-du-Var.

© NGE-GIS & Drone

RÉHABILITATION DES DIGUES DE FOUCHY À TROYES*

Au cœur de l'agglomération troyenne, le réseau hydrographique représente un linéaire d'environ 130 km et la présence de l'eau fait d'elle une « Petite Venise ». La réhabilitation des digues protégeant la ville a été lancée à la suite d'un diagnostic de sûreté établi en 2011. La réhabilitation des digues de Fouchy est une des dernières phases mises en œuvre, avec notamment des rideaux de palplanches combinées HZ/AZ d'ArcelorMittal.

Les cabinets Setec Hydratec et Géotec, maîtres d'œuvre du projet, ont choisi la solution palplanches sur certains secteurs où un talutage 2H/1V empiéterait de manière excessive sur la section hydraulique du fleuve. Le groupement d'entreprises Vinci Construction et Leduc TP a proposé et mis en œuvre des palplanches modernes et performantes, les AZ 18-800 de 800 mm de largeur en rideau auto-stable. Elles se révèlent optimales et économiques pour répondre aux sollicitations de la digue de Fouchy. Afin de limiter la



© Leduc

Réhabilitation des digues du Fouchy à Troyes.

déformée des parties les plus hautes, elles sont mises en œuvre en rideau combiné avec des profilés HZ-M, conférant à l'écran l'inertie nécessaire pour limiter sa déformation.

De plus, les palplanches AZ 18-800 et les profilés HZ-M, fabriqués au Luxembourg à partir de 100 % d'acier recyclé, ont contribué activement à réduire le transport et limiter l'impact environnemental du projet.

* cf. Solscope Mag no 16 (novembre 2020).

émettent 520 kg CO₂/t de produits finis, respectivement 370 kg CO₂/t.

INTÉGRATION DES CRITÈRES ENVIRONNEMENTAUX DANS LES PROCÉDURES DE MARCHÉS PUBLICS

Quelques pays européens ont commencé à intégrer des critères environnementaux dans leurs procédures d'attribution des marchés publics dans le domaine du génie civil, et les Pays-Bas sont à l'avant-garde. Une monétisation des performances environnementales est systématiquement intégrée dans leurs appels d'offres publics, avec comme objectif de sélectionner l'offre économiquement la plus avantageuse et durable. Le système de monétisation repose sur une méthode de pondération appliquée à de multiples indicateurs environnementaux provenant soit des DEP nationales, soit de données génériques contenues dans une base de données nationale, pour obtenir un indice de coût environnemental (ICE) pour chaque produit. L'ICE global calculé intègre les quantités de matériaux ayant une grande répercussion sur l'empreinte environnementale du projet et est converti en une remise fictive qui est soustraite du prix global de la soumission. Ainsi, le contrat n'est pas nécessairement attribué à l'entrepreneur dont l'offre de prix est la plus basse. Cette approche incite les entrepreneurs et les fabricants à investir dans la recherche

de solutions moins émettrices de gaz à effets de serre, et à optimiser la conception et l'exécution afin de réduire l'impact environnemental de chaque projet. En outre, l'avantage de cette méthode est que l'ICE intègre l'effet de multiples indicateurs environnementaux et des quantités totales des matériaux fournis. Ceci empêche la manipulation de l'impact environnemental en transférant la charge d'un indicateur environnemental spécifique ou d'un produit à un autre. Elle ne se limite pas à l'empreinte carbone !

Le modèle néerlandais est une source d'inspiration pour l'évolution possible des procédures d'appels d'offres publics en France. Et dès à présent, tous les acteurs du génie civil, depuis les donneurs d'ordre jusqu'aux bureaux d'études en passant par les entreprises de construction, peuvent choisir des solutions plus durables et économiquement viables. ■

Roel Bijlard
Franck Pichoff
François Fohl
ArcelorMittal

* Proceedings of the XVII ECSMG-2019
Geotechnical Engineering Foundation of the Future

Étude de confortement de la digue du port à Givet

Suite à de multiples intempéries, la Meuse a connu de grandes crues successives. La dernière a révélé des brèches dans le corps de la digue. De nombreux travaux ont alors été menés afin de conforter la digue.

La commune de Givet se situe dans les Ardennes à une soixantaine de kilomètres de Charleville-Mézières, et à quelques pas de la frontière franco-belge. La digue du port se dessine en rive ouest de la Meuse, qui s'écoule avec un débit moyen de 350 m³/s à l'échelle de ses 950 km de linéaire.

Sur le plan géologique, l'ouvrage est érigé sur les alluvions de la Meuse, dont le cours a érodé le substratum schisteux avec le temps. Dans ce contexte, une nappe alluviale domine la plaine et il n'est pas étonnant que les communes environnantes se soient dotées d'un plan de prévention des risques liés aux inondations.

Historiquement, la digue a été créée durant la seconde moitié du 19^e siècle, dans le cadre de la construction du canal de la Meuse. Elle s'étire actuellement sur plus de 2,5 km, et protège la rive ouest de la Meuse entre l'écluse des Quatre-Cheminées, à l'aval, et le barrage des Quatre-Cheminées, à l'amont. On notera parmi les enjeux protégés le port de Givet, plateforme économique importante de la région (450 000 t de flux de marchandises en 2018, plasturgie, collecte de métaux, silos à grains, plaisance...) ainsi que les quartiers Bon-Secours, Mon-Bijou et La Soie, où vivent près d'un millier de personnes.

Suite à d'importantes intempéries, la Meuse connaît trois crues successives, en 1991, 1993, puis 1995, qui se soldent par des victimes humaines. En 1995, trois brèches sont ouvertes dans le corps de la digue, résultant en l'inondation et la paralysie de la ville (1,5 m de hauteur d'eau constatée dans les rues).

Depuis, des travaux successifs ont été menés pour augmenter le niveau de sécurité de la digue. C'est dans ce cadre que Ginger CEBTP a été missionnée afin de réaliser une étude géotechnique de niveau avant-projet.



Crue au port de Givet.

PRÉSENTATION DE LA DIGUE

La digue résulte de l'amoncellement de matériaux prélevés dans le lit même du fleuve à l'échelle de ses 2,55 km de linéaire. L'étude a débuté par un inventaire des données disponibles ainsi qu'une inspection visuelle de la digue.

Le découpage de l'ouvrage en tronçons a permis dès le départ de définir et de prioriser les actions à mener par la suite. La digue a ainsi été divisée en 10 tronçons, en fonction de sa géométrie et des aménagements présents :

- des rideaux de palplanches en pied de digue côté canal ;

- des zones de rehausse de la digue par des remblais renforcés ;
- des rideaux de palplanches réalisés depuis la crête ;
- des enrochements maçonnés en pied côté Meuse ;
- des cages en gabions et/ou des enrochements libres en pied côté Meuse.



Montage Ginger depuis données géoportail.

DONNÉES TOPOGRAPHIQUES

Pour les besoins de l'étude, un relevé topographique a été réalisé en 2020, comprenant un profil longitudinal en crête ainsi que 77 profils transversaux (soit environ 1 profil tous les 30 m de digue). Ce relevé a mis en évidence deux géométries types de digue :

- certains tronçons se situent à distance du lit mineur de la Meuse, séparés du cours d'eau par une berge de largeur variable. Ces tronçons ne se retrouvent ainsi en contact avec le fleuve qu'à l'occasion d'épisodes de crue ;

d'autres tronçons se situent en contact récurrent avec le lit mineur de la Meuse. Ces tronçons sont pour leur part sujets à des phénomènes d'érosion, se manifestant souvent par des affouillements en pied de digue, visibles sur les profils en travers. La comparaison avec un précédent levé topographique (2013) a même permis de constater une évolution de la géométrie sur certains profils, soulignant ainsi la cinétique du mécanisme d'érosion externe.

INVESTIGATIONS GÉOTECHNIQUES

Une fois l'enveloppe extérieure de la digue définie, l'étude s'est focalisée sur la caractérisation de la structure intérieure de la digue.

Pour ce faire, une campagne comprenant une prospection géophysique et des investigations géotechniques a été engagée. La prospection géophysique par méthode électromagnétique (EM31) a permis dans un premier temps de dresser une cartographie du comportement des matériaux constitutifs de la digue et d'identifier des zones singulières. Les investigations géotechniques ont alors été implantées en fonction de ces informations, complétant deux précédentes campagnes (2002 et 2014).

Au total, près de 70 sondages (pressiométriques, carottés, CPT, pénétromètre dynamique, et tarière) sont répartis sur les 2,55 km de digue, soit un ratio d'un sondage tous les 35 m.

Les échantillons intacts prélevés dans les sondages carottés ont donné lieu à des analyses granulométriques, ainsi qu'à des essais de cisaillement. L'apport du pénétromètre statique est à souligner : bien que sujet à des refus prématurés ●●●

en raison de la présence de blocs indurés, ou l'insuffisance de réaction liée à des ancrages déficients dans les sols parfois décomprimés, cet outil a été d'une grande aide pour décider du découpage des modèles géotechniques les plus représentatifs de chaque tronçon d'ouvrage.



© GINGER/ERIC TADBIR

RÉSULTAT DE LA PROSPECTION GÉOPHYSIQUE

La prospection géophysique à l'EM31 a permis de mesurer la conductivité apparente des sols constituant le corps de la digue.

La mesure de la conductivité apparente moyenne a été réalisée sur une première tranche de 0 à 3 m, puis sur une tranche de 0 à 6 m. Ces mesures ont mis en évidence des sols à dominante sablo-graveleuse dans le corps de digue, recouvrant les alluvions. La présence d'éléments métalliques de type palplanches a en outre été confirmée.

RÉSULTATS DES SONDRAGES GÉOTECHNIQUES

Ces sondages ont confirmé la prédominance de faciès sablo-graveleux ; ils ont permis en outre de constater la présence d'une matrice limoneuse perturbée par des passages franchement décomprimés. La base de la digue a été identifiée comme étant dominée par des sols sablo-graveleux très caillouteux. Les caractéristiques mécaniques mesurées in situ, complétées par des mesures de perméabilité horizontale, ont souligné l'hétérogénéité de la digue, sur l'ensemble de son linéaire. Celle-ci peut ainsi être qualifiée « d'homogène dans son hétérogénéité » !

La synthèse des données géophysiques et géotechniques obtenues sur site et en laboratoire a permis de distinguer deux structures géotechniques de digue :

- structure n°1 : Digue structurée en bicouche, constituée d'une partie supérieure compacte recouvrant une base de plus faible compacité ;
- structure n°2 : Digue monocouche, constituée de matériaux de faible compacité sur toute sa hauteur. L'implantation des zones de faiblesses plus ou moins prononcées est d'ailleurs cohérente avec la localisation des brèches survenues lors de la cure de 1995.

ÉTUDE DES MÉCANISMES DE RUPTURE

Quatre grands mécanismes susceptibles de causer une défaillance ont été examinés : la surverse, l'érosion externe, l'érosion interne et le glissement de terrain. Il est à noter que ces mécanismes sont très souvent interdépendants.

La surverse correspond au débordement de la digue par l'écoulement. Lors de ce débordement, les vitesses d'écoulement peuvent favoriser l'érosion externe du parement de digue côté val. À ce titre, le respect d'une revanche (différence entre la crête de digue et le niveau de crue) constitue une mesure de sécurité évidente.

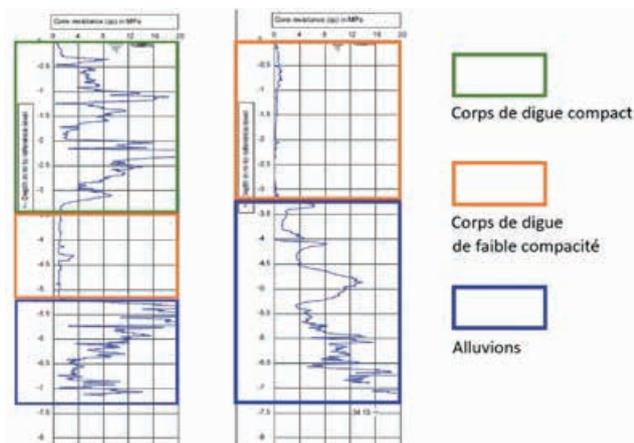
L'érosion externe traduit le mécanisme d'arrachement des particules d'un sol soumis à un écoulement à sa surface. Le mécanisme survient lorsque la vitesse d'écoulement dépasse la vitesse critique d'arrachement du sol (fonction de sa granulométrie).

De manière analogue, l'érosion interne traduit le mécanisme de migration de particules d'un sol soumis à un écoulement en son sein. C'est le mécanisme de défaillance le plus sournois, car sa manifestation n'est pas immédiatement visible depuis la surface. Sous l'effet d'un gradient, le mécanisme peut s'initier :

- le long d'une interface entre deux matériaux différents (érosion de contact),
- le long d'un chemin de circulation préférentiel, comme un terrier, une fissure, etc. (érosion de conduit),
- au sein même d'un sol où il existe un contraste granulométrique important (suffusion),
- à l'exutoire de l'écoulement, par boulangage ou claquage hydraulique.

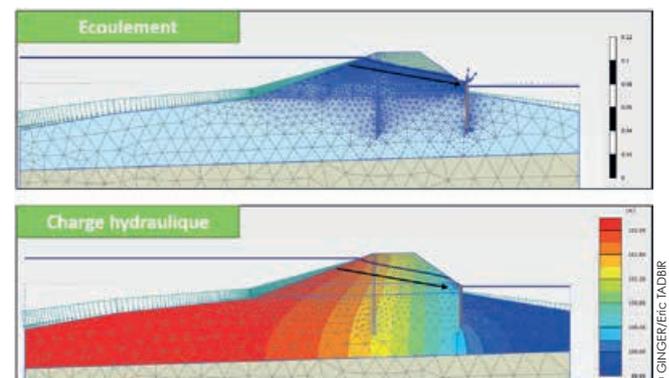
Une fois initié, le mécanisme peut évoluer et régresser en s'accéléralant, jusqu'à causer une brèche au sein de la digue. À noter que ce mécanisme peut également survenir dans l'horizon de fondation de toute digue.

L'évaluation de la sensibilité à ce mécanisme prend en compte les sollicitations (charges hydrauliques, chemins d'écoulement) et les propriétés des terrains (perméabilité, gradient critique). Ainsi les mesures et essais géotechniques sont importants pour étayer les corrélations que la littérature propose, notamment pour ce qui lie le gradient critique et la granulométrie.



© GINGER/ERIC TADBIR

Montage Ginger sur la base de courbes obtenues avec CPTask (licence possédée par Ginger).



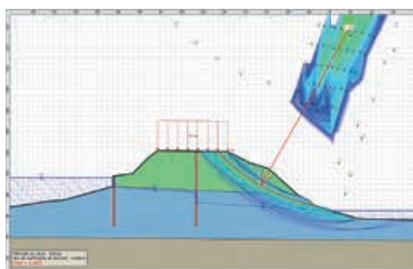
© GINGER/ERIC TADBIR

Extraits de calculs progiciels dont GINGER à la licence.

ÉTUDE DE STABILITÉ AU GLISSEMENT

L'étude de stabilité de pentes a été réalisée en prenant en compte les profils géométriques, les hypothèses de charges hydrauliques à l'extérieur et l'intérieur de la digue (conditions normales d'exploitation, situations transitoires, de crue et de décrue), les surcharges d'exploitation, ainsi que les modèles géotechniques par zone.

La connaissance des propriétés de cisaillements des terrains (cohésion, angle de frottement), obtenues à partir des essais mécaniques en laboratoire a constitué une donnée fondamentale pour permettre d'évaluer la résistance de la digue vis-à-vis du phénomène de rupture.



© GINGER/ERIC TADIBR

Extraits de calculs progiciels dont Ginger à la licence.

SOLUTIONS DE CONFORTEMENT

Selon les résultats obtenus lors de l'analyse des quatre mécanismes de défaillance évoqués ci-avant, l'étude a abouti à une évaluation du niveau de performance de chaque tronçon, permettant ainsi d'ébaucher des solutions de confortement.

Ces solutions ont été hiérarchisées selon leur faisabilité technico-économique, et ont fait l'objet d'une priorisation selon le degré de criticité évalué.

Parmi les solutions proposées, on peut souligner l'effet bénéfique des rideaux de palplanches dans le corps de la digue (réduction de l'effet de l'érosion interne), le reprofilage des talus constituant par ailleurs une solution accessible pour améliorer le niveau de sécurité vis-à-vis du phénomène de rupture de pente.

CONCLUSION

Une digue est un ouvrage en terre complexe, à la frontière du domaine « eau » et du domaine « sol », où se concentrent de nombreuses problématiques (géotechniques, hydrauliques,

environnementales, économiques, humaines...).

L'appréciation de l'état de stabilité d'un tel ouvrage repose sur la connaissance de sa géométrie (évolutive !), des aménagements existants, des propriétés des terrains le constituant (granulométrie, résistance au cisaillement, perméabilité), et des sollicitations hydrauliques (niveaux d'eau, vitesses d'écoulement).

Malgré les contraintes d'accès et de déploiement des moyens d'investigations sur de tels ouvrages, il est essentiel de mener des campagnes d'investigations et d'essais renforcés permettant d'étayer les hypothèses d'entrée des modèles de calculs.

Enfin, on soulignera l'importance des mesures de surveillance et de maintenance périodique, pour compenser l'impact inéluctable des activités naturelles (animaux fouisseurs, prolifération de la végétation), et de plus en plus, l'effet du changement climatique qui se traduit par une intensification des phénomènes de crue. ■

Thomas Retailleau
Groupe Ginger

Des mesures justes et utiles

- Instrumentation et monitoring sols, structures, environnement
- Tous les capteurs, toutes les mesures
- Plateforme Beyond Monitoring : vos données transformées en informations

monitoring@sixense-group.com
www.sixense-group.com

Transforming your infrastructure into living assets



© Reblère - Barloide-Photo Bayonne

Expérimentation inédite dans le Loiret et en Vendée pour limiter les dégâts de la sécheresse sur les routes

Chaque année, les départements de métropole doivent faire face à des dégradations de routes et de pistes cyclables de plus en plus fréquentes. Ces désordres sont liés à la combinaison de mécanismes affectant prioritairement les sols supports : RGA (retrait-gonflement des sols argileux) constituant l'assise de ces infrastructures, présence de sols compressibles et peu consistants, et proximité de canaux latéraux (étiers) générant des érosions de talus.

Ces voiries sont en général en remblai de faible hauteur (0,5 à 2,0 m/TN) ou en profil rasant. Elles sont construites sur des argiles plastiques, dont l'épaisseur varie de 3 m à plus de 10 m. Une nappe phréatique est souvent observée à faible profondeur, en général entre 1 et 2 m/TN (hors remblai). Les désordres se traduisent par l'apparition de fissures longitudinales et de tassements pluri-centimétriques, généralement à la suite d'un été très sec, ce qui met en évidence la sensibilité des sols d'assise.

Afin de lutter contre ce phénomène, le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) teste, depuis 2009, différentes approches et de multiples solutions innovantes et écologiques, pour rendre les routes plus durables.



Serge Lambert, directeur technique, Keller Fondations spéciales.

UNE TECHNIQUE KELLER INÉDITE PAR LE TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

Dans le cadre d'une convention partenariale avec le Cerema, un diagnostic géotechnique a été établi et a conduit à définir des principes de confortement visant à prévenir ces déformations ou à minima limiter leur fréquence d'apparition afin de réduire l'entretien.

Grâce à l'investissement des conseils généraux du Loiret et de la Vendée, deux sites expérimentaux ont été choisis, l'un sur la commune de Saint-Michel-en-l'Herm (Vendée) et l'autre entre Courcy-aux-Loges et Sully-la-Chapelle (Loiret) avec pour objectifs de tester plusieurs solutions envisagées, dont l'injection ionique.

La première expérimentation en vraie grandeur d'injection ionique a été menée dans le cadre du projet ORSS « Observation des routes sinistrées par la sécheresse » du Cerema.

La RD921 entre Courcy-aux-Loges et Sully-la-Chapelle était sujette aux phénomènes de dégradation et de sécheresse des deux côtés de la route. Il s'agissait d'un environnement idéal pour cette injection.

Le procédé consiste à injecter une solution aqueuse de stabilisation des sols argileux sous la structure de chaussée selon différentes mailles et configurations. Trois planches d'essais ont été définies sur une longueur de 320 m. Une première zone d'injection a été réalisée sur 2 lignes à 2,0 et 2,5 m de profondeur, puis une deuxième zone confortée par 3 lignes d'injection (à 1,5 ; 2,0 et 2,5 m) situées sous accotements de la chaussée. Ces deux zones sont ensuite comparées à une zone témoin qui n'a subi aucun traitement.

Le produit utilisé appelé RemediaClay a fait l'objet d'une recherche très poussée par l'entreprise et le groupe Keller, en particulier sa filiale aux États-Unis en coordination avec l'université de Texas qui a abouti à une formulation spécifique d'une solution comportant différents cations et un biopolymère. Le principe de la solution consiste à agir par des relations physico-chimiques sur la fraction argileuse très plastique des sols en place, pour les rendre moins sensibles à l'eau à long terme. Une batterie de bio-essais sur des organismes terrestres et aquatiques a également montré que RemediaClay est non écotoxique selon le protocole HP14, conformément à la réglementation européenne.

Cette planche d'essai a été menée sous la maîtrise d'œuvre du Cerema, labellisé Institut Carnot Clim'adapt, à l'aide de l'investissement du département du Loiret et réalisé par l'entreprise Keller Fondations Spéciales.

La deuxième expérimentation à Saint-Michel-en-l'Herm (Vendée) a consisté à traiter la frange d'argile sensible aux variations hydriques dans 2 zones de 40 m selon les modalités suivantes :

- zone 1 : sur toute la largeur de la chaussée,
- zone 2 : en paroi latérale (accotement + rive chaussée) de chaque côté.



© Reblère - Boloire-Photo Boyonne

Réalisation de la technique dans le département de la Vendée.

UN DÉVELOPPEMENT MATÉRIEL ADAPTÉ POUR CES DEUX PLANCHES D'ESSAI

Une foreuse dotée d'un mécanisme spécialement conçu pour l'expérimentation a réalisé les injections dans le sol.

L'injection s'est faite à l'aide de tiges foncées dans le sol, la solution étant injectée à la pointe de ces tiges. Pour favoriser la pénétration de la solution dans le sol, cette injection s'est faite en période sèche, correspondant à l'apparition de fissures de retrait dans l'argile.

Les sols argileux étant faiblement injectables, le principe issu de l'expérience du groupe Keller consiste à fonder une pointe de petit diamètre sur l'épaisseur des couches de surface ayant un effet

sur les déformations de la voirie. La maille d'injection est de surface assez faible, la solution est injectée sous faible pression avec effet de résurgence en surface. L'injection s'est faite par palier, et plusieurs pointes ont été montées sur un palonnier commun.

À l'issue des injections, des instrumentations tensiométriques ont été installées pour étudier les variations de teneur en eau dans le sol.

Dans un but de simplification de travaux de réparation de ces deux planches d'essai, l'entreprise Keller a opté pour le montage du système sur une foreuse communément utilisée par des travaux de renforcement type Liebherr LRB 125. À l'avenir, une simplification de l'ensemble permettra l'utilisation de foreuses de petit gabarit.

UN SUIVI DES RÉSULTATS JUSQU'EN 2024

Une évaluation de l'efficacité de cette technique va être menée par le Cerema qui mesurera en permanence, jusqu'en 2024, le taux d'humidité du sol à l'aide de capteurs de tensiométrie. L'objectif est de vérifier l'efficacité de RemediaClay en mettant en relation les variations hydriques du sol et les observations de l'état des chaussées, et ce, de manière durable, après au moins trois périodes estivales, voire de sécheresse.

« Ce procédé est développé aux États-Unis par la filiale américaine du groupe Keller depuis plus de 30 ans avec d'excellents retours d'expérience, que ce soit pour les chaussées ou pour les bâtiments. Lors d'échanges avec nos collègues américains et avec le Cerema, il nous a semblé intéressant d'importer ce procédé en Europe. En effet, avec le réchauffement climatique global, les effets des argiles sensibles au retrait-gonflement sont de plus en plus critiques et concernent des zones plus étendues. L'importation de ce procédé a nécessité le dépôt d'un brevet européen pour prolonger la protection de cette conception en Europe, et a nécessité la réalisation d'essais de conformité au niveau sanitaire et environnemental plus exigeants qu'aux États-Unis. La solution basée sur des composants minéraux et organiques a passé sans difficulté tous ces tests. Les essais en laboratoire portant sur l'efficacité de la capacité de réduction du potentiel de gonflement des argiles montrent un très haut niveau d'efficacité. Le passage en échelle réel va être très riche en enseignement et a été rendu possible grâce à l'investissement du Cerema, des conseils généraux du Loiret et de la Vendée, que Keller tient à remercier », explique Serge Lambert, directeur technique chez Keller Fondations Spéciales.



© Ighit Amieur - Cerema 2021

Réalisation de la technique dans le département du Loiret.

POUR ALLER PLUS LOIN... MÉCANISME DE GONFLEMENT D'UNE ARGILE

Toutes les argiles sont constituées à partir d'un empilement de feuillets tétraédriques et octaédriques entrecoupés par un espace appelé espace interfoliaire. Le type d'argile associé au gonflement est la smectite, dont fait partie la montmorillonite.

Les ions tels que le calcium, le magnésium ou le sodium sont présents entre les feuillets des particules d'argiles. Les cations positifs sont attirés en surface de la particule d'argile pour tenter de balancer la charge négative de l'argile.

Dans le cas présent, les cations contrôlent le comportement de la particule d'argile. Le gonflement de l'argile est directement lié d'une part à l'énergie d'hydratation correspondant à l'attraction sur les molécules d'eau des cations et, d'autre part, au rayon d'hydratation des cations des interfeuillets. Si l'énergie d'hydratation du cation prédominant est plus importante que l'énergie potentielle de la particule d'argile, le cation va s'hydrater. L'hydratation provoque une double couche diffuse de particules d'eau qui augmente la taille de la particule d'argile et qui repousse les particules adjacentes. Ces forces répulsives provoquent des pressions de gonflement.

La composition de la solution RemediaClay est conçue pour modifier ce comportement des argiles de manière pérenne par l'apport de cations à faible énergie d'hydratation et petit rayon d'hydratation, à la différence du calcium, magnésium et sodium qui réduisent fortement l'énergie potentielle de l'argile et donc la pression de gonflement.

RemediaClay est donc un procédé très efficace qui peut être utilisé aussi bien pour des ouvrages existants endommagés par les variations volumétriques ou pour préparer des terrains dans le cadre de projet de constructions neuves. ■

Leena Veerasamy

Keller Fondations spéciales

SOCIÉTÉS	PAGES
APAGEO	13
APROMETAL/ BMS METAL	65
ARCELOR MITTAL COMMERCIAL RPS S.A.R.L.	45
ATLAS FONDATIONS	11
AXEL TRAVAUX - GROUPE POISSON	19
BMS	61
BOTTE FONDATION	57
CAJ TRAVAUX SPECIAUX	15
DYKA	39
EGIS	69
EMCI	4
EPD / MASSENZA	27
FAYAT FONDATIONS	9
FONDASOL	63
FRASTE	49
GÉOSOLTIS	25
GÉOTEC	17
GROUPE GENGIS	79
INNOGEO	59
ITECH	73
KAENA	83
LIEBHERR NENZING	75

SOCIÉTÉS	PAGES
LIM	21
FREUDENBERG	23
MENARD	53
NPS DRIVEN	77
PETROMETALIC	55
SAMCO	56
SIAL	35
SIXENSE MONITORING	87
SOLSCOPE	7
SOL SOLUTION	37
SOLETANCHE BACHY	4 ^e de couv.
SOLS MESURES	43
PROMAFOR SOVEMA	31
SPIE FONDATIONS	2 ^e de couv.
SYGMAT	67
TEC SYSTEM	3 ^e de couv.
TEMSOL	47
TERRASOL	41
TRAVAUX SPÉCIAUX MATÉRIEL	33
TSM - TRAVAUX SPECIAUX MICROPIEUX	16
URETEK	71



Recevez gratuitement la revue **Solscope Mag** !

Je désire recevoir gratuitement les 2 numéros annuels de la revue **Solscope Mag**

Ma préférence par voie postale par courriel

NOM PRÉNOM

FONCTION SOCIÉTÉ

COURRIEL

ADRESSE POSTALE

CODE POSTAL VILLE

TÉL..... FAX.....

En soumettant ce formulaire, j'accepte que mes données personnelles soient utilisées, exploitées et traitées afin de me recontacter, de m'adresser une newsletter, une revue ou tout autre support de communication concernant ce secteur d'activité, dans un but informatif ou commercial.

Retournez le coupon à **RPI - « Le Millenium » - 9, bd Pierre-Mendès-France - 77600 Bussy-Saint-Georges**
ou par e-mail à : **cuvillier@rpi.fr**

Tél : +33(0)1.60.94.22.20 - Fax : +33(0)1.64.77.51.82





TEC SYSTEM

Concepteur Assembleur FONDATION SONDAGE INJECTION

FONDATION

SONDAGE

INJECTION

TEC a commercialisé depuis 15 ans plus de 800 machines, réalisant plus de 50% de son chiffre d'affaires à l'export dans 30 pays. Chaque machine, "made in France" conçue avec rigueur, est unique, intégrant les dernières normes de sécurité et répondant aux besoins spécifiques de chaque client.

TEC vous accompagnera pour la définition de vos besoins, pour les mises en route et la maintenance de vos machines et dispose de 10 000 références en stock afin de mieux vous servir.



www.tecsystem.fr



Tec System

FUTURO

Référence des forages pour reprise en sous-œuvre.

Moteur thermique 3 cylindres 36KW

Différentes rotatives ou marteaux hydrauliques

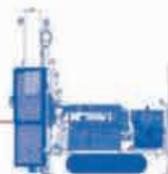


Chenilles à voie variable largeur 700 à 1000 mm

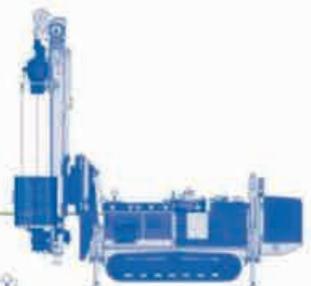
Barrière immatérielle brevetée ou cage mécanique, conformes EN16228

La gamme TEC SYSTEM

SONDAGE
SOIL INVESTIGATION



FORAGE
DRILLING



INJECTION
GROUTING



FONDATEMENTS
FOUDATIONS



MELANGEURS
MIXERS



14, Rue Emile Zola - 86530 Naintré - France
Tél. 00 33 (0)5 49 93 76 00 - info@tecsystem.fr



Républic Ilot Castéja, Bordeaux, France

Construction d'un parking souterrain de 285 places sur deux niveaux et demi. Les travaux comprennent : travaux préparatoires, préinjection du terrain, pieux Starsol®, paroi moulée, terrassement, butons provisoires.

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.

www.soletanche-bachy.com



SOLETANCHE BACHY

**S
B
I
L
O**