

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

LA SÉCURISATION DE LA ROUTE RD 900  
CONTRE LES ÉBOULEMENTS ROCHEUX DANS  
LES SECTEURS DE LA ROCHAILLE

page 78

TUNNEL LYON-TURIN, LE TRAVAIL D'UN  
BUREAU D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUES

page 84

### DOSSIER

## LA DONNÉE À L'ÈRE DU NUMÉRIQUE ?

PAGE 36



### ACTUALITÉS

SOLSCOPE 2023 s'impose comme  
un Salon incontournable

page 16

Prix Boussinesq du CFMS :  
Olatoundé Alexandre Yaba,  
lauréat 2023

Page 28

Mont de Marsan

## Mi55 sur camion

- ◀ Actionnée par le P.T.O. du camion
- ◀ Panneau de commande sur bras mobile avec réglage en hauteur
- ◀ Mât pour manœuvrer des tubes de 12 m
- ◀ Avance au rocher
- ◀ Traction maxi 546 kN
- ◀ Couple maxi tête de rotation 35380 Nm
- ◀ Pompe à boue Massenza 7"1/2x8"  
Débit maxi 2535 l/min - Pression maxi 39 Bar
- ◀ Pompe à mousse
- ◀ Pompe centrifuge pour suralimentation pompe à boue
- ◀ Mors ouvrable pour 1.100 mm de passage
- ◀ Indicateur digital du poids sur l'outil de forage
- ◀ Treuil de manoeuvre 15600 kg
- ◀ Treuil wire line avec 620 m de câble
- ◀ Bras chargeur contrôlé par télécommande radio indépendante

Concessionnaire  
exclusif en France



[www.epd-france.fr](http://www.epd-france.fr)

Mob: 0033(0)618580750 | Email: [epd@wanadoo.fr](mailto:epd@wanadoo.fr)

**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** : Décembre 2023

**Solscope mag**

ISSN 2417-6508

**Directeurs de la publication :**

Jérôme Aubry et Dominique Rousseau

**Comité de rédaction :**

Aline Quenez, CFGI (SGP) ; Olivier Barnoud, USG (Géotec) ; Jean-Paul Volcke, CFMS (Franki Fondation) ; Stéphane Monleau, SOFFONS (Solefanche Bachy) ; Michel Khatib, Syntec Ingénierie (Ginger CEBTP) ; Éric Garroustet, SFEG (Cotrasol) ; Pascal Sauvage, UFCMF (Socomafor) ; Philippe Cosenza, CFMR (ENSI Poitiers - UMR CNRS IC2MP), Bertrand Mouselon, 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 :**

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 :**

CHARIVARI & COM  
www.charivari-groupe.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 : Solscope

# ÉDITO

Membre de l'AITF (Association des ingénieurs et ingénieurs en chef territoriaux de France), je mesure l'honneur qui nous est fait de rédiger l'éditorial du magazine Solscope Mag.

Notre association compte 3 500 adhérents répartis dans toutes les strates des collectivités territoriales (Régions, Départements, métropoles, communautés de communes, communes, etc.).

Comme dans chaque numéro du magazine, les sujets d'actualité sont très intéressants et donnent une image dynamique de la profession qui est tournée vers l'avenir et l'évolution de la technique dans le domaine.

Après les rubriques habituelles et les «actus» sur le milieu professionnel, le dossier de ce mois de novembre 2023 présente l'avenir de la donnée à l'ère du numérique.

Ce vaste sujet sera évoqué sous tous ses aspects et les articles détailleront des points particuliers, des innovations et des expériences enrichissantes.

Aujourd'hui, personne ne peut plus travailler sans informatique, sans numérique et l'intelligence artificielle va bouleverser notre manière de comprendre et de travailler dans tous les domaines, et bien sûr aussi pour la géotechnique.

À l'heure où l'évolution climatique nous plonge dans un avenir incertain pour de nombreux aspects, il est nécessaire de mieux connaître notre planète; les données géophysiques sont d'une grande importance et la modélisation est nécessaire pour mieux comprendre et analyser les évolutions.

Cependant, il ne suffit pas d'avoir des tonnes de données: encore faut-il que celles-ci soient fiables, tant dans leur recueil que dans leur exploitation et l'archivage. Il faut donc s'intéresser au matériel, à la méthodologie de recueil, et bien sûr aux avancées dans ces deux domaines, mais aussi aux nouveaux outils numériques. Tout doit concourir à des données certaines et exploitables, aujourd'hui comme demain. À l'heure où les bouleversements climatologiques et leurs conséquences sont parfois dramatiques, il faut pouvoir mieux connaître notre planète et son évolution structurelle.

En effet, à partir de ces données, on peut modéliser et mieux analyser les mouvements de terrains, mieux en analyser les causes, mieux prévoir, mieux prendre les mesures nécessaires et limiter les catastrophes. Les données sont nécessaires pour l'avenir, mais elles sont aussi pertinentes pour les grands chantiers du présent (par exemple pour le canal Seine-Nord Europe), pour mesurer l'impact du chantier sur l'environnement.

De nombreux secteurs ont besoin de ces bases pour avancer dans la connaissance géologique liée à leur activité. État, collectivités, entreprises doivent connaître les conséquences de leurs actes sur la géologie locale, l'hydrologie locale, mais aussi pour des lieux plus éloignés

Les données sont aussi la base de la recherche-développement pour tous nos métiers dans ce contexte tellement délicat.

Après ce tour d'horizon de ce numéro 24, je vous laisse en lire les rubriques, les articles et vous souhaite une bonne lecture.



**Jean-Pierre Schang**

Membre de l'AITF et chef de service du Département de la Marne

### \* LES PARRAINS DU SALON SOLSCOPE

**AITF** : Association des ingénieurs territoriaux de France  
**CFGI** : 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



NOUVEAUTÉ  
INJECTIONS MULTIPOINT

## OPTEZ POUR L'ALTERNATIVE AUX MICROPIEUX !

L'INJECTION DE RÉSINE EXPANSIVE URETEK®  
EST ADAPTÉE À TOUS TYPES D'OUVRAGES

- Rapide et économique
- Propre et sans nuisance
- Aucune interruption d'activités



- Intervention sans aucun déménagement
- Accompagnement durant tout le projet
- Respectueux de l'environnement



URETEK TV  
Stabilisation  
d'un institut  
polyhandicap

[www.uretek.fr](http://www.uretek.fr)

0 800 312 312 Service & appel  
gratuits



Contactez  
un ingénieur  
URETEK®



LA RÉFÉRENCE



<b>ACTUALITÉS</b> .....	6
<b>ACTUALITÉS SALON SOLSCOPE</b>	
■ Solscope 2023 s'impose comme un Salon incontournable .....	16
■ Place aux nouveaux exposants .....	20
■ Sélection de produits ou services que nous avons croisés tout au long des allées .....	22
<b>ACTUALITÉS FORMATION FORAGE</b>	
■ Lancement de la nouvelle formation d'aide-foreur en géothermie de surface .....	26
<b>ACTUALITÉS PRIX BOUSSINESQ</b>	
■ Prix Boussinesq du CFMS : Olatoundé Alexandre Yaba, lauréat 2023 .....	28
<b>NORMALISATION</b>	
■ NF P94-001 : Syntec Ingénierie et USG publient un nouveau document .....	32
■ Nouvelle version du guide « <i>Les pieux forés – Recueil des règles de l'art</i> » .....	34
<b>DOSSIER : LA DONNÉE À L'ÈRE DU NUMÉRIQUE ?</b>	
■ La donnée à l'ère du numérique .....	36
■ Le BRGM au service des géotechniciens .....	38
■ Fondasol mobilise ses données de sol dans son outil Solscore pour répondre aux besoins métier et client .....	42
■ SoilCloud/Fondasol : retours d'expérience sur plus de deux ans d'utilisation d'un système centralisé de gestion de données géotechniques .....	44
■ Connecteur Lim/Soilcloud : exemple d'une interopérabilité système profitable à l'ingénierie géotechnique Abo-Erg .....	46
■ Du grain à l'ouvrage dans l'ère du <i>big data</i> - Application à la caractérisation de sols de surface et aux ouvrages en service .....	48
■ Data et climat : les données à la source d'un outil d'évaluation carbone des ouvrages géotechniques .....	54
■ Les données dans les fondations .....	58
■ SmartSheetPile : des solutions intelligentes pour des infrastructures modernes .....	60
■ Le canal Seine-Nord Europe : base de données et numérique – SIG et BIM .....	62
■ La « <i>data</i> » pour sécuriser la qualité des chantiers .....	64
■ 25 ans de données d'instrumentation géotechnique et structurelle, réflexions et ouvertures vers le futur .....	66
<b>ZOOM TECHNIQUE</b>	
■ Techno Pieux : pieux vissés pour fondations .....	70
<b>PORTRAIT D'ENTREPRISE</b>	
■ SoilCloud enclenche la transition numérique de la géotechnique .....	72
■ Tec System : un matériel pour travaux spéciaux et fondations « <i>made in France</i> » .....	74
<b>TÊTE D'AFFICHE</b>	
■ Nicolas Nayrand : un géotechnicien investi ! .....	76
<b>CHANTIERS FRANCE</b>	
■ La sécurisation de la route RD 900 contre les éboulements rocheux dans le secteur de La Rochaille : un défi technologique pour la sécurité des usagers de la route .....	78
■ Tunnel Lyon-Turin, le travail d'un bureau d'études géotechniques .....	84
<b>GÉOPHYSIQUE</b>	
■ La tomographie électrique pour une étude de sol dans la zone d'estran .....	88
<b>ANNONCEURS &amp; ABONNEMENTS</b> .....	90

# AGENDA

> 26 • 28 MARS 2024

## INTERSOL

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

> 18 • 21 JUIN 2024

## ISC'7

7<sup>e</sup> Conférence internationale sur la caractérisation géotechnique et géophysique des sites - Modèles terrestres, du big data au jugement technique  
**BARCELONE - ESPAGNE**

> 25 • 28 JUIN 2024

## JNGG

12<sup>es</sup> Journées de la géotechnique et de la géologie de l'ingénieur  
**ENSI (École nationale supérieure d'ingénieurs)**  
**POITIERS**

> 2 • 4 OCTOBRE 2024

## ECPMG 2024

5<sup>e</sup> Conférence européenne sur la modélisation physique en géotechnique  
**DELFT - PAYS-BAS**

## Le CFMS Jeunes se dote d'un nouveau bureau

Présidé par Thibault Badinier, le CFMS Jeunes vient en effet de se doter d'un nouveau bureau. Ce dernier sera ainsi composé de: Caroline Chalak (trésorière); Alvaro Barbosa (secrétaire général); Tatiana Richa et Laëticia Le (relations nationales et internationales); Margaux Blanckaert et Roxana Vasilescu (promotion et communication); Nicolas Walbrecq et Caroline Chalak (lien avec la CST) et Lucas Botelho (événements et journées techniques).

Pour rappel, le «CFMS Jeunes» est un groupe de travail du CFMS constitué de jeunes ingénieurs géotechniciens, membres du CFMS, venus de tous les horizons du métier: entreprises, ingénieries, monde académique (enseignement, recherche scientifique et appliquée), établissements publics de l'État, etc. Il a été créé en mars 2018 après un appel à volontaires à l'initiative du Conseil du CFMS. Sa première réunion, présidée par Valérie Bernhardt, présidente du CFMS, a eu lieu en avril 2018.

L'objectif principal du CFMS Jeunes est de mettre en avant le potentiel que peuvent apporter les jeunes géotechniciens pour promouvoir la géotechnique en France et à l'international, et établir des relations solides avec ses différents acteurs.



© CFMS

## Soletanche Bachy Fondations Spéciales a réalisé le pieu tarière creuse de gros diamètre le plus profond de France!

Soletanche Bachy Fondations Spéciales a, en effet, réalisé un nouveau record de France: le pieu de structure en diamètre 1,02m le plus profond, à 50m. Ce pieu nommé Starsol fait partie du système de fondations profondes (composé de 277 pieux) d'un bâtiment logistique P16 du nouveau campus français de l'entreprise biopharmaceutique allemande Sartorius, situé à Aubagne (sud de la France)\*.

Pour ce record, l'entreprise a mobilisé sa foreuse F5000, machine unique en France et en Europe, et seule capable de mettre en œuvre de tels pieux et à une telle profondeur.

De plus, 15% de ces fondations profondes seront également réalisées jusqu'à 34m de profondeur grâce à une technique innovante de pieux refoulés à ergot (Starsol.Ref T-Pile), fruit de 35 années d'innovation au sein de Soletanche Bachy. Ce type de pieu présente des bénéfices environnementaux significatifs.

Il permet de réduire les volumes béton mis en œuvre (-30%) ainsi que les déblais de forage (-70%), et il se combine avec l'utilisation d'un béton bas carbone sur l'ensemble du chantier, qui permet une réduction de 25% des émissions de CO2 par rapport à un béton traditionnel.

Une forte exigence technique pour un site entièrement robotisé

Sur le plan technique, les deux procédés de pointe Starsol et Starsol.Ref T-Pile répondent aux contraintes strictes de portance, de planéité et de tassements différentiels imposées par le site P16 de Sartorius, qui accueillera un bâtiment logistique de gestion des stocks entièrement robotisé.

\* Groupement mené notamment par Travaux du Midi (Vinci Construction, mandataire)



© Soletanche

## Egis acquiert la société française ODZ Consultants

Afin de répondre à la demande croissante d'ingénierie et d'assistance environnementale de ses clients, Egis consolide son offre avec l'acquisition de la société ODZ Consultants, un bureau d'études spécialisé en étude des risques industriels et en ingénierie sécurité incendie. Cette nouvelle acquisition, la 3<sup>e</sup> depuis le début de l'année 2023, confirme la volonté d'Egis d'accompagner ses clients pour prévenir et traiter les risques des personnes et des installations industrielles et relever les défis de la transition écologique.

ODZ Consultants est un acteur indépendant du secteur de l'ingénierie appliqué au domaine « sécurité, risque et environnement ». Reconnue pour le haut niveau d'expertise de ses collaborateurs, l'entreprise intervient en France comme à l'international dans des secteurs variés du bâtiment, des infrastructures, de la chimie, de l'agroalimentaire, de l'énergie. Disposant déjà d'un savoir-faire reconnu dans ce domaine, l'entreprise se renforce avec de nouveaux talents, expérimentés. « Nos clients privés ou publics recherchent de plus en plus d'acteurs capables



© Egis

de maîtriser l'ingénierie de sécurité/environnement dans sa globalité. Nous sommes très heureux de pouvoir compter sur l'expertise complémentaire des équipes d'ODZ Consultants pour élargir le spectre de nos compétences. C'est aussi un nouvel élan commercial pour nous, qui va nous donner les moyens d'accéder à des clients industriels dans de nouveaux secteurs d'activité», précise Catherine Jatteau, directrice Environnement d'Egis. « Dans des secteurs en pleine mutation, comme celui des énergies renouvelables ou la décarbonation de l'industrie, le rapprochement avec Egis va nous permettre d'accélérer notre croissance. La conjugaison de nos expertises et la puissance commerciale et technique du groupe Egis nous donneront une position solide pour répondre aux grands projets. De plus, nous partageons les mêmes valeurs humaines et les mêmes engagements environnementaux et sociaux. Conserver notre excellence technique et l'esprit de collaboration avec nos clients est un objectif-clé pour nous! », ajoute Pierre Odorizzi, fondateur d'ODZ Consultants.

## Bouygues Travaux Publics : nomination d'un nouveau DG

Bertrand Burtschell a été nommé directeur général de Bouygues Travaux publics à compter du 2 mai 2023. À ce titre, il intègre le Comité exécutif de Bouygues Construction. Sous la responsabilité de Jean-Philippe Trin, directeur général délégué de Bouygues Construction et président de Bouygues Travaux publics, il poursuivra le développement des activités d'infrastructures de l'entreprise dans le monde, en particulier dans les secteurs de l'énergie décarbonée, de la mobilité sur rail, des infrastructures maritimes et de la gestion responsable des ressources naturelles.



© Didier Cocatrix

Diplômé de Centrale-Supélec et de l'Université polytechnique de Catalogne (UPC), Bertrand rejoint le groupe en 1994 à Hong Kong. Il contribue ensuite pendant 10 ans à de grands projets, d'abord en France, puis à Hong Kong et en Suisse. En 2006, Bertrand prend progressivement la direction de Bouygues Travaux publics en France, en Suisse (PraderLosinger Sion), en Europe et supervise Bouygues Construction Expertises nucléaires. Depuis le 1<sup>er</sup> mars 2020, il était directeur général délégué de Bouygues Travaux publics.

# KILOUTOU

## ENERGIE

Votre spécialiste location énergie temporaire et pompage

**ASSECHÈMENT**

**ASSAINISSEMENT**

**FONDACTIONS SPÉCIALES**

Des solutions adaptées à tous vos besoins :

- Pompes de 35 à 960 m<sup>3</sup>/h
- Conseil technique et dimensionnement
- Expertise hydrogéologique
- Groupes électrogènes jusqu'à 1450 kVA
- Performance énergétique de vos chantiers
- Monitoring des installations
- Permanence 24h/24

SCANNEZ-NOUS

Retrouvez-nous dans l'une de nos agences ou sur [kiloutou-energie.fr](http://kiloutou-energie.fr)

## Judith Jiguet rejoint Ingerop en tant que directrice écologie et stratégie

Judith Jiguet a rejoint le groupe d'ingénierie Ingerop, le 1<sup>er</sup> septembre 2023, en qualité de directrice écologie et stratégie. Elle intègre également le comité exécutif et le comité de direction du groupe.

Elle prend de plus la direction de la stratégie, de la responsabilité sociétale et environnementale et de la communication d'Ingerop, afin de promouvoir et de mettre en place une politique coordonnée et ambitieuse pour le groupe, en phase avec ses valeurs et sa raison d'être (œuvrer ensemble à un monde durable et offrir à chacun une vie meilleure), et de préparer le prochain projet d'entreprise. « Il y a 2 ans, j'ai eu la chance de devenir administratrice indépendante d'Ingerop. Cela fait donc 2 ans que je découvre à quel point le groupe dispose des leviers, en tant que conseil en ingénierie, pour engager les territoires et les villes dans les multiples transitions qui s'imposent à eux. Fort de son indépendance, de sa solidité et de la richesse de ses compétences, il a tous les atouts pour occuper une place stratégique dans ce monde à inventer. C'est une grande joie pour moi de rejoindre les équipes d'Ingerop et de participer à relever les défis de demain », a précisé Judith Jiguet.



© Ingerop

Ingénieure en chef des Ponts, Eaux et Forêts, diplômée d'Agro-ParisTech, titulaire d'un DESS de gestion publique et d'économie de l'université Paris-Dauphine, Judith Jiguet démarre sa carrière en 1996 dans les services extérieurs de l'État sur des sujets liés à l'environnement, l'eau et la forêt. Par la suite, elle occupe différents postes en cabinets ministériels et en administration centrale; elle sera notamment directrice de l'Eau et de la biodiversité au sein du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, ou encore directrice du cabinet de la secrétaire d'État chargée de l'Écologie, puis directrice du cabinet de la ministre des Sports. En 2011, elle devient directrice générale de CCI France, tête de réseau des CCI, avant de rejoindre le groupe Engie en 2015, où elle sera notamment directrice de la transformation du groupe. En janvier 2020, elle rejoint ISS France en tant que directrice de la performance et de la stratégie et est promue présidente d'ISS France en juin 2021. Judith

Jiguet était depuis le début de l'année 2023 directrice de projet Renaturation, Restauration et Compensation au sein du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires, en charge d'impulser la politique de renaturation des territoires, adossée au projet de loi industrie verte.

# CAJ TRAVAUX SPECIAUX

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

DISTRIBUTEUR EXCLUSIF



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

# INGÉNIERIE DE LA CONSTRUCTION



**GROUPE**  
**GÉOTEC**  
ENSEMBLE, CONCEVONS UN AVENIR DURABLE

## CFGI: renouvellement du bureau et du conseil d'administration

Le Comité français de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (CFGI) a renouvelé son bureau et son conseil d'administration en mai dernier. Le nouveau bureau, élu pour 4 ans, est composé de Jean-David Vernhes (UniLaSalle), président, qui succède à Guilhem Devèze (EDF) et devient de fait le nouveau « past-president »; Johan Kasperski (CETU), secrétaire général, qui succède à Marc Brisebarre (retraité de Ginger CEBTP); Timothée Jaouen (Ginger Burgeap), trésorier, qui succède à Xavier Daupley (BRGM) – Xavier avait aussi occupé le poste de vice-président; Aline Quenez (Société du Grand Paris), qui était précédemment « past-president », et Jean-Alain Fleurisson (Mines de Paris – PSL), vice-présidents – Jean-Alain étant reconduit au même poste.

Les nouveaux membres du conseil sont Maurice Bufalo (Spie Batignolles/Valerian), Clément Galandrin (Entreprise Can), Sara Lafuerza (Polytech Paris – Sorbonne Université), Amélie Lecomte (Ineris), Jérôme Sénémaud (Tunnel Euralpin Lyon-Turin) et Nicolas Villard (NGE Fondations). Ils rejoignent leurs collègues qui restent au conseil: Anne Bialkowski (BRGM), Tristan Bourdin (BET Geo-GC SAS), Lionel Causse (RATP Infrastructure), Marianne Chahine (Cerema), Anne Vincent (Mica Environnement) et Vilma Zumbo (Systra). Les membres sortants du conseil sont Benoît Deffontaines (Université Paris-Est), Sébastien Dupray (Cerema), François Martin (BG) et Monique Terrier (BRGM), que le CFGI tient à remercier pour leurs bons et loyaux services.



**Le nouveau bureau du CFGI au grand complet, fin juin 2023, salle Chevalier à l'École des mines de Paris. De gauche à droite : Jean-David Vernhes, Aline Quenez, Jean-Alain Fleurisson, Timothée Jaouen ; en incrustation, Johan Kasperski.**

Le conseil du CFGI continue de recevoir l'appui de ses membres d'honneur, experts retraités, Roger Cojean (Mines de Paris), Daniel Deprez (géologue), Jean-Louis Durville (LCPC et Cerema) et Daniel Pfefer (ingénieur-conseil), Roger et Jean-Louis ayant conservé un niveau d'engagement très soutenu !

À la suite de Jean Goguel, fondateur du CFGI en 1968, les membres de la nouvelle équipe poursuivent avec les 110 adhérents de l'association la promotion de la géologie appliquée dans la profession d'ingénieur en France, en collaboration avec l'Association internationale de géologie de l'ingénieur (AIGI/IAGE) et en liens étroits et amicaux avec leurs collègues du CFMS et du CFMR – les doubles appartenances n'étant pas rares ! Cette promotion se fait au travers de la diffusion de connaissances, principalement via des séances techniques, des visites de chantier, mais aussi, modalité

spécifique au CFGI, des sorties géologiques sur le terrain. La dernière en date s'est déroulée autour de Chamonix fin juin 2023 sur le thème du Changement climatique et ses effets multiéchelles dans l'interaction ouvrages/milieu naturel.



**Sortie Terrain CFGI, les 29-30 juin 2023 à Chamonix et sa région, sur le thème des conséquences du changement climatique en montagne. Discussion technique avec Ricardo Vassalo (CNRS, Université de Savoie - Mont-Blanc), au flanc est des Aiguilles rouges.**

## Prix Jean-Goguel 2024 : appel à candidatures !

Le prochain prix Jean-Goguel sera remis lors des 12<sup>e</sup> Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG) à Poitiers du 25 au 28 juin 2024. Ce prix est décerné tous les 2 ans à un chercheur ou ingénieur de moins de 35 ans, qui met en œuvre le savoir et les compétences du géologue dans un domaine de l'ingénierie et de l'environnement. Le règlement complet et le calendrier de sélection sont disponibles sur le site web de l'association :

<http://www.cfgi-geologie.fr/goguel-prix-a-venir/>

Parlez-en autour de vous !



## Antémys rejoint le groupe Infranéo

Antémys Géotechnique vient de rejoindre le groupe Infranéo, acteur européen majeur de l'ingénierie. Cette fusion marque le début d'un nouveau chapitre passionnant, permettant une synergie des métiers et ainsi, d'apporter une réponse plus complète et plus innovante.



ArcelorMittal

# SmartSheetPile

Des solutions acier intelligentes pour des infrastructures modernes



**SmartSheetPile** est une solution de surveillance de l'état de santé des infrastructures en palplanches.

L'association des capteurs à des algorithmes de traitement de données **optimise la gestion de la structure en temps réel et déclenche des alertes** en cas d'imprévus opérationnels et environnementaux.

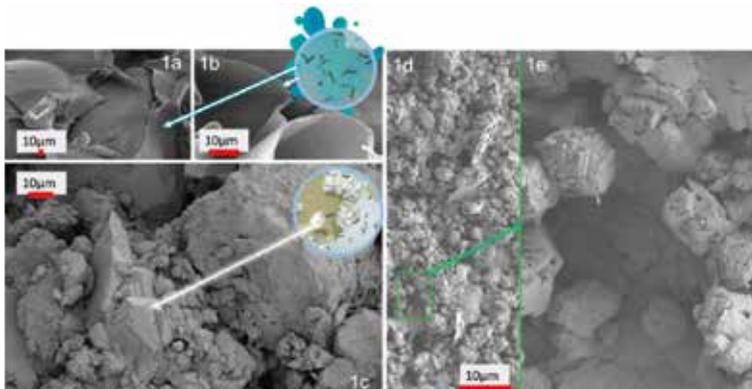


Scanner  
pour plus  
d'information

# LA BIO-CIMENTATION : UNE RÉVOLUTION POUR LE RENFORCEMENT DURABLE PAR INJECTION DES SOLS

## INTRODUCTION

Bien que les domaines des matériaux et des techniques d'injection chimique ou de stabilisation mécanique aient connu des avancements considérables, l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols demeure un défi majeur en géotechnique. Les méthodes traditionnelles de consolidation chimique, telles que les injections de ciment, l'utilisation de résine et de chaux, ont longtemps été la norme. Cependant, elles présentent souvent des inconvénients notables, tels que des problèmes de pénétrabilité ou de lessivage, résultant en des environnements fortement alcalins. En Europe, ces problèmes de lessivage ont été si préoccupants que de nouvelles normes se sont développées pour traiter les aspects d'alcalinité et de la qualité des eaux après le traitement des sols. Il est devenu impératif de pallier aux problématiques de ces techniques par des alternatives autant efficaces, mais plus durables et respectueuses de l'environnement. C'est dans ce contexte que Medusoil Biominerals™ a développé ses solutions d'injection de bio-ciment, offrant des alternatives durables basées sur la stabilisation par des liants minéraux (figure 1).



**Figure 1 (1a & 1b) Observations microscopiques du développement du biopolymère à travers des grains de sable ; (1c) augmentation du taux de calcification d'un sable calcaire à travers des liaisons de biocalcite ; (1d) application de la biocimentation sur des argiles plastiques ; (1e) précipitation de la calcite sur les feuilles d'argile pour atténuer leur retrait et gonflement.**

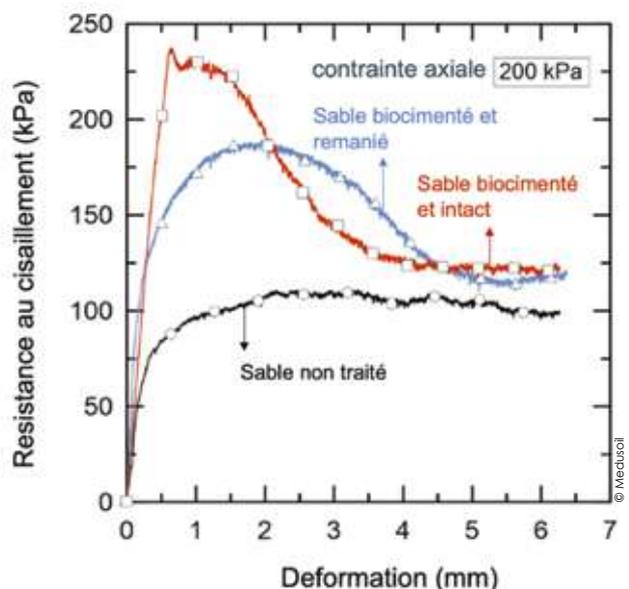
Le concept de micro-organismes catalysant la formation de minéraux n'est pas nouveau en soi, il remonte à des milliers d'années dans des milieux naturels. Cependant, ce n'est que ces dernières années que des ingénieurs ont maîtrisé ces processus pour développer des technologies de renforcement des sols par bio-cimentation adaptées aux critères environnementaux. La bio-cimentation repose sur l'activité métabolique de certaines bactéries qui précipitent des liants sous forme de carbonate de calcium, cimentant efficacement les particules du sol. Ce processus ingénierie offre une alternative durable et respectueuse de l'environnement aux techniques conventionnelles de stabilisation des sols, tout en gardant les critères de résistance et d'économie.

## L'APPROCHE INNOVANTE DE MEDUSOIL BIOMINERALS™

Après cinq années de recherche et de développement, Medusoil Biominerals™ a développé un portefeuille de produits de biominéralisation et de biopolymérisation. Ces avancées introduisent des modèles de production entièrement circulaires, où les sous-produits organiques liés aux processus conventionnels de bio-cimentation, tels que l'ammonium, peuvent être revalorisés. De plus, avec un produit phare sous forme de micro-organismes breveté, les aspects économiques de la bio-cimentation sont ramenés à des niveaux très compétitifs, comparables aux injections de ciment traditionnelles.

Parmi les technologies innovantes, on trouve le développement de réacteurs microbiens conçus pour stimuler la croissance contrôlée de minéraux. Ces réacteurs créent un environnement propice à la précipitation de carbonate de calcium par les bactéries, cimentant ainsi efficacement les particules du sol. L'approche de Medusoil accélère non seulement le processus, mais garantit également des résultats homogènes et prévisibles, un facteur essentiel lorsqu'il s'agit de stabilisation des sols dans des applications critiques.

L'effet de la biocimentation sur les résistances maximale et résiduelle est remarquable. Même dans des cas de matériaux perturbés (remaniés), on observe une amélioration significative de leurs performances grâce à la présence des liaisons calcitiques. Les liaisons de calcite formées par le processus de biocimentation jouent un rôle clé dans l'amélioration de la cohésion et de la résistance mécanique des sols. Ces liaisons servent de ponts solides entre particules du sol, renforçant ainsi leur adhérence et empêchant le



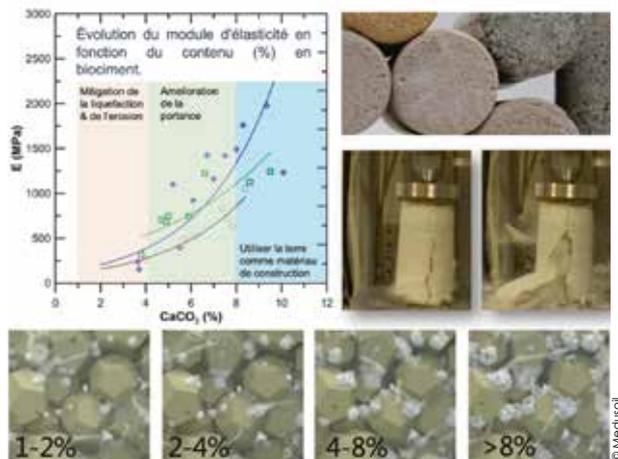
**Figure 2: Résultats d'essais triaxiaux en laboratoire : Résistance au cisaillement d'un sable moyen (D50=0.4 mm) sous une contrainte axiale de 200 kPa pour trois états : (i) biocimenté et intact ; (ii) biocimenté et remanié et (iii) non traité.**

glissement ou la désagrégation. Par conséquent, la résistance maximale au cisaillement des échantillons traités augmente considérablement (figure 2). Cette amélioration n'est pas limitée aux conditions initiales des échantillons, et porte s'applique aussi aux sols remaniés bénéficiant de la présence de calcite naturelle. La biocimentation ouvre ainsi la voie à des solutions de stabilisation du sol hautement performantes, avec des avantages tangibles en termes de résistance mécanique, de durabilité, de rapidité et simplicité d'exécution.

## EXEMPLES DE PROJETS RÉCENTS EN FRANCE ET EN SUISSE

Le travail de Medusoil marque une avancée significative dans l'application de la bio-cimentation pour réduire les risques d'érosion, de liquéfaction en zones sismiques et pour d'autres projets spéciaux et de fondations. La technique a notamment obtenu du succès en Suisse et en France, où l'amélioration des sols de manière peu intrusive vis-à-vis de l'environnement reste une préoccupation persistante.

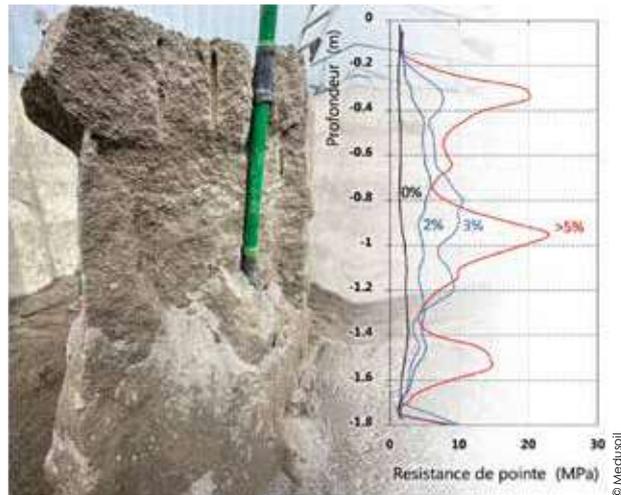
Une connaissance approfondie des exigences particulières d'un projet est essentielle pour offrir la solution la plus adaptée. Des facteurs tels que la présence ou l'absence d'écoulement souterrain, la perméabilité *in situ* et l'amélioration souhaitée des paramètres géotechniques, y compris la cohésion et l'angle de frottement, doivent être pris en compte avant la proposition d'un mélange et d'un maillage de traitement. Cette approche exhaustive garantit que la solution de bio-cimentation s'aligne précisément sur les spécificités du projet selon le taux d'amélioration souhaité (figures 3 et 4).



**Figure 3 : Évolution du module d'élasticité en fonction du contenu en biociment. Illustration des échantillons biocimentés pendant les essais en presse uniaxiale et illustration des tailles de liant relativement à la taille de grains pour divers taux de biociment.**

Pour parvenir à ce niveau de précision, des outils numériques *ad hoc* ont été développés. Capables de simuler les différents stades des injections, ils permettent aux ingénieurs de déterminer leur maillage optimal. Cette approche affinée garantit une allocation efficace des ressources pour atteindre le taux d'amélioration souhaité.

Medusoil a fait ses preuves en réalisant une série de projets réussis, allant de la stabilisation des pentes à l'excavation frontale de microtunnels, et à l'amélioration de la portance ou pour la protection contre l'érosion. En adaptant leurs solutions en fonction des exigences particulières de chaque projet, et à travers différentes méthodes d'exécution *in situ*, la technique démontre sa versatilité pour répondre à un éventail diversifié de défis géotechniques (figure 5).



**Figure 4 : Campagne de pénétromètre dynamique sur une colonne biocimentée à divers taux de calcification. Des tubes à mèches avec des sorties tous les 50 cm ont été utilisés. Les résultats sont obtenus 72 heures après l'injection du biocoulis.**

## PERSPECTIVES D'AVENIR: LA PROMESSE DE LA BIO-CIMENTATION

L'application réussie de la bio-cimentation en Suisse et en France souligne le potentiel transformateur de cette technologie innovante avec des paramètres géotechniques améliorés qui défient ceux obtenus par d'autres techniques du type de micropieux, ou de parois microberlinoise. Pour les effets dans la mitigation de la liquéfaction induite par les tremblements de terre, la présence d'un faible pourcentage de biociment suffit pour une cohésion de l'ordre de 20 kPa améliorant ainsi considérablement la résistance des sols sableux ou sablo-limoneux à la liquéfaction.



**Figure 5 : Application du biocoulis dans différents chantiers et conditions d'exécution.**

Les avantages de la bio-cimentation s'étendent bien au-delà de la durabilité environnementale et économique. Notre technologie est capable de produire des résultats fiables dans un laps de temps court. La combinaison de l'innovation biotechnologique et du génie géotechnique est en passe de créer un avenir résilient et durable pour les structures et les communautés. Le travail et les projets de Medusoil mettent en lumière les avantages tangibles de cette technologie innovante, avec l'amélioration des propriétés géotechniques et les nouvelles perspectives offertes.

**Dr. Dimitrios Terzis & Prof. Lyesse Laloui**

Co-fondateurs Medusoil SA

info@medusoil.com

www.medusoil.com

## Le groupe Géotec s'offre une nouvelle compétence pour ses 50 ans

En se portant acquéreur d'Atemac, le groupe Géotec, basé à Quetigny près de Dijon, réalise une nouvelle opération de croissance externe qui lui permet d'ajouter une corde de plus à son arc, alors qu'il fête son 50<sup>e</sup> anniversaire. « Nous misons à la fois sur une croissance endogène et sur des opérations comme celle-ci. La croissance externe nous permet d'intégrer de nouvelles compétences ou de nous implanter sur des territoires que nous ne connaissons pas encore », explique Frédéric Barnoud, directeur général de Géotec Holding.

Fondée en 2000, Atemac compte 13 collaborateurs et réalise 2M€ de chiffre d'affaires. Déployant des compétences et des moyens matériels spécifiques, elle compte notamment 8 carottesuses de chaussée. Dirigée par Delphine Pécault-Bertrand, Atemac est basée à Bourges (Cher) et dispose d'une agence en région parisienne. « L'activité route est connexe à celle de Géotec, mais elle constitue un métier à part, que nous ne maîtrisons pas pleinement en France métropolitaine. Nous souhaitons

la développer dès 2024 au sein de notre réseau de 22 agences réparties sur le territoire national, en nous appuyant sur les compétences fortes de ce « pure player » de la route », poursuit le directeur général de Géotec Holding.

### LA ROUTE, NEUVIÈME COMPÉTENCE DE GÉOTEC

Au fil des acquisitions, le groupe a enrichi son portefeuille de spécialités.

L'an dernier par exemple, le rachat de l'italien CSI avait permis au groupe dijonnais de se positionner sur le métier de l'exploration de grande profondeur (jusqu'à 500 m en sous-sol), complétant une gamme de savoir-faire, allant de la géotechnique pure au maritime, en passant par le diagnostic de structures, l'évaluation des risques naturels, la géothermie, la géophysique ou le conseil en environnement.



© Géotec

## Xavier Rodriguez, P-DG de Jarnias, nommé vice-président de France Travaux sur Cordes

Entré chez Jarnias\* en 2008 en tant que cordiste, il a gravi les échelons un par un au sein de l'entreprise pendant 10 ans avant d'en être nommé directeur général. Il dispose d'une parfaite connaissance du secteur et œuvre au quotidien pour faire bouger les lignes d'une profession en pleine dynamique, mais ayant encore besoin de se structurer. « C'est justement parce que l'on fait du hors-norme qu'il faut des normes. Des standards et des réglementations pensées pour ces métiers. Pour les sécuriser, les monitorer et les accompagner dans leur développement. À nous de tracer le chemin : c'est ce que nous voulons faire pour ce métier et cette filière », indique Xavier Rodriguez.

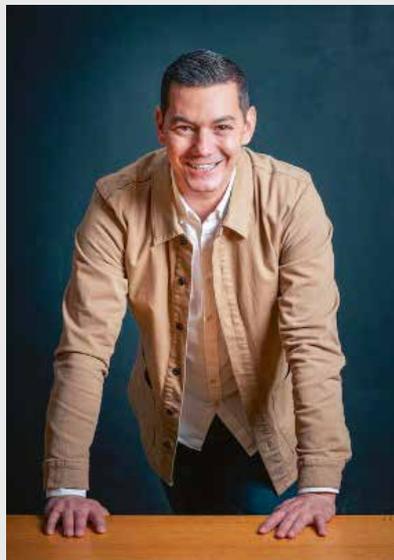
Ses principales missions au sein de France Travaux sur Cordes\*\* sont de participer à :

- la promotion et la représentation de la profession auprès des pouvoirs publics, organismes préventeurs et maîtres d'ouvrage ;

- l'amélioration de la sécurité et des conditions de travail sur les chantiers des travaux sur cordes ;

- l'élaboration des documents techniques et réglementaires de référence ;

- la communication et la collaboration avec toutes les parties prenantes



© Jarnias

(centres de formation, syndicats, entreprises, salariés...).

- Un mandat dans lequel Xavier Rodriguez entend s'investir avec énergie afin de faire avancer la filière : « La chance m'est donnée de contribuer à faire avancer la filière des cordistes qui a encore besoin de reconnaissance, et de défendre sa singularité. Je ne prends aucun mandat à la légère et m'engage pleinement dans chacune de mes missions et fonctions, comme P-DG ou élu syndical », poursuit-il.

\* Créé en 1993, Jarnias est un groupe français, expert des travaux en hauteur et d'accès difficile. Il propose en outre les travaux de cordistes, la mise en place de dispositifs de protection de la sécurité de l'homme en hauteur pour le BTP et la formation. Grâce à ses dernières acquisitions (ACROBTP, Profil, Alti City et Acousteam), le groupe a renforcé ses métiers dans les secteurs de la haute montagne, de l'industrie, du portuaire... Jarnias compte 250 collaborateurs au quotidien pour un chiffre d'affaires de plus de 50M€.

\*\* France Travaux sur Cordes est un syndicat français professionnel qui regroupe les entreprises appartenant aux secteurs des travaux publics ou du bâtiment qui ont pour activité principale ou secondaire les travaux sur cordes.

## Grand prix national de l'ingénierie 2023: le concours fait peau neuve

Le grand prix national de l'ingénierie (GNPI) récompense, chaque année depuis 2006, une équipe ayant concouru à la conception soit d'un produit, soit d'un projet remarquable dans le domaine de l'industrie ou de la construction. Ce grand prix a pour but de mettre en lumière l'ingénierie française dans toute sa diversité et ses composantes. Pour sa prochaine édition, le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires, le ministère de la Transition énergétique et le ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, en partenariat avec Syntec-Ingénierie, procèdent à une refonte du concours. Les 3 catégories sectorielles sont remplacées par 3 nouvelles catégories transversales. Les entreprises d'ingénierie pourront désormais proposer des projets ou produits qui contribuent à :

- décarboner l'industrie,
- adapter l'existant pour lutter contre les causes ou les effets du dérèglement climatique,



- innover pour les transitions énergétiques.

Un grand prix sera également remis, sans référence à une catégorie.

Les ministères et Syntec-Ingénierie font évoluer le concours au vu des nouveaux enjeux qui traversent notre société, et dans l'objectif de mettre en lumière la contribution essentielle de la prestation intellectuelle d'ingénierie à la réussite des grandes transitions: environnementale, industrielle et énergétique notamment.

À noter: les critères d'appréciation évoluent également, avec notamment la prise en compte du changement climatique, dans ses dimensions d'atténuation ou d'adaptation, l'impact positif sur la biodiversité et plus généralement sur l'environnement; ou encore l'utilisation de méthodologies, de solutions, d'outils ou de technologies nouvelles dans la réalisation du projet. Le chef du service de l'IGEDD assurera la présidence du jury. (En photos le Palmarès 2023)

### VENTE - REPARATION - FABRICATION - ASSISTANCE TRAVAUX

Forages Pieux & Micro pieux - Forages d'eau & Géothermie - Forages Sous-marins & Acrobatiques - Injection



Une Foreuse C6 CASAGRANDE équipée d'un barillet et une C4 CASAGRANDE viennent compléter notre offre de matériel de location - Mâts de forage, Centrales d'injection, Foreuses. SUDIMAT est distributeur exclusif LDS Construct, matériel de projection de béton voie sèche

**SUDIMAT**  
316, Chemin l'hobit  
31790 SAINT SAUVEUR  
Tel : 0534 270 300

**SFDM**  
20, Rue Jacquard  
91280 St PIERRE DU PERRY  
Tel : 01 81 85 07 29

**FOURMIFOR**  
4, ZA de Valdonne  
13124 PEYPIN  
Tel : 04 42 04 66 25

## Solscope s'impose comme un Salon incontournable

L'événement qui réunit, entre autres, exposition, colloque, forum exposants, Trophées de l'innovation s'est imposé comme le Salon incontournable de la géotechnique, du forage et des fondations. Retour sur la 15<sup>e</sup> édition qui s'est déroulée en juin dernier à Eurexpo Lyon.

L'avant-dernière édition, celle de 2021, avait déjà été très remarquée, car les organisateurs de ce Salon avaient décidé de la maintenir coûte que coûte après la covid, et ils avaient eu raison, car le cru de 2021 s'est révélé être un franc succès.

Mais cette édition 2023 restera dans les mémoires de tous les participants et visiteurs comme étant la référence en matière de géotechnique, forage et fondations.

Et c'est à plus d'un titre que le Salon Solscope s'est imposé comme l'événement incontournable pour l'ensemble de la profession.

Pour commencer les chiffres parlent d'eux-mêmes : 4000 badges ont été édités, 30 % de participants en plus, 200 exposants, et une surface d'exposition intérieure et extérieure de 9000 m<sup>2</sup>. Tous ces chiffres confirment bien la progression constante de ce Salon, et ce, depuis sa création en 1992 à Poitiers (Vienne), au Futuroscope.

Puis c'est dans une ambiance encore plus conviviale que les autres éditions, voire festive, que s'est déroulée ce Salon 2023. En effet, cela n'aura échappé à personne que cette année-ci, Solscope fêtait ses 30 ans !

D'ailleurs à l'entrée du Salon, une grande banderole avait été disposée afin que chacun puisse laisser un témoignage à l'occasion de cet anniversaire, un peu comme un livre d'or. On a ainsi



pu lire « 30 ans le plus bel âge », « Nous souhaitons un joyeux anniversaire à Solscope », « Joyeux anniversaire de l'UPDS », « Bravo à Solscope », « On aime Solscope », etc. Une belle initiative des organisateurs.

### PLACE AUX NOUVEAUX EXPOSANTS

Pour le numéro de juin 2023, l'équipe rédactionnelle de *Solscope Mag* avait interviewé certains pionniers du Salon ; ceux qui ont fait confiance à Dominique Rousseau, qui ont cru en lui et en son projet, qui l'ont accompagné durant

toutes ses années et qui étaient présents pour ce 30<sup>e</sup> anniversaire.

Pour ce numéro, nous avons souhaité donner la parole aux nouveaux exposants, ceux qui ont rejoint la grande famille Solscope pour cette édition anniversaire. Nous sommes partis à la rencontre de certains d'entre eux afin de recueillir leurs premières impressions. Des témoignages à découvrir en page 20.

Devenu donc incontournable au fil des années grâce à la richesse de son offre et au climat particulier créé, le Salon Solscope a été une nouvelle fois un lieu d'échanges et de partage des connaissances dans les milieux de la géotechnique, du forage et des fondations. Le colloque et le forum exposants y sont pour beaucoup.

### COLLOQUE ET FORUM EXPOSANTS

Organisé durant les deux jours du Salon, les 14 et 15 juin derniers, le colloque, qui pour la première fois était en libre accès, a rassemblé des experts du secteur sur le thème « Pour une géotechnique responsable ». Sujet ô combien passionnant et qui a fait salle comble durant toutes les interventions !

Les séances – présidées à tour de rôle par Nicolas Utter (CFMS), Michel Khatib





© Solscope

La grande banderole spéciale anniversaire et destinée aux témoignages de chacun.

(Syntec Ingénierie), Stéphane Monleau (Soffons) et Olivier Barnoud (USG), présidents ou représentants de 4 des 11 organisations professionnelles\* parrainant Solscope – ont été denses, mais ont laissé la place à des temps d'échanges constructifs, en dehors de tout contexte contractuel, ce qui demeure la première raison d'être du Salon.

Le forum exposants, qui lui fêtait sa 5<sup>e</sup> édition, a permis à une douzaine d'entreprises de développer, durant les 2 jours du Salon, des sujets en lien avec leurs activités. Une très belle fréquentation également pour cette partie.

## LES TROPHÉES DE L'INNOVATION

Toujours très attendus par la profession, les Trophées de l'innovation Solscope ont été remis le 15 juin, au cœur de l'exposition. Cette année, 25 dossiers de candidatures ont été déposés dans les différentes catégories, et le jury, composé des parrains de Solscope\*, a désigné 4 lauréats.

Ainsi, la société Soilcloud a reçu le « Prix du procédé ou produit de l'année » pour son application SoilCloud Structuration



© Solscope

La surface d'exposition extérieure accueillait de très nombreuses machines.

des données géotechniques autour d'un SIG. Un article lui est consacré en page 72 dans la rubrique « Portrait d'entreprise ».

La société Geotec a reçu le « Prix du chantier d'investigation de l'année » pour son intervention sur site avec présence d'amiante à Adé (Hautes-Pyrénées).

Le « Prix de l'ingénierie géotechnique de l'année » a été décerné à Egis pour

La teneur des dossiers de candidature ainsi que les supports des exposés du colloque sont disponibles en ligne sur [solscope.fr](http://solscope.fr)

Cette 15<sup>e</sup> édition achevée, nous vous donnons rendez-vous en 2025 ! Le site d'accueil vous sera dévoilé prochainement. D'ici là, *Solscope Mag* et le site [Solscope.fr](http://Solscope.fr) constitue votre lien avec ce que l'on appelle maintenant : « la communauté Solscope ». ■

## Aude Moutarlier

### \* Les parrains de Solscope :

- AITF : Association des ingénieurs.e.s et ingénieure.e.s en chef territoriaux de France
- CFGI : Comité français de la géologie de l'ingénieur et de l'environnement
- CFMR : Comité français de mécanique des roches
- CFMS : Comité français de la 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 la géothermie
- SOFFONS : Syndicat des entrepreneurs de sondages, forages et fondations spéciales
- SYNTEC INGÉNIERIE : Fédération des professionnels de l'ingénierie
- UPDS : Union des professionnels de la dépollution des sites
- USG : Union syndicale géotechnique

© Solscope



Les parrains de Solscope.

## L'innovation récompensée

Les Trophées Solscope 2023 ont été remis lors du Salon. Le jury a remis le « Prix du procédé ou du produit de l'année » à Soilcloud. Il a également attribué son « Coup de cœur » à ADB System pour son coffrage organique. Le bureau d'études Egis s'est vu récompensé par le « Prix de l'ingénierie géotechnique de l'année ». Tandis que le groupe Géotec remporte le « Prix du chantier d'investigations de l'année », le « Prix Jeunes » étant attribué à Thi Phuong Lan Vu, candidature portée par Géotec. Présentations.



Les lauréats des Trophées de l'innovation.

### LE COUP DE CŒUR POUR LE COFFRAGE PERDU ORGANIQUE D'ADB SYSTEM

Les membres du jury ont eu un coup de cœur pour le coffrage perdu organique d'ADB System. Une alternative écologique et économique très intéressante lors de la réalisation de parois de pieux sécants.

L'idée est venue de la problématique du polystyrène jusqu'alors souvent utilisé pour réaliser les coffrages. « L'évolution des normes a interdit de forer ou de brûler les coffrages en polystyrène. Certaines entreprises ont donc développé des sortes de tire-bouchons spéciaux », explique Adrien Hemet, fondateur d'ADB System. Un système qui fonctionnait, mais qui était très chronophage. De plus, les risques pour les ouvriers sur les chantiers étaient importants. Et puis, une fois le polystyrène retiré, il fallait encore l'envoyer en centre de tri. Un bilan sécurité, financier et carbone désastreux qui ne plaisait pas à ce spécialiste des parois en pieux sécants. Et c'est au retour d'un chantier, après avoir perdu un temps précieux à trier le polystyrène qu'est venue l'idée de créer un coffrage organique.

Il source donc des matériaux près de chez lui. C'est le lin, très cultivé dans sa région pontoise, qui apparaît finalement comme une évidence. « La fibre est exploitée, mais pas la paille de lin. C'est une partie que les agriculteurs cherchent à valoriser. Ainsi pas besoin de produire à cette fin. » En homme de terrain, il cherche à optimiser la solution et pense ainsi à utiliser un colorant naturel afin de distinguer facilement les emplacements des pieux primaires et secondaires. Enfin, pour aller au bout de son action, il a trouvé le laitier moulu auprès d'Ecocem qui récupère le laitier à Arcelor Mittal pour le broyer finement.

« Ensuite, selon la localisation des chantiers, je source à proximité. J'ai réalisé des coffrages en balle de riz, d'autre en chènevotte... » L'idée est de limiter au maximum l'impact environnemental et le coût pour les entreprises de fondation. Un concept qui a séduit de nombreuses entreprises de fondation, mais aussi le jury qui a attribué un coup de cœur à Adrien Hemet. « C'est toujours très valorisant d'être reconnu par la profession. J'avais concouru avec l'envie de gagner et de faire encore mieux connaître cette solution », conclut le lauréat.

### LE PRIX DE L'INGÉNIERIE POUR LE PROJET TERCO 2

Le bureau d'études Egis s'est vu attribuer le « Prix de l'ingénierie » pour Terco 2 « empreinte carbone des stratégies de terrassement » : un projet de recherche appliquée qui s'inscrit dans la démarche globale d'Egis pour mettre en œuvre l'écoconception dans ses projets.

Les terrassements constituent une part importante des émissions carbone des chantiers d'infrastructure. Mais lorsque l'on doit choisir une solution technique, c'est bien souvent le coût, le planning ou la faisabilité technique qui sont déterminants. « Pourtant, intégrer l'empreinte carbone dans les critères de décision est nouveau, mais nécessaire. Mais, pour cela, il faut être en mesure d'obtenir de manière fiable le bilan de gaz à effet de serre des différentes solutions », explique Jocelyn Bouchut, ingénieur géotechnicien au sein d'Egis.

C'est justement pour répondre à ces enjeux qu'Egis a mené le projet Terco 2 avec les entreprises Valerian et Forézienne avec le cofinancement de la fondation Ferec. Le but était d'établir l'empreinte carbone de solutions de terrassement et de traitement des sols au stade de la conception, mais aussi de comparer l'empreinte carbone de ces solutions et de définir des « points de bascule ».



Adrien Hemet, fondateur d'ADB System.

Il a fallu effectuer un important travail pour définir les facteurs d'émission pour les différentes activités qui composent un chantier de terrassement, et le retour d'expérience des entreprises partenaires a été essentiel. « *L'analyse des données existantes a montré que l'on ne disposait pas des entrants nécessaires pour évaluer et comparer les différentes solutions de terrassements qui se présentent sur des chantiers, et ainsi mettre en évidence les stratégies les plus vertueuses.* » Les résultats obtenus constituent ainsi une valeur ajoutée pour la réalisation de bilans de GES des projets de terrassement.

La deuxième partie du projet Terco 2 a permis d'établir l'empreinte carbone de scénarios classiques de chantiers de terrassement, d'en faire varier les principaux paramètres et de comparer les solutions techniques entre elles. Cela a permis de mettre en évidence les paramètres-clés qui entrent en compte dans l'empreinte carbone des chantiers de terrassement, ainsi que les points de bascule qui permettent de privilégier telle ou telle option technique, selon le contexte propre à chaque chantier.

Le Prix de l'ingénierie vient récompenser le travail accompli. « *Il donne de la visibilité sur l'importance de ce sujet, tant en interne qu'en externe, et nous incite à poursuivre nos recherches sur d'autres projets. Nous travaillons à présent sur l'empreinte carbone d'autres ouvrages géotechniques. L'étape suivante sera de mettre en pratique ces éléments dans les chantiers* », indique Jocelyn Bouchut.

### LE PRIX DU CHANTIER D'INVESTIGATIONS POUR LE GROUPE GÉOTEC

Géotec a reçu le « Prix du chantier d'investigations » pour un chantier de sondage avec transport d'échantillons amiantés. Un défi relevé avec brio en toute sécurité.

C'est dans le cadre d'une déviation routière que la DREAL Occitanie a confié à Géotec des missions de travaux de sondage avec la contrainte amiante et du transport d'échantillon. Il fallait réaliser 9 sondages carottés de 25 à 35 m de profondeur dans un éperon rocheux naturel. La présence potentielle d'amiante dans le massif rocheux nécessitait des précautions particulières conformément à la législation en vigueur.

C'est la première fois que les équipes de Géotec devaient intervenir sur un chantier extérieur avec la contrainte amiante. Elles étaient donc encore peu expérimentées. Elles ont dû créer un protocole et le faire valider au client, mais aussi au contrôleur sécurité et à l'inspection du travail.

En plus de l'accès délicat, les équipes ont donc dû respecter les contraintes de prélèvements du client et maintenir le chantier géotechnique tout en veillant à la sécurité des collaborateurs, les exigences du client et la réglementation amiante. Il fallait par ailleurs veiller à la protection de l'environnement et de la population avec des poussières d'amiante.

Afin de conserver l'efficacité, malgré le travail en sous-section 4, plusieurs équipes sont intervenues en rotation sur le même atelier. Par ailleurs, Géotec a développé un système de filtration pour les eaux de forage. Celui-ci filtre les boues et les poussières d'amiante et seule une eau propre, sans amiante et avec peu de matière en suspension, est rejetée.

Sur ce chantier, ce n'était pas la réduction des coûts qui était visée, mais bel et bien d'intégrer cette contrainte amiante sur un chantier géotechnique. D'ailleurs, cette dernière engendre des frais supplémentaires avec le matériel spécifique et une productivité des équipes moins importante.



### LE PRIX JEUNES POUR LA MODÉLISATION AUX ÉLÉMENTS D'UN QUAI FLUVIAL

Le « Prix Jeunes » a été remis à Thi Phuong Lan Vu, élève en 2<sup>e</sup> année GCC, double diplômé à l'école des Ponts Paris Tech sous la tutelle de Jonathan Rot, ingénieur expert Géotec. Dans le cadre de la rénovation d'un quai dans le port de Bayonne, la Région Nouvelle-Aquitaine Port de Bayonne a confié à Géotec des missions d'études géotechniques de projet G2 Phase PRO et de supervision géotechnique d'exécution (G4) ainsi que la participation à la phase assistance aux contrats de travaux. « *L'objectif général de ce travail de fin d'études a été de construire un modèle global 3D aux éléments finis des ouvrages sur la base des dimensionnements effectués en phase G2PRO afin d'identifier les paramètres forts gouvernant le comportement des ouvrages.* »

Ce projet prévoit de remplacer un ancien quai, datant de 1964 et construit sur pieux. Le nouveau quai, en rive gauche de la rivière, aura une longueur d'environ 180 m. Il sera réalisé dans le prolongement d'un quai existant pour permettre la continuité technique. Il doit aussi prévoir l'installation d'une voie ferrée et d'un portique conteneurs en liaison avec celle-ci. Il s'agit d'un projet complexe en géométrie avec une forte hauteur soutenue. Par ailleurs, les descentes de charges sont significatives et les sols mous sujets à la consolidation. Des travaux de renforcement de sol par inclusions rigides sont donc à prévoir. De plus, il fallait prendre en compte les existants dans le cadre des travaux, penser aux fortes variations des niveaux d'eau et inclure le risque sismique. Au-delà des spécificités techniques, il a fallu retranscrire le projet avec l'ensemble des éléments et des coupes dans un espace tridimensionnel pour représenter au mieux la réaction réelle du projet. « *L'une des plus grandes difficultés a été de prendre en compte les variations spatiales de lithologie, la complexité des éléments de structures à la fois existants et projetés ainsi que les démarches de construction projetées comme la voie ferrée ou le portique.* »

Ce travail de fin d'études a permis la construction d'un modèle global 3D aux éléments finis d'un ouvrage portuaire complexe. « *Les résultats obtenus par la modélisation ont mis en évidence l'importance des mécanismes d'interaction sol-structure que les approches courantes de dimensionnement ne permettent pas toujours d'évaluer.* » Cette démarche d'ingénierie permettra d'améliorer la pratique des éléments finis pour les prochains ouvrages et ainsi optimiser leur dimensionnement et réduire, de fait, leur impact environnemental. ■

**Maylis Roizard**

## Place aux nouveaux exposants...

Lors de cette édition, le Salon Solscope a accueilli plus d'une trentaine de nouveaux exposants. Nous avons recueilli certains témoignages.

### « SALON À TAILLE HUMAINE, IL EST AUSSI BIEN QUALITATIF QUE QUANTITATIF »

(FLORA VENDRA DE CHEZ SAGE)



« La Société Alpine Géotechnique (Sage Ingénierie) est un bureau d'études de sols indépendant (SAS) dont les services couvrent toute l'ingénierie géotechnique spécifique aux terrains de montagne (Alpes, Massif central et Pyrénées), et qui maîtrise complètement les études de sols et les missions d'études géotechniques de tous types de projets. C'était notre première participation et nous ne sommes absolument pas déçus ! Le Salon était très bien organisé et notre participation nous a permis de faire connaître certains de nos domaines d'activité qui n'étaient pas

**Sur le stand, Ludovic Mingrat, directeur général de Sage.**

complètement connus de nos clients, et de créer de nouveaux contacts. Nous sommes vraiment très satisfaits de cette première édition et il est fort probable que nous concrétisons des projets dans les mois à venir suite aux très bons contacts que nous avons eus avec certains de nos visiteurs ».

« Il est fort probable que nous concrétisons de nouveaux projets »



De gauche à droite : Flora Vendra, Assistante commerciale et technique ; Lionel Lorier, Président et Carole Mingrat, responsable Pôle Ressources, Marketing et Communication.

### « UN BILAN TRÈS POSITIF »

(MANON MOLLES-DEFLANDRE DE CONFLUENCE)

« Créé en 2007 et comptant aujourd'hui une vingtaine de personnes, notre bureau d'études géotechnique, Confluence, réalise principalement des missions d'études et de conseils géotechniques sur tous types d'ouvrages (ponts, bâtiments, falaises, barrages, ouvrages sinistrés...) pour des maîtres d'ouvrage publics et privés, ainsi que pour des entreprises. Mais nous accompagnons également nos clients dans les domaines connexes



à l'ingénierie, tels que les sondages, les essais et contrôles sur chantier et les essais en laboratoire. Le Salon Solscope nous a permis de nous rendre visibles auprès d'acteurs de la profession qui ne nous connaissaient pas, ou seulement pour une partie de nos activités, mais également de renforcer nos liens avec nos clients et partenaires. C'est aussi un événement fédérateur en interne. Nous sommes très fiers d'avoir pu participer à cette édition, l'ambiance générale du Salon ayant favorisé les échanges constructifs et enrichissants autour de nombreuses thématiques métier. Le but recherché n'était pas de concrétiser de nouveaux contrats sur le Salon mais plutôt de faire connaître notre bureau d'études, une partie de notre équipe et nos spécificités afin de se projeter sur de futurs projets avec de nouveaux clients ou nos partenaires actuels.



**Sur la zone extérieure du Salon au côté du cisaillement à la grosse boîte.**

Mais je ne vous cache pas que nous avons pu échanger avec de nouveaux interlocuteurs, ce qui pourrait donner lieu, je l'espère, à des sollicitations concrètes de leur part dans les prochains mois. »



L'équipe de Confluence présente lors du Salon.

## « NOS ÉCHANGES SUR LE SALON ONT MONTRÉ QUE LES PETITS BUREAUX D'ÉTUDES AVAIENT LEUR PLACE À SOLSCOPE »

(SÉBASTIEN LEIBRANDT, DIRECTEUR TECHNIQUE, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN - GÉOLOGUE (DR.))



**Sébastien Leibrandt, directeur technique, ingénieur géotechnicien - géologue (Dr.).**

### Pouvez-vous nous décrire votre activité ?

**Sébastien Leibrandt:** Tudsols est un bureau d'études en géotechnique qui réalise des missions géotechniques G0 à G5 pour tout type de construction, depuis la maison individuelle au bâtiment R+6, en passant par des bâtiments industriels. Nous combinons nos études géotechniques par de la conception d'assainissement non collectif (ANC) et des études hydrauliques de dimensionnement des eaux pluviales (EP). Nous avons par ailleurs la compétence du repérage avant travaux de l'amiante environnemental dans les sols et roches en place.

### C'est votre première participation au Salon Solscope: quel bilan en tirez-vous ?

**S. L.:** Un bilan très positif avec de nombreux échanges sur nos activités et des prises de contact pour réaliser des investigations de terrain pour des bureaux d'ingénierie. Malgré notre petite taille

(10 salariés), nous avons pu mettre en avant notre exigence à réaliser des missions de qualité, tout en étant réactifs. Nous avons pu également informer sur la notion de repérage avant travaux de l'amiante environnemental qui est, malgré la norme existante, encore inconnue des acteurs de la géotechnique, pourtant en première ligne en termes d'exposition potentielle du personnel de chantier à l'amiante.

### Êtes-vous satisfaits de cette édition par rapport à vos objectifs ?

**S. L.:** Oui, tout à fait satisfaits, car nous ne savions pas si notre voix allait porter au milieu des grands acteurs de la géotechnique et nos échanges sur le Salon ont montré que les petits bureaux d'études avaient leur place à Solscope, tant pour prendre des contacts chez des fournisseurs que pour communiquer autour de notre capacité à réaliser des investigations de terrain adaptées pour des grandes entreprises d'ingénierie à la recherche de prestations de terrain de qualité. Nous avons également échangé autour de nos missions d'ingénierie, notamment concernant les diagnostics géotechniques suite à sinistre sur le bâti avec des experts en assurance.

### Allez-vous concrétiser des projets dans les prochains mois suite à ce Salon ?

**S. L.:** Nos discussions durant le Salon devraient, en effet, porter leurs fruits sur des projets de grande envergure qui nous permettraient de conforter notre champ d'intervention national notamment. De plus, je trouve que le Salon est à taille humaine en termes de nombre d'exposants avec une bonne répartition entre fournisseurs et grands groupes de l'ingénierie et de la construction. La part laissée à l'innovation était tout à fait intéressante également. Solscope est finalement un rendez-vous incontournable pour échanger et se tenir informé sur les futurs virages réglementaires et technologiques !





## POMPES POUR FORAGES ET FONDATIONS





CPI-SALINA  
ZAC des Cettons  
9 Rue Panhard & Levassor  
78570 CHANTELOUP-LES-VIGNES  
Tél. : +33 (0)1 39 70 84 50  
[www.cpi-salina.fr](http://www.cpi-salina.fr)  
[www.proripompes.fr](http://www.proripompes.fr)

## Les produits ou services du Salon croisés tout au long des allées...

En intérieur comme en extérieur, ils sont toujours plus nombreux à présenter leurs nouveautés sur une surface qui est de plus en plus étoffée. L'occasion ainsi de découvrir des produits ou services de certains industriels présents.

### Sentinelle : l'instrument pour la surveillance des écrans pare-blocs

GD-Test a présenté l'extensomètre Sentinelle. Grâce à ses 3 capteurs intégrés, Sentinelle est capable de détecter les impacts des blocs contre les écrans, la variation d'inclinaison du montant de la barrière, la déformation du filet.

La surveillance des écrans pare-blocs nécessite une planification minutieuse, dont le but principal est la définition de la meilleure combinaison possible entre les paramètres à étudier, les modalités d'acquisition des données et la fiabilité des instruments de mesure. Sentinelle intègre 3 capteurs capables de détecter les impacts des blocs contre les barrières, la variation d'inclinaison du montant, la déformation du filet.

L'instrument est autonome du point de vue énergétique parce que sa batterie est rechargée par un mini-panneau photovoltaïque.

Tous les composants de l'instrument sont étanches et assurent la fiabilité des mesures sur le long terme.

Pour garantir une surveillance automatique, Sentinelle est connecté via radio (*wireless*) à une *gateway*. La *gateway*

collecte les données et les envoie à votre serveur où à la plateforme GDTMS, conçue pour la visualisation des données et le pilotage de votre projet de monitoring.

Caractéristiques principales :

- 3 capteurs en 1,
- fiable et robuste (coque résistante aux chocs),
- acquisition automatique des données,
- autonomie illimitée grâce à un panneau photovoltaïque intégré,
- étanche (indice de protection IP67),
- facilité d'installation (installation possible dans toutes les positions),
- portée radio élevée.



© GD-TEST

### Apafor 100 et 350

L'Apafor 100 (*photo*) fait partie de la gamme des pénétrateurs lourds dynamiques permettant de réaliser des tests pénétrométriques à la fois selon les normes NF P 94-115, NF EN ISO 22476-2 (PDB), NF EN ISO 22476-3 (SPT) mais aussi selon la norme NF P 94-063 pour contrôle de compactage (avec option Apadyn). Bien sûr des carottages par battage sont également réalisables, et même des forages à la tarière de faible diamètre et à profondeur limitée ( $\pm 10$  m selon terrains). Sa configuration sur chenillard et ses dimensions très compactes offrent une facilité d'accès même dans les zones escarpées et des déplacements sans effort. Son rack à tiges et bac à outils permettent de transporter les équipements et ainsi faciliter d'autant plus la logistique sur chantiers. La descente automatique de la cage est un dispositif alliant précision et confort pour l'opérateur tout en assurant le respect à 100 % des normes d'essais (poids système battage < 25 kg). Les essais de pénétration dynamique (PDB et SPT) sont réalisés avec comptage de coups intégré, et les prises d'échantillons au moyen d'un carottier battu (pour échantillons non remaniés sous gaine translucide), de carottiers Shelby ou de carottiers à fenêtres. Les essais en contrôle de compactage sont effectués avec système d'acquisition pour rester conformes à la norme NF P 94-063, avec l'unité centrale d'acquisition GeoBOX et le système Apadyn. Le système de battage dynamique S de la gamme Apafor est certifié CER100 GR0032, et le pénétrateur Apafor 100 et système Apadyn ont été développés pour répondre aux exigences Cofrac. Ce pénétrateur est proposé avec un moteur essence Vanguard 13 CH.



© AM

La sondeuse Apafor 350 est un concentré de solutions pour la réalisation de tous les travaux de sondage et forage : rotary, carottage, tarière, roto-percussion et marteau fond de trou, ainsi qu'essais pénétrométrique dynamique et contrôle de compactage. Grâce à son gabarit passe-partout et à son chenillard à voie variable hydraulique, elle peut passer des portes standards ou autres zones difficiles d'accès tout en offrant de remarquables performances. Sa tête de forage à cylindrée variable, réglable depuis le pupitre de commande, lui confère une large plage de vitesse de rotation et de couple.

Ses nombreuses options font de cette sondeuse une machine complète, tout en gardant une masse totale de 2,7 t (toutes options comprises) permettant de la transporter sur remorque routière 3,5 t.

L'option pénétromètre dynamique automatique pour essais PDB, SPT et contrôle de compactage (pénétration-densitographe) est mise en place très aisément sur le chariot de tête qui conserve son effacement hydraulique : une conception unique sur le marché des machines de forage ! L'axe de travail de la machine reste le même, quelle que soit la configuration. L'ensemble

reste à l'intérieur de la cage de sécurité et le pénétrateur est utilisé cage ouverte : un avantage notable pour tous les essais de pénétration et travaux de battages.

Pour le marché européen cette machine est proposée en version UFCMF équipée d'une cage de sécurité avec porte physique ou immatérielle et d'un moteur diesel Yanmar 36 ch conforme aux nouvelles normes environnementales en vigueur.

## Geoteams, la nouvelle application pour gérer les essais géotechniques de bout en bout

L'équipe Geoteams a lancé sa nouvelle application pour les sondeurs indépendants et les bureaux d'études géotechniques.

Geoteams est une application web et mobiles pour les entreprises qui réalisent des études de sol. L'application permet de rassembler et de partager tous les éléments relatifs aux chantiers et aux essais géotechniques : consignes, commentaires sur site, plans d'implantation, photos des sondages, etc.

Geoteams dispose de fonctionnalités spécifiques pour les essais au pénétromètre dynamique : les sondeurs notent les mesures directement depuis leur téléphone portable ; les ingénieurs au bureau peuvent consulter les données en temps réel et gagnent du temps pour générer les pénétrogrammes.

Le premier objectif de Geoteams était de faire gagner des minutes précieuses aux ingénieurs en évitant la retranscription des mesures depuis les relevés papier vers ordinateur. Mais les discussions et les démonstrations d'un prototype ont rapidement fait apparaître tout un ensemble de tâches dont l'exécution pouvait être



accélérée par une nouvelle application. « Nous nous donnons pour ambition de faire gagner du temps à chaque membre des équipes géotechniques, en prenant en compte la chaîne de travail complète », explique Sylvain Delangue, co-créateur de l'application et président de J'origine, la société éditrice de l'application Geoteams.

Pour la V1, l'équipe s'est concentrée sur des points-clés tout en mettant en place un socle technique moderne et solide permettant de travailler dans toutes les conditions, notamment sur les chantiers où la connexion internet est incertaine : gestion des chantiers et des essais ; consignes et observations *in situ* ; récupération des coordonnées GPS des sondages ; ajout de documents (ex : plans) ; prise directe de photos ; synchronisation automatique des données dans un cloud sécurisé ; support du mode non connecté ; essais au pénétromètre dynamique (prise de mesures, gestion de l'avant-trou, pénétrogramme, export de données).

Comment tester ? Geoteams est accessible via les navigateurs internet à l'adresse <https://app.geoteams.io> et en téléchargeant l'application depuis App Store et Play Store.

## Litef propose un nouvel appareil d'alignement portable pour des résultats de forage précis : le Lipad-100

Le Lipad-100 a été développé pour toutes les tâches d'alignement dans des conditions difficiles, en particulier dans le génie civil spécialisé et les travaux souterrains, et fournit des résultats de forage extrêmement précis. Grâce à l'alignement rapide de l'affût de l'appareil de forage avant le forage ou à la mesure ultérieure du forage effectué, le travail de forage est réduit au minimum. Idéal pour les tâches de forage précises, telles que les forages à injection ou pour une multitude de forages, tels les forages d'ancrage.

Après seulement 5 min d'alignement, l'appareil est prêt à être utilisé. L'absence de limitation de l'inclinaison et la fonctionnalité indépendante permettent à l'opérateur de mesurer directement n'importe quelle orientation sans configuration supplémentaire. Des batteries interchangeables et un chargeur de batterie externe assurent de ne jamais manquer d'énergie sur le terrain.

Le Lipad-100 améliore ainsi considérablement l'efficacité des mesures. Aucune compétence particulière ni aucun équipement d'alignement supplémentaire ne sont nécessaires pour le rendre opérationnel. Il élimine le besoin de recourir à des prestataires de services coûteux et permet un gain de temps considérable. Des séries de mesures, qui prennent normalement des jours à l'aide d'un tachymètre, sont effectuées en quelques heures par une seule personne. Les données de mesure peuvent être facilement exportées à des fins de contrôle de la qualité, et l'opérateur peut même utiliser son propre appareil portable Android pour le faire fonctionner.

L'étalonnage en fonction de la température et la protection contre les chocs, la pluie et la poussière font de l'appareil un compagnon solide sur le terrain. La technologie aéroporée, avec ses nombreux tests intégrés, garantit des données



© Litef

auxquelles l'opérateur peut se fier. Les réseaux de mesures, qui sont sensibles aux erreurs, ne seront plus un problème : toutes les données sont enregistrées indépendamment des mesures précédentes. Ceci est particulièrement avantageux dans les environnements accidentés ou sans signal GPS disponible.

L'appareil est conçu comme un système autonome alimenté par batterie. Il contient la toute dernière génération de gyroscopes à fibre optique et d'accéléromètres MEMS de qualité

navigationnelle. Combinés ensemble, ce système inertiel avancé effectue des mesures indépendantes. L'alignement, les tests intégrés et le contrôle des performances sont tous effectués en interne. Le Lipad-100 indique également avec précision les trois angles d'azimut, d'inclinaison et d'élévation par rapport à ses axes X, Y et Z.

De plus, le Lipad-100 dispose d'une connectivité Bluetooth intégrée pour communiquer avec tout appareil portable. L'application

Lipad-100 basée sur Android (téléchargeable gratuitement dans la boutique en ligne Play Store) permet à l'opérateur de contrôler l'appareil et de visualiser les données de mesure en temps réel. Toutes les données peuvent être stockées et partagées avec la référence de l'opérateur, le nom du projet, la date et l'heure et, si elles sont disponibles, les informations GPS de la position actuelle.

Enfin, le socle de l'engin permet un montage précis de l'appareil sur des supports de fixation de mesure spécifiques. Le design compact permet à l'opérateur de manipuler facilement l'appareil. En plus de sa résistance aux projections d'eau et de poussière, ce dispositif fonctionne indépendamment de l'environnement magnétique et atteint la plus haute précision dans la plage de température spécifiée, soit de - 20 à + 60 °C.

## Airmold, un coffrage dans l'air du temps

Réduction des déchets, réutilisation... Sur les chantiers, les alternatives écologiques vont de plus en plus au-delà de l'obligation pour devenir de véritables solutions avantageuses à plusieurs niveaux. Réutilisables, les coffrages gonflables Airmold répondent à la fois aux enjeux de durabilité, tout en restant économiques.

Présenté sur la dernière édition du Salon Solscope, ce nouveau coffrage gonflable, spécialement conçu pour la création de murettes-guides lors de la réalisation de pieux sécants et pieux tangents, a fait officiellement son entrée dans le secteur des fondations.

### UNE ALTERNATIVE ÉCOLOGIQUE ET ÉCONOMIQUE

Les coffrages traditionnellement utilisés pour ce type de travaux sont en polystyrène. Légers mais encombrants, et, surtout, non réutilisables, ils nécessitent l'utilisation d'une benne à déchets après avoir été sortis, tant bien que mal, du béton sec. Face au gaspillage et à la pollution que représente l'opération, l'entreprise NGE Fondations cherchait avant tout une solution réutilisable. C'est donc pour répondre à cette



© Airmold

problématique que le partenariat s'est noué entre le spécialiste des polymères techniques et l'entreprise de travaux spéciaux et a donné lieu à la création de ces modules Airmold. « *Le coffrage est gonflé en moins d'une minute grâce à un compresseur à air, ou même, pour les plus petits modèles, simplement grâce à une pompe manuelle. Grâce à sa forme modulable, il est ensuite positionné dans la fouille pour une empreinte parfaite après coulage du béton. L'implantation de ces modules est facile et rapide pour les opérateurs* », explique Lucas Belabed, chef de produit chez Airmold.

Les coffrages gonflables peuvent également être utilisés plus de 100 fois. « *Et peut-être même plus, reprend le responsable. Car Airmold est constitué de plusieurs couches de polyuréthane thermoplastique armées, ce qui lui confère une résistance parmi les plus élevées pour répondre aux contraintes de chantiers.* » Ainsi, depuis 2021, les coffrages ont été très largement utilisés par NGE Fondations pour la réalisation de 200 m de linéaires de murettes, ce qui a déjà évité plus de 200 m<sup>3</sup> de polystyrène en décharge.

### VERS D'AUTRES APPLICATIONS

Grâce à Airmold, NGE a réussi à la fois à réduire ses déchets et à améliorer son empreinte carbone. D'autres entreprises dans le secteur des fondations devraient également suivre, en tout cas celles qui réalisent régulièrement des murettes-guides pour pieux sécants. Des coffrages Airmold pour la réalisation de parois moulées devraient également voir le jour, tout comme des coffrages pour le recépage de fondations. Les possibilités semblent être énormes dans les travaux publics.

## Aérolithys fait mousser le béton

Commercialisé depuis 2019 sous la marque Aérolithys, ce béton mousse est un matériau de remblai d'engineering léger, autocompactant et non essorable, et donc optimal pour de nombreuses applications et notamment en géotechnique. Fabriqué et pompé directement sur chantiers, il est utilisé dans le cadre de réalisations de comblements de cavité, de murs de soutènement, de culées de pont ou couches de forme. Il bénéficie de caractéristiques mécaniques propres à sa légèreté, à savoir un rapport poids/portance inégalé, offrant des solutions pour la réalisation d'ouvrages sur des sols compressibles.

Ce béton mousse est un matériau fluide qui contient des particules d'air uniformément distribuées dans le mélange sous forme de mousse minérale isolante qui se compose de ciment portland, d'eau, d'additifs fluidifiants et d'un agent

moussant. Une composition qui en fait un matériau extrêmement léger et donc très facile à manipuler. La quantité de mousse sera ajustée en fonction du cas d'application et de la densité souhaitée (entre 200 et 500 kg m<sup>3</sup>).

### UN CONCEPT INNOVANT

La faible densité du béton mousse Aérolithys, 5 à 6 fois plus léger qu'un béton classique en fait un matériau idéal pour réduire les charges sur les sols compressibles de faible portance et les structures sous-jacentes. Il permet également de pallier les défaillances de comportement liées à une insuffisance de compactage et assure une portance suffisante tout en permettant une ré-excavation facile en cas de besoin. Par ailleurs, il conservera ses caractéristiques mécaniques et résistera aux cycles gel-dégel et sec-humide, garantissant une grande stabilité et évitant les tassements différés.

### UN IMPACT ENVIRONNEMENTAL POSITIF

Un isolant 100 % minéral pour un service zéro déchet de chantier grâce à l'unité mobile de production qui par ailleurs ne produit que peu de nuisances sonores, la mousse Aerolithys est un choix respectueux de l'environnement avec un bilan CO<sub>2</sub> très faible par rapport aux autres isolants. C'est également une solution sans stockage de matières premières, ni manutention sur place, limitant ainsi les coûts de transport pour un coût réduit. Par ailleurs, grâce à sa densité modulable, la solution permettra de réduire les charges sur la structure porteuse. Cette mousse minérale est un matériau durable, doté d'une durée de vie comparable à celle du béton traditionnel.



© Aerolithys

## La bio-cimentation, une alternative durable en renforcement de sol

Alors qu'on estime à 20 % la part des bâtiments existants en milieu urbain en densification qui nécessiteront un renforcement de leurs fondations pour les rehausser, les nouvelles solutions de bio-cimentation développées par Medusoil sont une alternative écologique intéressante par rapport aux méthodes de stabilisation des sols traditionnelles plus invasives et plus contraignantes, notamment au niveau de l'évacuation des déchets.

En fonction des besoins du projet de stabilisation des fondations et de la géologie locale, la start-up suisse Medusoil a mis au point une technologie du même nom qui va permettre de soutenir les structures de soutènement au sol tout en réduisant le risque de liquéfaction du sol, notamment dans les zones sismiques. Par ailleurs, traditionnellement, ces interventions nécessitent une machinerie lourde, engendrant déchets et salissures dont l'élimination peut représenter jusqu'à la moitié du budget total du projet. Peu invasive, résistante, naturelle, durable et rapide, cette solution possède plusieurs spécifications techniques intéressantes.

### UN LIANT INNOVANT

La solution Medusoil BS1 est un liant innovant et durable. Basé sur un processus de bio-minéralisation organique, il a été conçu pour soutenir des projets souhaitant viser le zéro net carbone. « Nous souhaitons offrir des solutions durables dans

les travaux spéciaux et de terrassement qui combinent efficacité économique, innovation technique et responsabilité environnementale », assure Sten Rettby, directeur commercial de Medusoil, présent sur le Salon Solscope pour présenter le produit. Une fois mélangé avec le sol, le produit va réagir en produisant des propriétés semblables à celles d'une pierre à partir de sable, et cela sans utiliser de ciment. L'application est rendue possible grâce à des forages peu invasifs et à de faibles pressions d'injection qui entraînent une réduction des coûts de main-d'œuvre et d'énergie. Doté d'un pH neutre et des certifications environnementales, il est possible d'utiliser ces produits même dans les zones écologiquement sensibles de protection de l'eau.

### UNE SOLUTION LIVRÉE « TOUT-EN-UN »

« Nos systèmes nous permettent de préparer des solutions de bio-cimentation riches en carbonates et sans azote, prêtes à être expédiées ou à utiliser immédiatement à l'aide d'un réacteur sur site », poursuit le responsable. Le système est compatible avec toutes les installations de pompage courantes et les alimente en continu jusqu'à ce que le niveau de bio-cimentation souhaité soit atteint, généralement en quelques jours. Le fluide à faible viscosité peut être injecté à très basse pression pour éviter les projections érosives, les soulèvements ou les tassements. Après

application, la solution précipite les liaisons minérales en quelques heures seulement, améliorant radicalement les propriétés du sol. Le processus peut fonctionner entièrement à l'électricité, réduisant ainsi l'utilisation de combustibles fossiles



© Medusoil

### UNE APPLICATION ZÉRO DÉCHET

Les technologies reproduisent et stimulent un mécanisme organique de cimentation déjà existant dans la nature comme la production de calcite. « En imitant ce processus naturel, les matériaux utilisés dans notre bio-ciment émettent beaucoup moins de CO2 par rapport au coulis de ciment, et le mélange réalisé sur site va permettre d'économiser presque toutes les émissions liées au transport », explique Sten Rettby. Grâce au recyclage de tous les sous-produits sous forme de liquides riches en ammoniac, il n'y aura, par ailleurs, plus aucun déchet à gérer après l'application.

## Sireg propose des pieux sécants avec armature en fibre de verre

Les pieux sécants sont des éléments en béton armé réalisés dans une séquence primaire et secondaire, afin de créer un rideau continu en pieux béton armé. Au préalable, des murettes guide en béton armé sont réalisées pour assurer la bonne implantation des pieux et guider l'outil lors de la réalisation des pieux primaires et secondaires.

Le forage des pieux est réalisé à l'aide d'une double tête permettant la rotation de l'outil de forage et l'approfondissement simultané d'un tubage. Le tubage est doté d'une couronne en acier spécial équipée de dents résistantes (widia) et permet de traverser des horizons indurés. Une fois le forage terminé, le curage du pieu est effectué et les cages d'armature en fibre de verre Durglass/Glasspree sont posées (éléments de 12-14 m raboutés sur chantier par serre-câbles à U).

La pose des cages est suivie du bétonnage, réalisé avec un tube plongeur adapté et toujours immergé dans le béton, en enlevant progressivement la virole de revêtement.

L'instrumentation donne à l'opérateur la possibilité de surveiller en permanence le bon déroulement du forage. Le système peut être connecté électroniquement à un enregistreur de

données qui fournit; entre autres, le nom du projet, le numéro de pieu, la date, le temps de réalisation, le diamètre du pieu et les paramètres de forage.

Après avoir réalisé une série de pieux primaires et, dans tous les cas, au moins 24 heures après leur bétonnage (nécessaire à la prise minimum du béton), les pieux « secondaires » sont réalisés. Le projet peut prescrire, selon les besoins statiques et hydrauliques, un recouvrement plus ou moins important entre les pieux. Les parois en pieux sécants peuvent être ancrées avec des ancrages en fibre de verre Durglass. Les avantages sont :

- les armatures en fibre de verre Durglass (pour applications temporaires) peuvent être facilement traversées par bennes, tunneliers pendant l'excavation de tunnels (tympans);
- les armatures Glasspree (pour applications permanentes) garantissent transparence électromagnétique et résistance à la corrosion chimique (ouvrages en bord de mer ou en mer);
- cette technique peut être utilisée dans tout type de terrain;
- déformations et tassements très contenus;
- capacité de supporter des charges très importantes.



© SIREG

## Lancement de la nouvelle formation d'aide-foreur en géothermie de surface

En septembre, l'École française de forage (EFF Training), en collaboration avec le Greta-CFA Midi-Pyrénées Ouest et le BRGM\*, a déployé sa nouvelle formation pour les acteurs de terrain de la filière géothermie. La formation pilote a débuté le 18 septembre à Nanterre, dans les Hauts-de-Seine.



Formation géothermie de surface - Session de Nanterre (septembre 2023).

Cette formation prépare au métier d'aide-foreur en géothermie de surface. Elle s'adresse notamment aux jeunes en insertion professionnelle et aux demandeurs d'emploi en reconversion. Ils y découvrent comment préparer la mise en œuvre des chantiers de forage sur sonde et sur nappe à usage de géothermie de surface; ils se familiarisent avec les obligations réglementaires, la sécurité au travail, les normes environnementales; ils peuvent, à l'issue de la formation, assurer des petites réparations et assister les foreurs dans leur travail.

Les 12 stagiaires bénéficient de 341 heures de formation, alternant 166 heures d'enseignement théorique et de mise en pratique sur chantier-école et 175 heures d'immersion professionnelle dans des entreprises qui recherchent des candidats à l'embauche en CDD ou CDI. Technique et certifiante, modulable, transversale, s'appuyant sur des supports formatifs diversifiés, cette formation est, en effet, conçue pour sécuriser le projet professionnel des stagiaires dans le cadre de leur insertion professionnelle en leur proposant des contacts directs avec des entreprises qui recrutent.

Cette offre de formation, unique sur le territoire, est conçue pour répondre aux défis de la transition énergétique et pallier le déficit de main-d'œuvre dont souffrent les professionnels du secteur. Les partenaires de la formation – EFF Training, Greta-CFA Midi-Pyrénées Ouest et BRGM – proposent, dès à présent, au travers d'une formation adaptée, d'accompagner les entreprises de forage à sourcer, recruter et former du personnel motivé pour renforcer la filière.

Rappelons qu'en France, la chaleur représente environ la moitié de la consommation finale énergétique et reste majoritairement produite par des énergies fossiles très émettrices de gaz à effet de serre (gaz naturel, fioul...). La réduction de l'énergie finale des bâtiments et le remplacement de la combustion des énergies fossiles, fortement émettrices de carbone, sont un enjeu

pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. C'est dans ce contexte que la ministre de la Transition énergétique, Agnès Pannier-Runacher, a annoncé le 2 février 2023, aux côtés de François Bayrou, Haut-Commissaire au Plan, le lancement du plan Géothermie. Ce dernier a pour ambition de relancer la filière en augmentant le nombre de projets de géothermie subventionnés, tout en doublant le nombre d'installations de pompes à chaleur géothermique chez les particuliers.

Renforcer la capacité de forage en géothermie de surface est une des actions privilégiées dans la feuille de route proposée par le Haut-Commissariat au Plan dont le premier volet est le développement de la formation de professionnels du secteur pour renforcer le socle de compétences et accroître le volume de l'offre. ■

\* Bureau de recherches géologiques et minières.

### À QUI S'ADRESSE CETTE FORMATION ?

Cette formation s'adresse aux salariés des entreprises de forage, aux intérimaires des secteurs industriels et BTP, aux demandeurs d'emploi en reconversion professionnelle, aux adultes en réinsertion professionnelle, aux étudiants ou adultes voulant découvrir un nouveau métier.

## Rencontre avec un stagiaire



Nous avons rencontré l'un des stagiaires, Thierno Diallo, âgé de 35 ans et d'origine guinéenne. Il nous explique pourquoi il a choisi cette formation et nous donne ses impressions après quelques semaines de formation.

« Je suis arrivé en France en août 2017, à l'âge de 29 ans et j'ai obtenu mon titre de séjour français en 2020. Lorsque je suis arrivé en région parisienne, j'ai été accompagnateur bénévole pour l'association Emmaüs à Créteil (Val-de-Marne); puis manœuvre dans le BTP à Créteil et de 2021 à 2023, j'ai été commis de cuisine, mais toujours avec le secret espoir de pouvoir travailler un jour dans le domaine du forage, car ce domaine ne m'est pas inconnu. En effet, chez moi en Guinée, j'ai effectué la



formation d'opérateur minier de Boké, et j'ai fait un stage pour la Compagnie bauxitique de Guinée (la CBG). Ce sont des expériences qui ont été très intéressantes et enrichissantes et je souhaitais en faire mon métier. Mais arrivé en France, je ne pensais pas pouvoir prétendre à intégrer une formation et/ou une entreprise de forage.

Il y a quelques mois, grâce à un conseiller d'insertion, j'ai appris qu'il existait une formation d'aide-foreur en géothermie de surface et j'ai tout fait pour pouvoir m'inscrire. L'expérience acquise en Guinée m'a également aidé à pouvoir obtenir cette formation. Les cours durent deux mois et demi, et ont débuté mi-septembre. Nous ne sommes pas nombreux en formation – 9 personnes, donc c'est l'idéal pour apprendre. Les cours se déroulent du lundi au vendredi, de 8 h à 17 h environ,

et sont découpés en 3 modules: situer la géothermie et caractériser le sous-sol pour une opération de forage en géothermie de surface; réaliser un puits de forage et assurer la sécurité du chantier, la maintenance préventive; et garantir la préservation de l'environnement.

Ce qui m'intéresse c'est la géologie des sols, le forage, d'acquérir les connaissances afin de pouvoir manœuvrer une foreuse. La formation est dispensée par des experts en géothermie, en forage et sondage de géothermie, et de la géotechnique, en maintenance des matériels, en sécurité chantier et environnement. C'est un enseignement théorique et pratique en chantier-école avec une immersion en entreprise sur 5 semaines. J'ai hâte!

Pour l'avenir, je souhaite vraiment travailler sur une plateforme de forage en France et à l'international. » ■

## MESURES PENDANT & APRES LE FORAGE

Pressiomètres, Enregistreurs de paramètres  
Matériels de diagraphies



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



Pressiomètres manuel et automatique



Televiseurs optique et acoustique - Diagraphies



[www.lim.eu](http://www.lim.eu)

# Prix Boussinesq du CFMS : Olatoundé Alexandre Yaba, lauréat 2023

Olatoundé Alexandre Yaba est le lauréat 2023 du prix Boussinesq, décerné par le Comité français de mécanique des sols (CFMS), pour ses travaux de thèse sur « l'Amélioration des plateformes ferroviaires par géogrilles : analyse du fonctionnement, de la limitation des déformations et du gain de portance ».



Olatoundé Alexandre Yaba a, en effet, reçu son prix remis par Nicolas Utter, président du CFMS (à droite de la photo), à l'issue d'une conférence qu'il a donnée lors d'une assemblée générale et journée scientifique à Paris en juin dernier.

Le prix Boussinesq vise à distinguer l'auteur de la thèse la plus remarquable, achevée dans une institution française, à chaque exercice biennal, sur l'un des sujets concernant le CFMS, à savoir la mécanique

des sols, la géotechnique et les techniques spécifiques concernant les travaux en interaction avec les terrains.

La thèse CIFRE (SNCF Réseau) de Monsieur Yaba a été préparée au laboratoire 3SR (sols, solides, structures et risques) dans l'école doctorale I-MEP2 de l'université Grenoble-Alpes, sous la direction de Fabrice Emeriault (3SR)<sup>(1)</sup>, le co-encadrement de Oriane Jenck (3SR)<sup>(2)</sup> et de Jean-François Ferrellec (SNCF Réseau)<sup>(3)</sup>. La thèse a été soutenue à Grenoble, devant un jury composé de Pierre Breul, Cyrille Chazalon, William Powrie, Gaël Combe, Pascal Villard et Fabrice Emeriault<sup>(4)</sup>.

## RÉSUMÉ DE LA THÈSE

À l'exception des lignes à grande vitesse, le réseau ferré national (RFN) français a été initialement construit du milieu du 19<sup>e</sup> jusqu'au début du 20<sup>e</sup> siècle. Pendant la majeure partie de l'existence du réseau, son entretien a été principalement axé sur le renouvellement de la voie (rails, traverses et ballast), laissant les plateformes (couche intermédiaire ou sous-couche avec couche de forme) se détériorer sur de nombreuses lignes. Face aux enjeux de maintenance de plus en plus exigeants, SNCF Réseau propose d'utiliser des géogrilles pour améliorer ses plateformes lors du renouvellement de ses lignes classiques (vitesse limite  $\leq 220$  km/h). Les géogrilles sont des géosynthétiques formés d'un réseau d'éléments de traction dotés d'ouvertures de taille suffisante pour permettre un enchevêtrement avec un matériau granulaire environnant (figure 1). L'insertion d'une géogrille dans une couche de sol granulaire pourrait contribuer à la réduction des tassements et à l'amélioration de la portance de cette couche. Ainsi, les géogrilles ont été utilisées pour répondre à des besoins urgents sur le RFN afin d'assurer que certaines plateformes aient une portance supérieure à un seuil critique défini par les référentiels SNCF. Cependant, les quelques sites concernés n'ont fait l'objet d'aucun suivi particulier ni d'aucune analyse de retour d'expérience exploitable.

À l'heure actuelle, les connaissances sur le comportement mécanique des géogrilles et leur contribution aux sous-couches ferroviaires sont limitées, notamment dans les

conditions d'exploitation (plus particulièrement celles du RFN). La plupart des études de cas existants proviennent de l'extérieur et se sont concentrées sur l'interaction des géogrilles avec le ballast. Les plus notables de ces études ont montré l'efficacité des géogrilles pour réduire l'étalement latéral et l'usure du ballast. Cependant, l'insertion de géogrilles dans la couche de ballast ou directement sous celle-ci n'est pas compatible avec les pratiques actuelles sur le RFN. Peu d'études incluent des sections de sous-couches stabilisées. Dans les deux cas, l'inclusion des géogrilles produit une amélioration mesurable. Malheureusement, en raison des différences de granulométrie et de résistance mécanique, les études disponibles au début du présent travail ne permettaient pas de tirer des conclusions satisfaisantes quant à la possibilité d'avoir des améliorations similaires pour les matériaux de sous-couche utilisés par SNCF Réseau. Une analyse bibliographique concernant les essais en laboratoire des géogrilles a conduit à une conclusion similaire : hormis le consensus selon lequel (dans les bonnes conditions) les géogrilles améliorent les performances, il n'existe pas de règle empirique lorsqu'il s'agit d'évaluer leur efficacité dans les applications ferroviaires. Plusieurs facteurs affectent le résultat, notamment la raideur du sol-support, la granulométrie du matériau granulaire (ballast ou sous-couche), la position de la géogrille dans la structure, la raideur de la géogrille, le rapport entre la taille de l'ouverture de la géogrille et la taille nominale des grains, etc. Ainsi, il est nécessaire d'effectuer des tests pour quantifier ces améliorations au cas par cas.

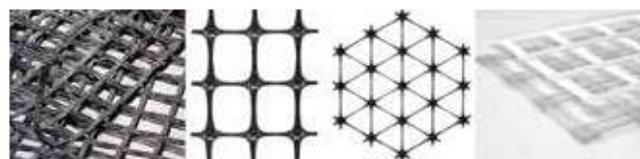


Fig. 1 - Exemples de différents types de géogrilles.

Par conséquent, les verrous scientifiques levés au cours de cette thèse sont la mesure et la compréhension des mécanismes mobilisés dans les sous-couches stabilisées par géogrille sur le RFN. Ces connaissances seront nécessaires à l'élaboration de référentiels pour l'utilisation des géogrilles sur le RFN. Ainsi, les objectifs de cette thèse ont été fixés selon 3 axes :

### 1. objectifs scientifiques :

- comprendre les phénomènes d'interaction entre les composantes des couches d'assise et les géogrilles ;
- collecter suffisamment de données expérimentales pour proposer des stratégies de modélisation numérique ;

### 2. objectifs techniques :

- définir le domaine d'application des géogrilles dans les structures des voies ferrées du RFN.
- quantifier les apports des géogrilles, en termes d'augmentation de portance et de réduction de tassements différentiels ;

### 3. objectifs opérationnels :

- proposer des configurations qui sont rapides et faciles à mettre en œuvre ;
- s'assurer que les configurations proposées soient économiques et durables.

Pour atteindre ces objectifs, le travail a été divisé en deux composantes complémentaires :

- des essais *in situ* qui ont consisté à instrumenter et suivre (en conditions opérationnelles) des sous-couches stabilisées par géogrilles,
- la conception et la mise en œuvre d'essais en laboratoire pour mesurer les performances des géogrilles dans des conditions contrôlées.

Deux sites ont été instrumentés pour les essais *in situ*. Ils comprennent chacun des mesures des déformations transversales des brins des géogrilles, des contraintes induites par le trafic dans la sous-couche et le sol support, et de la température à l'interface sol-géogrille (figure 2). Un des sites comprend des capteurs pour mesurer les charges aux essieux des trains et l'instrumentation installée sur ce site est capable d'enregistrer à haute fréquence (2 000 Hz). Dans l'ensemble, l'installation des deux sites a été un succès. Une analyse préliminaire des mesures confirme que l'instrumentation est toujours entièrement opérationnelle après deux années de service. Ceci est encourageant, car le système a été conçu pour 10 ans de service. Un script de prétraitement a été développé pour automatiser les étapes initiales de l'analyse des données. Ce script gère les conversions de format, l'étiquetage des données, le filtrage des signaux et la synchronisation. La précision et la fiabilité de l'ensemble des données sont ainsi assurées. Les données prétraitées peuvent ensuite être visualisées et analysées à l'aide de diverses méthodes statistiques. L'analyse a révélé que les géogrilles instrumentées sont effectivement mobilisées lors du passage des trains. À cette étape, la raideur des géogrilles semble être le facteur déterminant de leur performance. Les mesures suggèrent également que la plupart des géogrilles réduisent la variabilité des déflexions des traverses. En somme, le système se comporte comme prévu, malgré quelques valeurs aberrantes. La majorité de ces aberrations peuvent être attribuées aux aléas du travail *in situ*. Les paramètres non contrôlés incluent les variations de portance du sol-support, l'hétérogénéité du matériau de sous-couche, les défauts localisés et les effets dynamiques induits par les trains.

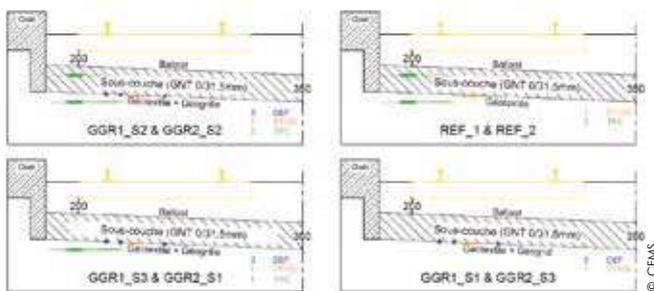


Fig. 2 - Coupes transversales des voies instrumentées.

En ce qui concerne les expérimentations au laboratoire, un dispositif expérimental a été développé pour tester les géogrilles destinées à être utilisées sur le RFN. Ce dispositif et le protocole expérimental qui l'accompagne ont été conçus pour reproduire (autant que possible) les conditions *in situ*, en utilisant une sous-couche et des géosynthétiques réels, sur un sol-support analogue (cf. figure 3). Les essais ont consisté à l'application de 250 kcycles de chargement (entre 15 et 85 kPa) sur un modèle de structure d'assise ; tout en mesurant les déformations de la géogrille, le tassement de la sous-couche et du sol-support,

et les contraintes dans le sol-support. Le dispositif et le protocole ont été validés en effectuant plusieurs essais avec et sans géogrilles. En l'état, les résultats des essais pourraient contribuer au processus d'agrément de géogrilles pour usage sur le RFN. Les premiers résultats confirment que l'insertion de géogrilles permet de réduire le tassement (cf. figure 4). Cette confirmation est la première étape vers la quantification de la performance des géogrilles sur le RFN. De même, les observations suggèrent que les géogrilles augmentent la raideur de la sous-couche en confinant les agrégats. Ces améliorations apparaissent lorsque la tension s'accumule dans les brins des géogrilles après plusieurs centaines de cycles de chargement. Cependant, certains facteurs-clés restent à déterminer, notamment la quantification de la répartition des contraintes dans le sol-support. Une interprétation plus poussée des données existantes permettra d'élucider certains points d'ombre, mais il est également nécessaire d'améliorer le dispositif expérimental et de réaliser davantage d'essais.

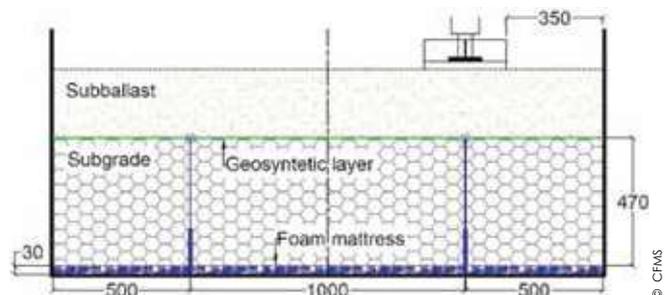


Fig. 3 - Coupe transversale de l'expérimentation sur modèle physique, avec une plaque de chargement au-dessus.

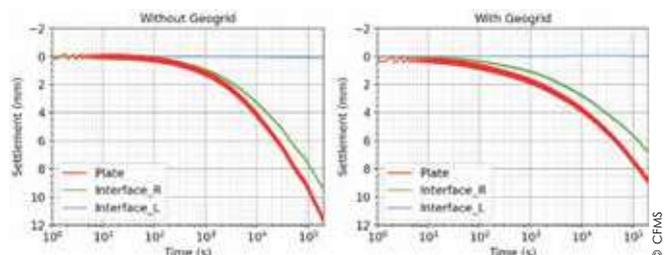


Fig. 4 - Tassement sans géogrille (à gauche) et avec géogrille (à droite).

Dans l'ensemble, les résultats obtenus ont renforcé la confiance de SNCF Réseau dans l'utilité des géogrilles sur le RFN, facilitant ainsi leur utilisation plus systématique lors des opérations de renouvellement. Ainsi, on peut conclure que les objectifs initiaux ont été largement atteints, même si de nombreuses améliorations peuvent être apportées aux outils et procédures développés au cours de cette thèse. C'est pour cette raison que SNCF Réseau et le laboratoire 3SR se sont engagés à poursuivre l'étude. Ainsi, il est prévu de développer les axes qui n'ont pas pu être mis en œuvre au cours des trois dernières années, notamment :

- un déploiement massif de mesures de déflexion sur des zones améliorées par géogrilles, en partenariat avec le groupe de recherche infrastructures de l'université de Southampton ;
- l'instrumentation d'un autre site sur plusieurs centaines de mètres pour permettre des mesures sur plus de géogrilles ;
- la mesure du tassement *in situ* à l'aide de capteurs de tassement hydraulique développés à l'INSA de Lyon (Khoueiry, 2020) ;
- la mesure localisée de la raideur d'une sous-couche, améliorée à l'aide du système de Bender Eléments développés à l'université de l'Illinois Urbana-Champaign (Byun *et al.*, 2019 ; Byun et Tutumluer, 2018).

La SNCF espère également comprendre le comportement à long terme des matériaux polymères qui constituent les géogrilles (polypropylène, polyester, etc.). Notamment le comportement au fluage, l'influence des variations de température sur les performances et la recyclabilité en fin de vie. Cette compréhension permettra de réaliser une analyse complète (coûts financiers et environnementaux) du cycle de vie des géogrilles sur le RFN.

## RENCONTRE AVEC OLATOUNDÉ ALEXANDRE YABA

### Pouvez-vous vous présenter Olatoundé Alexandre Yaba ? (âge, parcours, études, etc.)

**Olatoundé Alexandre Yaba :** J'ai 30 ans et je suis originaire du Bénin. J'ai fait les classes préparatoires et l'école d'ingénieurs au Bénin où j'ai eu mon diplôme d'ingénieur en génie civil et hydraulique. Après l'obtention de mon diplôme d'ingénieur, j'ai travaillé dans un bureau d'études, puis j'ai décidé de me spécialiser en géotechnique. J'ai donc déposé ma candidature pour un master à l'École nationale supérieure de l'énergie, l'eau et l'environnement (ENSE3) à Grenoble et j'ai été admis. C'est durant mon cursus à l'ENSE3 que j'ai connu le professeur Fabrice Emeriault et le Docteur Orianne Jenck, avec lesquels j'ai fait différents projets de recherche durant mon master. J'ai eu la chance ensuite de les avoir également comme encadrants de thèse.

### Vous avez reçu récemment le prix Boussinesq. Qu'est-ce que cette « distinction » représente pour vous ?

**O. A. Y. :** Je suis honoré d'avoir reçu le prix Boussinesq. C'est une reconnaissance de mon travail sur l'amélioration des plateformes ferroviaires par géogrilles. Je suis convaincu que ce travail a le potentiel d'avoir un impact significatif sur l'avenir de la régénération des plateformes ferroviaires (ou structures d'assises) à la SNCF, en rendant les travaux moins coûteux et plus écologiques. Je tiens donc à remercier le CFMS et le comité du prix Boussinesq pour cette distinction, qui donne de la visibilité à mon travail. Je suis également reconnaissant envers mes encadrants de thèse et les nombreux collègues qui ont contribué à mon travail.

### Le sujet de votre thèse était : « L'amélioration des plateformes ferroviaires par géogrilles : analyse du fonctionnement, de la limitation des déformations et du gain de portance ». Pourquoi avoir travaillé sur ce thème ?

**O. A. Y. :** Le sujet a été proposé par l'ancienne équipe « Coordination, Innovation et Recherche » de la DGII - GC VA\* de SNCF Réseau. Ils ont constaté qu'il y avait un besoin croissant de régénération des structures d'assises, mais que les méthodes traditionnelles ne permettaient pas de faire les travaux nécessaires en respectant les budgets disponibles, sans des fermetures prolongées des lignes concernées. Il fallait donc trouver un moyen de réaliser les travaux plus rapidement et avec un budget limité.



Présentation devant l'assemblée du CFMS à Paris, le 1<sup>er</sup> juin 2023.

L'utilisation de géogrilles a été proposée pour améliorer les caractéristiques mécaniques des structures d'assises ; permettant ainsi de réduire leur épaisseur et, par conséquent, réduire le coût et la durée de travaux. Par contre, les connaissances sur le comportement mécanique des géogrilles et leur apport sous conditions opérationnelles dans le domaine ferroviaire étaient limitées, surtout dans le contexte du Réseau ferré national français. Alors, la SNCF a décidé de lancer un projet de recherche sur les géogrilles. Le projet a été proposé à Fabrice Emeriault et Orianne Jenck par Jean-François Ferrellec (de SNCF Réseau), qui me l'ont proposé. Le sujet m'a tout de suite très intéressé, car il s'agissait d'un sujet de recherche appliquée avec des enjeux opérationnels. Nous avons donc décidé de monter un dossier pour en faire une thèse CIFRE.

Aujourd'hui, l'équipe « Coordination, Innovation et Recherche » n'existe plus, mais ses projets de recherche ont été intégrés dans les équipes d'ingénierie

concernées par chaque sujet. Le projet « Géogrilles » est désormais piloté par l'équipe « Patrimoine géotechnique de risques naturels » de la DGII - GC VA\*, dont je fais aujourd'hui partie. Nous affectons beaucoup de ressources à ce projet parce que les résultats de ma thèse ont montré que l'utilisation des géogrilles peut rendre les plateformes ferroviaires plus durables, plus performantes et plus économiques.

### Pendant combien de temps avez-vous présenté votre thèse ?

**O. A. Y. :** La soutenance de thèse a consisté en 45 min de présentation et environ 1 h 30 de questions-réponses avec le jury de thèse. La présentation devant le jury du prix Boussinesq a duré 20 min et a été suivie par 10 min de questions-réponses. Enfin, la présentation à l'AG du CFMS a duré 45 min.

### Avez-vous rencontré des difficultés lors de votre parcours ?

**O. A. Y. :** Oui. Outre les difficultés habituellement rencontrées durant un doctorat, j'ai dû faire face à deux événements majeurs : le premier était un incendie criminel, qui a détruit le bâtiment où mes expérimentations étaient hébergées ; le second était la crise sanitaire et les confinements successifs qui ont suivi. Ces deux imprévus nous ont obligés à réduire l'ampleur du projet initial et à nous réorganiser pour pouvoir produire des connaissances exploitables, sans trop prolonger le contrat CIFRE.

### Quelle est la suite maintenant ? Qu'allez-vous faire ?

**O. A. Y. :** Je continue le travail sur ce sujet au sein de la SNCF pour combler les lacunes et explorer les perspectives identifiées à la fin de ma thèse. L'équipe dont je fais partie accompagne également les entités régionales pour encadrer la mise en œuvre et le suivi de structures d'assises améliorées par géosynthétiques. À terme, on se chargera de réécrire les référentiels SNCF pour mieux intégrer l'utilisation de ces matériaux innovants dans nos pratiques. ■

\*Direction générale Industrielle et ingénierie – Département génie civil, voies et abords

1. Fabrice Emeriault, professeur des universités, Institut national polytechnique de Grenoble

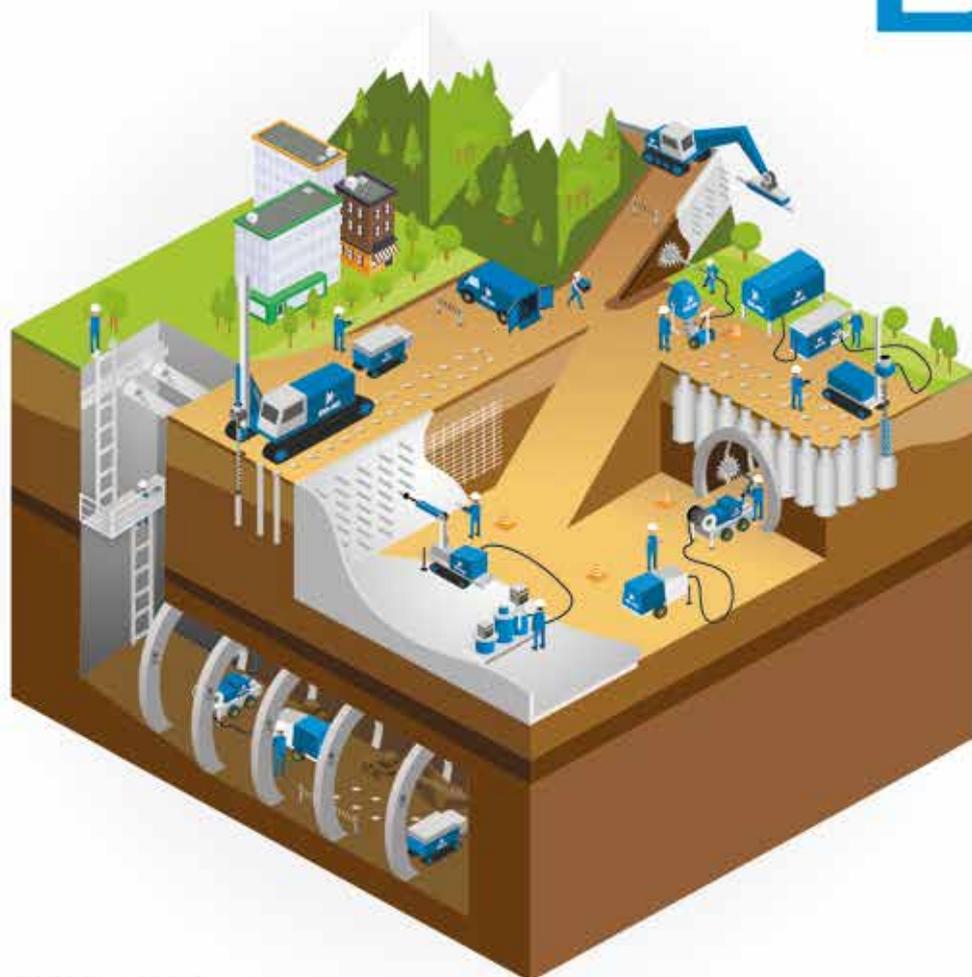
2. Orianne Jenck, enseignante-chercheuse, université Grenoble-Alpes

3. Jean-François Ferrellec, ingénieur ferroviaire, SNCF Réseau

4. Pascal Villard, professeur des universités, université Grenoble-Alpes, président du jury ; Pierre Breul, professeur des universités, université Clermont-Auvergne, rapporteur ; Cyrille Chazalon, professeur des universités, INSA de Strasbourg, rapporteur ; Gaël Combe, professeur des universités, Grenoble INP, examinateur ; William Powrie, professeur, university of Southampton, examinateur ; et Fabrice Emeriault, professeur des universités, Grenoble INP, directeur de thèse.

Propos recueillis par Aude Moutarlier

OFFRE COMPLÈTE D'ÉQUIPEMENTS  
POUR FONDATIONS SPÉCIALES ET  
TRAVAUX SOUTERRAINS



NOS EXPERTISES



LOCATION, MAINTENANCE,  
VENTE D'ÉQUIPEMENTS

Lyon : 04 37 44 15 15  
Paris : 01 34 34 50 50  
Toulouse : 05 54 72 03 10

STRUCTURES  
MÉCANOSOUDEES

03 87 30 16 75

CENTRE DE FORMATION

06 29 54 59 05

## NF P94-001 : Syntec Ingénierie et USG publient un nouveau document



Syntec Ingénierie et USG viennent de publier en septembre 2023 un nouveau document concernant la norme NF P 94 001, et intitulé : « *Amiante environnemental dans les sols et roches en place — Comment appliquer la norme NF P94-001* » ?

Ce guide très complet a été rédigé par des représentants de la profession, tels que Luis Carpinteiro (Ginger CEBTP), Olivier Jonquois (Ginger CEBTP), Alexane Gonthier (Hydrogéotechnique), François Martin (BG Ingénieurs-Conseils), Sébastien Gori (Abo ERG) et Olivier Barnoud (Géotec), et a été relu par le Cerema.

Tout comme l'ancienne version de mars 2023, ce nouveau guide aborde, sous forme de 21 questions-réponses, l'ensemble des sujets auxquels les donneurs d'ordre (maîtres d'ouvrage, exploitants, propriétaires fonciers...) sont confrontés afin d'évaluer correctement le risque d'exposition à l'amiante environnemental dans leurs opérations.

### PRÉAMBULE DE L'OUVRAGE

La présence naturelle d'amiante (amiante environnemental) dans certains sols ou certaines roches induit un risque, aujourd'hui bien identifié, pour les activités appliquées à ces contextes et pour les travailleurs impliqués. L'amiante environnemental est donc une question de santé publique, de santé au travail, ainsi qu'un enjeu économique et un défi technologique, qui doivent être appréhendés et traités de manière spécifique, en cohérence avec les pratiques développées dans les autres domaines d'activité.

Le principe, appliqué dans les autres domaines d'activité, selon lequel la démarche visant à limiter les risques liés à la présence d'amiante repose en grande partie sur la qualité du repérage avant travaux, est également pertinent quand il s'agit d'amiante environnemental. La finalité du repérage avant travaux (RAT par la suite) reste la même, mais le contexte étant différent, les méthodes et les moyens du repérage doivent être adaptés, notamment en raison de la présence potentielle d'amiante environnemental dans les sols et les roches en place (les massifs rocheux, les sols naturels, les alluvions...). La réglementation française protège les travailleurs, les populations et l'environnement contre les dangers liés à l'amiante qui est un produit cancérigène, mutagène et toxique. C'est donc l'objet de la norme NF P94001 de novembre 2021 : « *Repérage amiante environnemental – Étude géologique des sols et des roches en place – Mission et méthodologie* ».

Celle-ci constitue la règle de l'art en matière de méthodologie de repérage et doit donc être prise en considération à ce titre par les différents acteurs. Ainsi, au titre de leur évaluation des risques, il est recommandé aux donneurs d'ordre de la référencer dans le cadre de leurs marchés et commandes relatifs aux travaux pouvant être concernés.



Ce risque ne peut plus être ignoré notamment dans les études et investigations géotechniques, compte tenu de l'existence de cette norme, aussi bien par le géotechnicien que par tous les autres acteurs. Le présent guide, présenté sous forme de questions/réponses, permet de comprendre les obligations du donneur d'ordre, les principes et les modalités du repérage amiante, afin de mieux garantir dès à présent la santé des salariés vis-à-vis du risque amiante. Il permet de déterminer la conduite à tenir dans l'attente de publication des arrêtés. ■

**Luis Carpinteiro**  
Ginger CEBTP

# SMART DRIVE HEAD WITH INTERCHANGEABLE JOINT



**CIANCALEONI®**

DRILLING AND FOUNDATION EQUIPMENT

# Nouvelle version du guide « Les pieux forés – Recueil des règles de l'art »

L'ouvrage intitulé « Les pieux forés – Recueil de règles de l'art », publié en 1978, réalisé et diffusé par le LCPC\* et le Setra\*\*, dépendant du ministère des Transports (Direction générale des transports intérieurs – Direction des routes et de la circulation routière), présente l'état des connaissances concernant les pieux forés.



Cet ouvrage détaille tous les aspects liés à l'exécution des pieux, à leur contrôle, et illustre également des cas de pathologies afin d'en tirer les enseignements pour en éviter de nouvelles. Il est particulièrement utile pour les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre, les bureaux d'ingénierie géotechnique et les entreprises. Depuis la publication de cet ouvrage en 1978, des avancées significatives ont été faites aussi bien dans la connaissance du comporte-

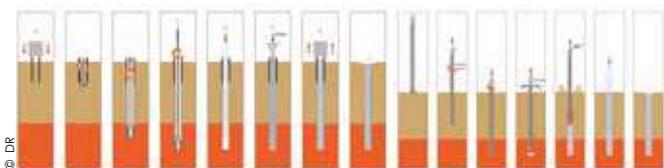
ment des fondations profondes que dans leur exécution avec des matériels utilisant des procédés innovants.

Les référentiels techniques concernant les fondations profondes ont également évolué; DTU 13.2, Fascicule 68 du CCTG, norme d'exécution européenne NF EN 1536 ainsi que les codes de dimensionnement (Eurocode 7 et les normes d'application nationales). La mise à jour de l'ouvrage « Les pieux forés – Recueil des règles de l'art » s'imposait donc.

Cette mise à jour a été pilotée par le Cerema\*\*\*, et de nombreux acteurs à l'acte de construire ont été consultés (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'ingénierie géotechnique, entreprises spécialisées, bureaux de contrôle).

La structure du nouvel ouvrage, qui sortira sous l'appellation: « Guide pieux forés pour les ouvrages d'art et le bâtiment – Guide de réalisation », est similaire à celle du guide de 1978, mais avec une approche plus pédagogique et accessible, quels que soient les prérequis du lecteur. Il se présente sous forme de plusieurs fascicules.

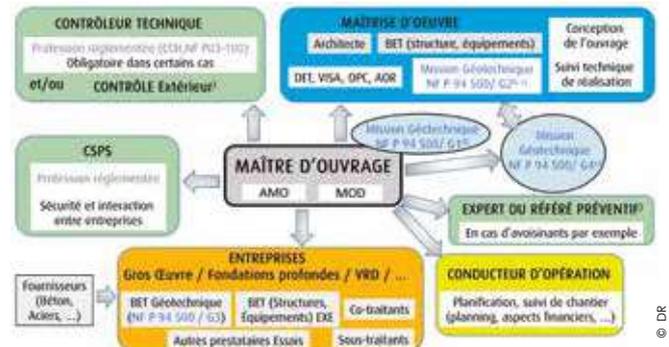
**Fascicule 1 :** fascicule général et introductif qui présente les différents phasages de réalisation des pieux forés et des critères de choix des techniques. Ce dernier volet est une réelle nouveauté.



Exemples de phasages pour la réalisation des pieux forés.

**Fascicule 2 :** ce fascicule traite de la préparation du marché de travaux et du déroulement du chantier sur le plan technique et administratif.

Les points nouveaux concernent, entre autres, la sécurité et le respect de l'environnement.



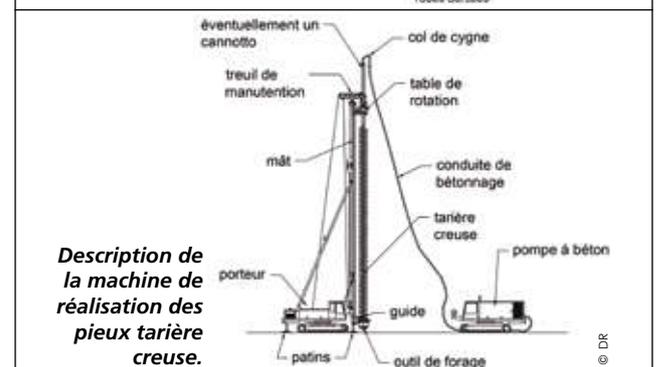
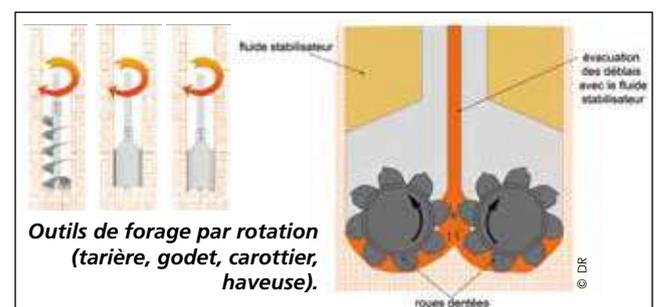
Les différents intervenants d'un marché de pieux forés dans le cas général.

**Fascicule 3 :** ce fascicule aborde l'exécution du forage et la tenue des parois de forage à l'aide de fluides stabilisateurs ou de tubes.

La partie concernant les fluides stabilisateurs a été fortement étoffée, y compris l'usage des fluides à base de polymères.

La technique de la tarière creuse simple et double rotation, à peine citée dans la version de 1978, mais aujourd'hui fort utilisée, est détaillée dans ce fascicule.

À titre indicatif, des tableaux synthétiques présentent en fonction de la nature des terrains, l'adéquation des outils de forage, des dents et molettes, et des méthodes pour assurer la tenue des parois. On y aborde aussi les contrôles réalisés au démarrage du chantier et lors de l'exécution. Ce fascicule se termine avec quelques exemples de choix de techniques de réalisation de pieux, argumentés dans des configurations simplifiées.

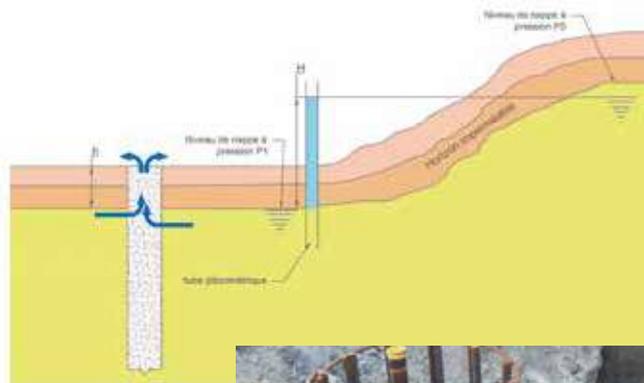


Description de la machine de réalisation des pieux tarière creuse.

**Fascicule 4 :** ce fascicule est destiné à présenter les opérations préalables au bétonnage et à sa réalisation qui sont des étapes essentielles pour garantir l'intégrité des pieux.

Cette nouvelle édition est, entre autres, plus détaillée sur les conditions de bétonnage lorsqu'un fluide stabilisateur est utilisé.

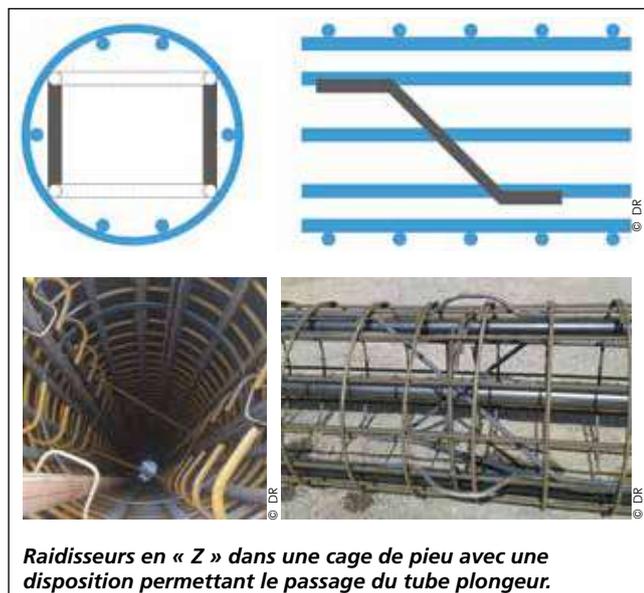
Elle présente également les points sensibles de cette étape de réalisation, comme par exemple, le curage, les surconsommations de béton et les précautions à respecter pour réaliser le recépage.



**Circulation parasitaire dans le béton encore frais due à un phénomène d'artésianisme.**

**Fascicule 5 :** ce fascicule est tourné vers les armatures des pieux et la mise en œuvre des cages d'armature ou de profilés, en abordant aussi les aspects de transport, manutention et stockage.

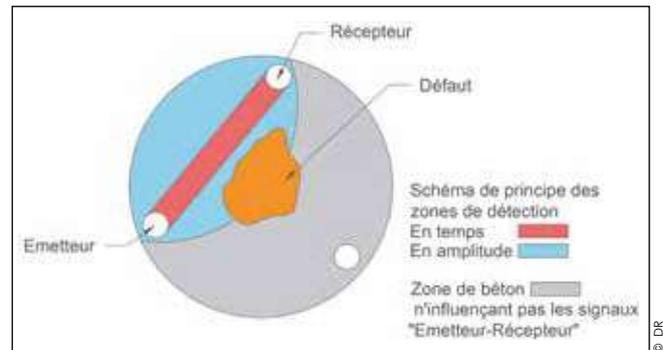
Des informations sont fournies pour l'utilisation d'armatures en fibre de verre.



**Raidisseurs en « Z » dans une cage de pieu avec une disposition permettant le passage du tube plongeur.**

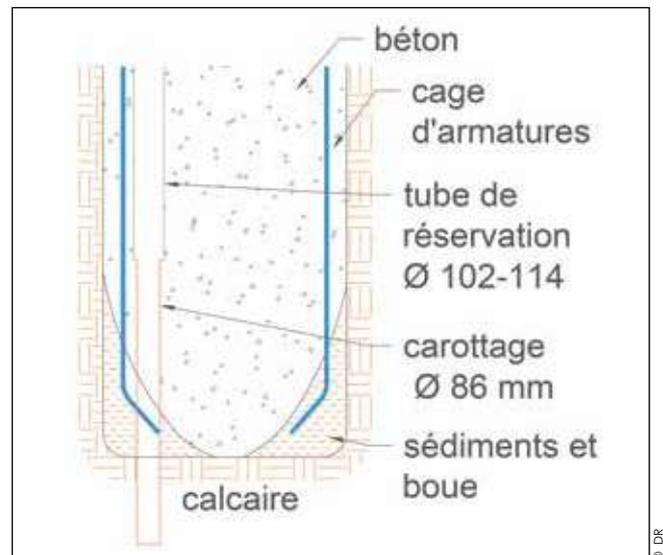
**Fascicule 6 :** le choix et l'opportunité des contrôles des pieux finis et le détail des méthodes non destructives (sonique par transparence, réflexion et impédance, gammamétriques et sismique parallèle), des méthodes destructives (sondages carotés pouvant être accompagnés d'inspection caméra...) et des essais de chargement sont détaillés dans ce fascicule.

La nouvelle édition est plus explicite sur le principe et la description de l'ensemble des techniques de contrôle et spécialement sur les informations pouvant être obtenues.



**Propagation de l'onde sonore dans la section d'un pieu : informations fournies par le temps et par l'amplitude.**

**Fascicule 7 :** ce dernier fascicule aborde quelques défauts pouvant affecter les pieux avec leurs causes potentielles, leur nature, leur gravité, ainsi que l'opportunité des réparations.



**Coupe schématique de la base d'un pieu (réalisation d'un carottage pour observer le contact pointe/sol).**

La nouveauté est soulignée par l'illustration de solutions de réparation des pieux forés. 7 fiches synthétiques illustrent des cas de défauts, de contrôle et de réparation. ■

**Sabrina Perlo**  
Cerema

**Luis Carpinteiro**  
Ginger CEBTP

\*LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées

\*\*Setra : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (anciennement Service d'études technique, des routes et autoroutes)

\*\*\* Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, la mobilité et l'aménagement. Établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.



© Soletanche Bachy

## Dossier spécial

# La donnée à l'ère du numérique ?

Depuis quelques années, le métier de la géotechnique, qui était encore en phase d'attente, prend le virage du numérique. C'est une évolution majeure qui est en marche !

En effet, de nombreux travaux se développent à travers le monde concernant la numérisation de notre métier et pour commencer, par celle des données géotechniques.

En France, nous pouvons ainsi citer les travaux du projet national MINnD en parallèle à de nombreuses initiatives de sociétés privées.

Un des défis de cette numérisation est de définir un format unique et interopérable pour les données géotechniques qui sont tellement nombreuses et de natures différentes :

- données géométriques,
- natures géologiques,
- caractéristiques physico-chimiques,
- caractéristiques mécaniques.

Le tout en prenant en compte les incertitudes qui caractérisent le sol. La

profession a pris le sujet au sérieux en participant activement à ces travaux.

Aujourd'hui, de nombreux outils permettent de numériser ces données : acquisition sur le terrain et en laboratoire, dépouillement, stockage dans des formats interopérables, établissement de modèles géologiques et géotechniques, éditions de logs et de rapports factuels.

Les données ainsi traitées peuvent aider à établir des modèles géologiques et géotechniques et de calculs qui, après validation, sont injectés dans les logiciels utilisés pour le dimensionnement des ouvrages géotechniques.

Par ailleurs, l'augmentation de la puissance de calcul permet de réaliser de nombreux modèles de calculs et d'effectuer des centaines de calculs dans le cadre d'une approche probabiliste du dimensionnement des ouvrages et non seulement par modèles déterministes.

La numérisation des données et des calculs permettra des transmissions plus fluides des résultats dans les bases

clients et les maquettes numériques des projets.

Au niveau national, un projet de base de données géotechniques est en cours d'élaboration. Le périmètre de cette base de données n'est pas encore figé et de nombreuses questions se posent sur les responsabilités des différents intervenants ainsi que sur l'accès aux données.

Notre métier est en pleine évolution et il est difficile à ce jour d'envisager ce qu'il sera dans les années à venir. Les futurs ingénieurs exerceront leur métier différemment et on commence seulement à entrevoir quelques impacts de ce changement. Nous devons accompagner cette évolution ainsi que celle de la valeur ajoutée du métier d'ingénieur, lequel devra toujours garder son esprit critique. ■

**Aline Quenez**

Réfèrent GC géotechniques  
Société du Grand Paris

**Michel Khatib**

Gingier CEBTP



**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.

**TOUR CAFÉ-CACAO À ABIDJAN (CÔTE D'IVOIRE)**

**spie batignolles**

**/ fondations**

## Le BRGM au service des géotechniciens

Établissement public de référence dans le domaine des sciences de la Terre, le BRGM est aussi un acteur engagé dans les services numériques, ouvert sur des thématiques allant de la gestion des risques naturels aux ressources et usages du sous-sol (ressources minérales, eau, géothermie, etc.). La géotechnique et ses applications ont bien sûr leur place dans ces activités, la détermination des propriétés mécaniques du sous-sol étant une étape essentielle à tout projet d'aménagement ou d'infrastructure, ainsi qu'à l'évaluation des aléas et risques liés au sous-sol.

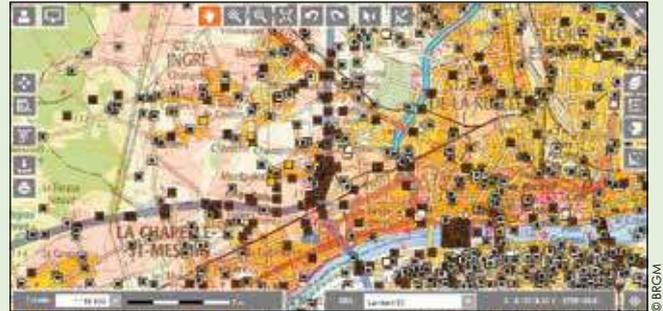
Dans le cadre de ses missions, le BRGM développe et met à disposition du public les outils numériques et données nécessaires à la gestion du sous-sol, notamment au travers des sites InfoTerre et Géorisques\*, en partenariat avec le ministère de la Transition écologique, tous les deux bien connus des géotechniciens.

Les données géotechniques, bien que collectées depuis des décennies dans le cadre de campagnes de reconnaissances pour des aménageurs publics ou privés, sont jusqu'à présent peu réutilisées et rarement partagées en dehors du projet pour lequel elles ont été acquises. La bancarisation et le partage de ces données sont aujourd'hui au cœur d'un projet de système d'information géotechnique, nouvelle brique du système d'information du BRGM. Les enjeux de ce projet sont multiples : scientifiques, économiques, écologiques et même pédagogiques. Des verrous technologiques, juridiques ou culturels existent également et devront être levés pour concrétiser ce projet. Après un premier travail collaboratif visant à caractériser et standardiser la description des données géotechniques, une enquête a récemment été lancée par le BRGM auprès de la communauté géotechnique française pour obtenir un état des lieux des pratiques actuelles en matière de gestion des données géotechniques et recueillir les attentes, besoins et suggestions des professionnels.

### LE BRGM ET LES DONNÉES GÉOSCIENTIFIQUES

La politique de gestion des données et de développement de services numériques du BRGM s'appuie sur les principes fondamentaux de science ouverte et d'inter-opérabilité. La science ouverte consiste à rendre la recherche scientifique et les données qu'elle produit accessibles à tous. Elle vise également à faciliter le partage et l'échange de données à l'aide d'outils collaboratifs. L'inter-opérabilité est une notion complémentaire : c'est la capacité que possède un système à fonctionner avec d'autres produits ou systèmes informatiques. Elle nécessite l'existence de données structurées et de formats d'échanges reconnus et validés par les fournisseurs et éditeurs d'outils informatiques. L'application des deux règles de science ouverte et d'inter-opérabilité conduit aux principes FAIR : Facile à trouver, Accessible, Interopérable, Réutilisable (en anglais : *Findable, Accessible, Interoperable, Re-usable*).

Aujourd'hui le site InfoTerre, portail d'accès aux données géoscientifiques, permet la mise à disposition libre et gratuite des cartes géologiques de la France et leur notice, la consultation et le téléchargement de rapports scientifiques publics, de coupes lithologiques et stratigraphiques de forages (BSS : banque du sous-sol), de données sur la qualité des eaux souterraines (BSS eau et base de données ADES), la localisation et les caractéristiques d'anciens sites industriels (base de données BASIAS), la cartographie et données sur les aléas « cavités souterraines », « mouvements de terrain », « remontées de nappes » et « sismicité ».



La banque du sous-sol (BSS), InfoTerre.

L'alimentation de ces bases de données est à l'heure actuelle principalement effectuée par le BRGM, à partir de données collectées dans le cadre de la surveillance de sites, d'acquisitions nouvelles, ou encore de missions d'expertises. Dans le cas de la BSS, les applications en ligne Duplos et Dialog, permettent respectivement la déclaration des forages souterrains de plus de 10 m, conformément à l'article L411-1 du Code minier, et la saisie de la description géologique du forage concerné, par le « foreur » c'est-à-dire l'entreprise ayant réalisé le forage ou son mandataire.

Dans le but de faciliter la saisie des données et surtout d'harmoniser les vocabulaires, le BRGM a également établi et mis en ligne des registres, faisant office de référentiel sémantique (<https://data.geoscience.fr/ncl/>). Les registres publiés portent sur de multiples sciences de la terre, parmi lesquelles on retrouve lithologie, chronostratigraphie, fossiles, minéraux, ou encore méthodes, propriétés observées et unités de mesure, dans lesquels on retrouve de nombreuses entrées liées à la géotechnique (essais *in situ*, essais en laboratoire, propriétés géomécaniques et unités associées).



Interface de consultation du Registre des vocabulaires et données liées pour les géosciences ([data.geoscience.fr/ncl/](https://data.geoscience.fr/ncl/)).

### VERS LA GESTION DES DONNÉES GÉOTECHNIQUES

Les enjeux de la création d'une plateforme de dépôt et diffusion de données géotechniques sont multiples. Ils sont tout d'abord économiques puisque la connaissance de données

existantes au droit ou à proximité d'un futur projet permettrait une optimisation certaine dans le programme d'investissements, en ciblant mieux les problématiques. Des pays voisins, comme le Royaume-Uni, en ont pris conscience : le BGS (British Geological Survey, équivalent britannique du BRGM) a en effet évalué entre 150 et 200 M€/an la perte pour la société, de données géotechniques non partagées. D'autres enjeux sont à souligner : le gain de temps dans les projets, notamment pour les études amont qui pourraient être étayées par les données géotechniques existantes, la diminution de l'empreinte carbone des investigations et des aménagements à construire, grâce à une meilleure connaissance du sous-sol, l'aide à la décision, la « démocratisation » du sous-sol pour les citoyens, ou encore des ressources pour la recherche scientifique ou l'enseignement.

Le Code minier qui régit le droit du sous-sol en France, révisé en 2021, impose la déclaration de tous les ouvrages souterrains de plus de 10 m de profondeur (article L411-1), que ce soient des ouvrages à but géotechnique, géologique, géothermique ou hydrogéologique. Il précise également que le BRGM est habilité par les services de l'État (article L. 412-1), à se faire remettre tous échantillons et se faire communiquer tous les documents et renseignements d'ordre géologique, géotechnique, hydrologique, hydrographique, topographique, chimique ou minier recueillis à l'occasion de sondages, ouvrages souterrains ou travaux de fouilles. Dans le cas de données sensibles, un délai de confidentialité allant jusqu'à 10 ans peut être demandé (article L413-1) avant mise à disposition du public.

Si la déclaration des forages de plus de 10 m est obligatoire, la fourniture des données de sondages reste, à l'exception de la commande publique pour laquelle elle est obligatoire, déclarative et ne fait pas l'objet de contrôle. Elle permet toutefois l'enrichissement permanent de la BSS, bien commun de tous les usagers du sous-sol : aménageurs, entreprises, bureaux d'études, chercheurs, particuliers. La transmission de ces informations est aujourd'hui facilitée par l'outil de saisie Dialog, évoqué précédemment.

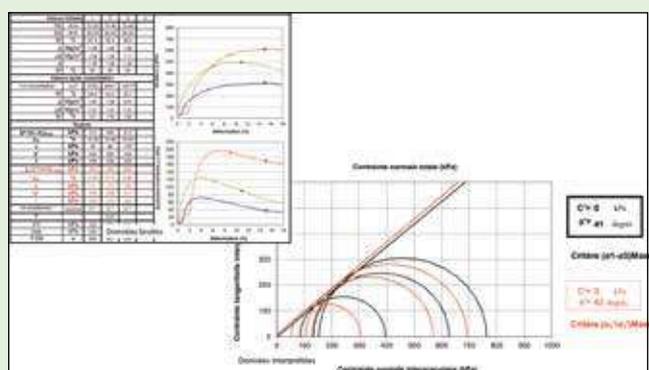


**Outil Dialog pour la saisie des descriptions géologiques des forages.**

D'autres aspects juridiques ou organisationnels peuvent constituer un frein à la fourniture des données géotechniques au BRGM. Ces données appartiennent en effet au maître d'ouvrage qui les a commandées. Celui-ci doit donc donner son accord pour leur transmission au BRGM, ou mieux : le demander à son prestataire dans le cadre contractuel de sa commande. La responsabilité juridique des données pourrait également poser question.

Du point de vue technologique, le développement d'une base de données géotechniques doit intégrer différentes contraintes et exigences liées d'une part à la nature très diverse des données géotechniques (diagraphies, essais *in situ*, essais en laboratoire, sur échantillons intacts, reconstitués, avec des modes

opératoires normalisés ou non) et d'autre part à la nécessité de collecter toutes les mesures et paramètres bruts de l'essai, pour donner la possibilité à l'utilisateur de juger de leur validité et de les exploiter dans les meilleures conditions. Par exemple, les paramètres de résistance au cisaillement (cohésion et angle de frottement) n'ont une valeur scientifique que si l'on connaît la procédure d'essai utilisée et que l'on possède tous les paramètres des éprouvettes testées. La récupération et la saisie de toutes les données brutes peuvent s'avérer très fastidieuses et chronophages. Il apparaît ainsi indispensable de prévoir des procédés de récupération des données à la source, automatisées, à partir des systèmes d'acquisition *in situ* ou au laboratoire, auprès des prestataires géotechniques en charge des investigations. Pour les données plus « anciennes » uniquement disponibles en format papier ou PDF, la récupération sous format numérique des données brutes est plus problématique. Des solutions à l'aide de logiciels de fouille de documents sont actuellement étudiées.



**Essai triaxial, données brutes et données interprétées.**

Afin de mieux connaître la pratique actuelle en France concernant la gestion des données géotechniques et pour mieux appréhender les besoins et attentes des différents acteurs, le BRGM a lancé une enquête au cours de l'été 2023. Près de 200 réponses de différents types d'acteurs ont été reçues, permettant une bonne représentativité de la communauté géotechnique et montrant l'intérêt de la profession pour ce sujet. Les résultats montrent que l'archivage numérique des rapports et des données d'essais est aujourd'hui largement pratiqué. Pour les données, cet archivage est encore majoritairement sous format PDF, les formats numériques étant encore peu employés. Il en est de même pour les échanges de données, pour lequel le format PDF reste très présent.



**Formats d'archives et d'échanges des données géotechniques, plusieurs réponses possibles (résultats de l'enquête BRGM).**

Les professionnels de la géotechnique se montrent particulièrement intéressés par le projet de banque de données géotechniques : ils sont presque unanimes à se déclarer prêts à la consulter et nettement majoritaires à accepter de l'alimenter. ●●●



© BRGM

### Intérêt des géotechniciens pour une plateforme de dépôt et de diffusion des données géotechniques (résultats de l'enquête BRGM).

••• En termes de contenu, les géotechniciens ont manifesté leur intérêt pour tous les types d'essais ainsi que pour les rapports d'ingénierie, les essais *in situ* (notamment les essais pressiométriques) arrivant en tête.



© BRGM

### Contenus souhaités par les géotechniciens, 3 réponses possibles (résultats de l'enquête BRGM).

En termes de fonctionnalités, les attentes comportent bien sûr la possibilité d'extraction en lot, selon des requêtes ciblées, et selon différents types de formats (Excel, AGS, IFC, etc.), la connexion possible avec d'autres outils ou logiciels, et bien entendu l'accès aux données brutes, la géolocalisation de l'essai, etc.

## PLATEFORME DE DONNÉES GÉOTECHNIQUES: DU CONCEPT À LA RÉALISATION

À partir de 2018, le BRGM s'est penché sur la question de la standardisation des données géotechniques. L'opportunité d'aborder le sujet fut offerte par projet national MINnD dont la finalité principale portait sur l'extension des capacités des standards de l'OpenBIM, notamment l'IFC, pour la description des infrastructures dans leur environnement. Pour la géotechnique, le travail s'est fait en collaboration avec plusieurs organismes de la profession parmi lesquels on retrouve: Andra, CAN, CETU, EDF, Egis, Geolithe, Geos, Setec, Systra, Terrasol, Vinci Concessions.

Avec la vocation d'aboutir à la définition d'un format d'échange des données ayant une sémantique commune entre les outils SIG et BIM, le groupe s'est focalisé sur l'identification des données échangées, leur description et leur organisation. Les standards de l'OpenGIS portés par l'Open Geospatial Consortium

(OGC) notamment utilisés pour la géologie et l'hydrogéologie ont servi de base à ces travaux. Les extensions pour la géotechnique ont visé à suivre les normes (ex: NF P 94-500) ou encore les recommandations existantes (ex: GT32 de l'Aftes).

Aujourd'hui un projet pilote, baptisé OpenGeotech, est en cours de développement au BRGM. Visant à donner corps aux travaux de standardisation entrepris précédemment, il propose d'étendre l'application Dialog à la collecte et description d'essais géotechniques. Au stade actuel de développement, les paramètres de forages (diagraphies instantanées) ainsi que trois types d'essais ont été ciblés: l'essai pressiométrique Menard, l'essai SPT et le CPT.



© BRGM

### Maquette de l'interface pour la déclaration d'un essai pressiométrique (Design non définitif).

Enfin, ce projet va bénéficier d'une opportunité majeure. Le BRGM et la Société du Grand Paris ont signé début 2023 une convention permettant la récupération de la base de données « Songe » qui rassemble la totalité des sondages géotechniques et environnementaux du Grand Paris Express. Le contenu sera progressivement transmis au BRGM au fur et à mesure de l'avancement des travaux et de la livraison des différents lots. À terme, d'ici quelques années, plusieurs milliers de sondages géotechniques viendront ainsi peupler la BSS et les essais géotechniques associés pourront être mis à disposition des utilisateurs dans la future plateforme.

D'autres maîtrises d'ouvrages publiques devraient suivre, le BRGM se tenant à leur disposition pour faciliter les échanges.

## CONCLUSION

Dans la continuité de sa politique « science ouverte », le BRGM propose d'améliorer le partage et la réutilisabilité des données géotechniques. Des actions de travail collaboratives ont été menées avec différents acteurs du métier afin d'identifier et standardiser la description des données. Ces travaux ont contribué à la définition de standards internationaux OpenBIM et OpenGIS pour la géotechnique.

La seconde étape porte sur la proposition de solutions numériques implémentant ces standards. Des développements sont en cours dans l'outil Dialog afin d'ajouter aux fonctionnalités actuelles de description de forage et observations géologiques, la possibilité d'y adjoindre des essais géotechniques (essai pressiométrique, CPT, SPT...). En parallèle, des actions de recueil des besoins et attentes des utilisateurs sont engagées afin de calibrer l'offre de services souhaitables dans le domaine. Les résultats d'une première enquête ont montré un fort intérêt de la communauté géotechnique pour le projet. ■

\* <https://infoterre.brgm.fr/> - <https://www.georisques.gouv.fr/>

**Isabelle Halfon**, responsable de projet géotechnique  
**Mickaël Beaufils**, architecte interopérabilité et sémantique  
 Direction du numérique pour les géosciences  
**Etienne Taffoureau**, chef de projet systèmes d'information  
 Unité production opérationnelle des projets numériques  
 Direction du numérique pour les géosciences

# SoilCloud

## Transition Numérique en géotechnique



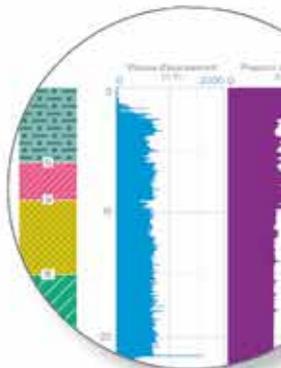
### Modernisez votre activité géotechnique

- ✓ Structuration de vos données autour d'un SIG
- ✓ Visualisation efficace de vos données
- ✓ Statistiques de masse et big data



### Pour les ingénieries géotechniques

- ✓ Dépouillement complet de vos essais
- ✓ Gamme complète d'essais in-situ et de laboratoire
- ✓ Edition de rapports factuels au format PDF



### Pour les entreprises de travaux géotechniques

- ✓ Module Fondations Spéciales (suivi de production, DOE, ...)
- ✓ Module Terrassement (essais de plaque, classification GTR, ...)

## Enclenchez la transition numérique de votre entreprise avec SoilCloud

Ils ont enclenché leur transition numérique grâce à SoilCloud



SÉMOFI



SoilCloud, vainqueur du trophée de l'innovation SOLSCOPE



Contactez nous pour une démo

[www.soilcloud.fr](http://www.soilcloud.fr)

[contact@soilcloud.fr](mailto:contact@soilcloud.fr)

# Fondasol mobilise ses données de sol dans son outil Solscore, pour répondre aux besoins métier et client

En qualité d'ingénieurs géotechniciens, notre mission quotidienne est d'identifier au mieux les risques liés aux aléas du sous-sol pour optimiser les hypothèses dimensionnantes et les choix constructifs propres au terrain et à l'ouvrage ciblé. Jusqu'à présent, nos modélisations géotechniques s'appuyaient sur un programme d'investigation souvent localisé dans les limites du site et sur notre capacité d'interprétation entre les points de sondages pour réduire au mieux l'incertitude. Solscore ouvre de nouveaux horizons.

## LA « DATA », VECTEUR D'UN NIVEAU DE SERVICE AUGMENTÉ

Intégrer les résultats de ces programmes d'investigations dans une base de données pour les combiner à des données avoisinantes permet, via une analyse statistique poussée, de fournir une source d'informations bien plus riche qu'une seule campagne localisée. Cette notion de *big data*, si elle est couplée à une approche probabiliste, permet de mettre en exergue des cohérences ou des variabilités probantes entre des environnements géologiques similaires et, à plus petite échelle, les variations géomécaniques dans une même couche. Préalablement contrôlées, nettoyées et structurées, puis passées au crible des algorithmes, les données nouvellement exploitées viennent ainsi enrichir l'analyse de l'ingénieur, pour lui permettre de mieux évaluer l'incertitude liée aux données du sous-sol dès l'amont d'un projet.

C'est dans cette optique de cercle vertueux, en s'appuyant sur la richesse des données collectées depuis 1958, que le groupe Fondasol a renforcé en 2017 sa stratégie de transformation numérique. Déployée dès 2021 dans toutes les agences métropolitaines de Fondasol, la plateforme Solscore propose un écosystème d'outils applicatifs qui recentrent l'ingénieur sur sa valeur ajoutée et lui permettent de proposer à ses clients un niveau de service augmenté via l'accès à la synthèse de l'information associée à un gain de temps dans les tâches usuelles (informations sur la densité de sondages et les essais réalisés aux alentours du site, enquête documentaire...).

Le niveau de service est augmenté, puisque la volumétrie n'est plus limitée aux seules données d'entrée du projet, mais agrège des données alentour : plus nombreuses et associées aux statistiques, ces données dessinent une image probable de la lithologie du site

d'étude (figures 1 et 2). En vérifiant les données sources, l'ingénieur peut affiner l'analyse, pour fournir plus rapidement une première information sur le site, ajuster une éventuelle campagne d'investigations, et définir *in fine* un modèle géotechnique au niveau d'incertitude réduit, puisque plus riche de données, et optimiser encore davantage les hypothèses dimensionnantes et constructives de l'ouvrage.



(Fig. 1). Solscore, applicatif de densité de sondages.

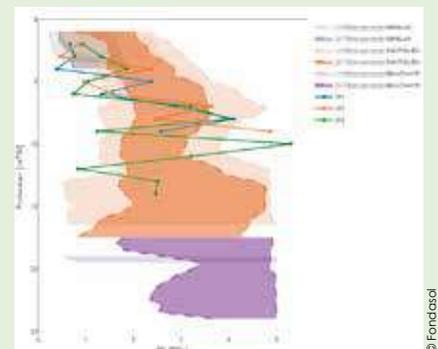
## AU CŒUR DE NOTRE DÉMARCHE : LA STRUCTURATION ET LA COMMUNICATION DE LA DONNÉE

Qu'il s'agisse des données de sondages, des essais *in situ*, des données topographiques ou des observations de terrain, l'enjeu au cœur d'une telle plateforme est bien évidemment la donnée, et notamment sa quantité, sa fiabilité et sa structuration, critères indispensables pour générer des modèles et des usages cohérents.

C'est là qu'interviennent conjointement les métiers de la direction technique et scientifique et ceux de la transformation numérique (*product owners, data analysts, data scientists, managers...*).

En adéquation avec le principe FAIR, leur enjeu est d'assurer que l'information soit : Facile à trouver - Accessible - Interopérable - Réutilisable. Un tel objectif nécessite notamment un travail préalable d'inventaire des données, avant de les organiser dans une base centralisée, faisant communiquer tous les outils et applicatifs entre eux.

Toute donnée de sondage nouvellement acquise doit également venir enrichir la base de données et alimenter les différents outils de modélisation ou de calculs, tandis que les données ouvertes doivent pouvoir être intégrées via des interfaces type API.



(Fig. 2). Solscore, applicatif de modèle géotechnique.

## UN ÉCOSYSTÈME 100% NUMÉRIQUE POUR ALIMENTER ET ENRICHIR LE MÉTIER D'INGÉNIEUR

Comme le souligne Yannick, l'un de nos ingénieurs experts, Solscore associe la connaissance de nos ingénieurs à une source d'archives incroyablement riche pour permettre à chacun de capitaliser sur le travail passé et actuel au bénéfice des projets de nos clients. « Nos données ne sont plus oubliées dans des archives, ou partiellement en mémoire des collaborateurs les plus expérimentés : elles sont à la portée immédiate de tous les ingénieurs Fondasol. Mises

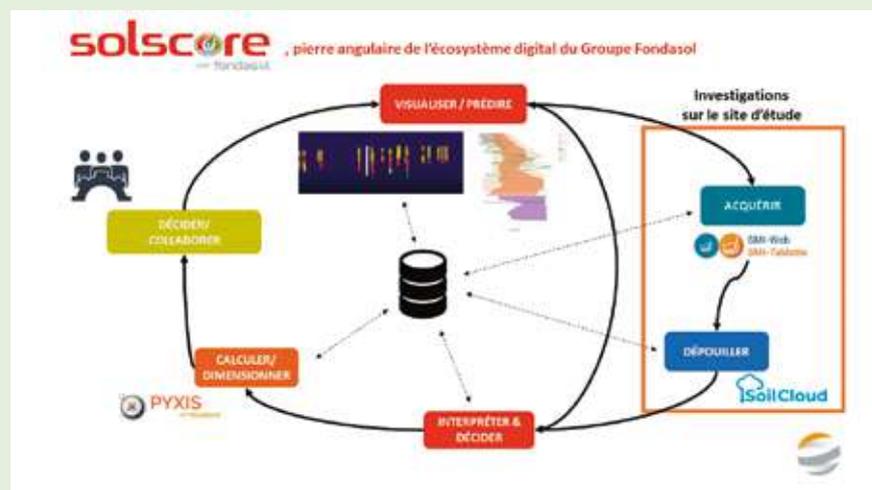
en valeur dans nos modèles géotechniques locaux, elles enrichissent notre connaissance d'un site et nous permettent d'optimiser encore davantage nos préconisations.»

Définition du besoin, investigations nécessaires à la confortation du modèle, réalisation du modèle géotechnique affiné, réalisation des calculs adaptés à la mission géotechnique: Solscore est la pierre angulaire d'un parcours d'accompagnement complet de l'ingénieur, numérisé à chaque étape du process, chaque outil étant interfacé à la base de données et avec les autres outils.

intervenant pouvant suivre les actions de l'autre en temps réel.

SMI communique ensuite avec SoilCloud (seul partenaire externe de l'écosystème), qui nous permet de collecter les données brutes et de dépolluer les sondages et essais. Les informations de la campagne sont ensuite poussées dans Solscore, et viennent nourrir le modèle. L'ingénieur peut alors affiner les incertitudes qu'il avait préalablement identifiées.

Selon l'étape de dimensionnement, et les objectifs de l'étude, l'ingénieur importera ensuite le modèle dans



**Solscore, pierre angulaire d'un écosystème 100 % numérique.**

Ainsi, depuis Solscore, l'ingénieur Fondasol visualise et apprécie plus finement les conditions du site, en recoupant les différentes sources au droit de la parcelle (types d'essais *in situ*, description lithologique...) et intègre la donnée environnante. L'ingénieur génère ensuite l'enquête documentaire, désormais automatisée, et s'appuie sur les cartes *ad hoc* pour sélectionner les données qu'il juge pertinentes sur le site. Sur cette base, un modèle géotechnique prédictif est généré, augmentant le regard de l'ingénieur sur les caractéristiques mécaniques finales à considérer pour la phase de calculs et de recommandations.

En considérant les variables mises en évidence, l'ingénieur identifie s'il a besoin d'informations complémentaires pour réduire la marge d'incertitude, et programme en ce cas une campagne de sondages justement adaptée.

C'est depuis la version web de notre système de management des investigations (SMI) que l'équipe bureau programme alors la campagne (instructions de chantier, planification); les techniciens et équipes de forages disposent quant à eux d'une version mobile sur tablette pour l'implantation des points de sondages et l'acquisition des résultats d'investigations, chacun

Pyxis, application web regroupant un ensemble d'outils de calculs anciennement sous Excel. Il réalisera le dimensionnement des ouvrages géotechniques concernés et pourra ensuite transmettre ses recommandations à l'équipe projet, pour qu'elle les intègre dans la conception globale de l'ouvrage.

En équipant tous les acteurs de la chaîne de valeur de nouveaux outils, l'ambition du groupe Fondasol est de permettre à chacun de gagner en efficacité, et de faciliter et fluidifier la collaboration entre les équipes. Elle est aussi de permettre à l'ingénieur de se concentrer sur sa valeur ajoutée: la caractérisation des incertitudes du modèle géotechnique et, en regard, la proposition à ses clients de recommandations toujours plus affinées.

### ET DEMAIN? FACILITER LA LECTURE DES RISQUES DU SOUS-SOL DÈS L'AMONT DU PROJET

Dans un contexte de raréfaction du foncier et dans l'optique de la zéro artificialisation nette, les enjeux liés au sous-sol tendent à se combiner, entre déformation mécanique du sol, gestion des dépôts anthropiques liés à l'industrialisation, sources de pollution, présence

« *Solscore associe la connaissance de nos ingénieurs à une source d'archives incroyablement riche* »

de cavités, gestion des ressources en eau, opportunité de la géothermie...

Dès la phase d'acquisition foncière, les aménageurs et monteurs de projets ont besoin d'intégrer dans leur analyse l'ensemble de ces risques et leurs impacts directs pour le projet et son environnement. Pour cela, ils ont besoin de disposer d'une première approche des risques et opportunités, bien avant les premières études. Cette approche doit rendre immédiatement accessibles des notions souvent complexes.

Le numérique et la mobilisation des *data* déjà disponibles, appuyés par l'algorithmie et la géostatistique, permettent d'apporter de premiers éléments de réponse à ce besoin exprimé très en amont des projets.

La filiale, créée cette fin d'année par le groupe Fondasol, entend aller encore plus loin en permettant à ces clients d'avoir accès à une plateforme numérique proposant, pour un site donné, une lecture facilitée et immédiatement accessible des risques liés aux sols, qu'ils relèvent de la mécanique ou la pollution des sols, de la gestion de l'eau ou de l'opportunité de la géothermie, et sans que cette lecture soit dénaturée.

En rendant accessibles des notions complexes et en permettant à des non-sachants d'appréhender le monde du sous-sol sur différentes problématiques métiers (géotechnique, sites et sols pollués, hydrogéologie, géothermie), cette plateforme pourra reconnecter nos métiers à un écosystème d'acteurs foisonnant, pour certains peu conscients de la nécessité de mobiliser nos expertises le plus tôt possible pour une appréciation correcte des risques sous-jacents.

Qu'il s'agisse de Solscore ou de cette nouvelle plateforme, l'exploitation contrôlée de la donnée nous permet de créer de nouveaux usages métiers et une nouvelle façon de traiter la donnée dans nos processus d'ingénierie. Elle nous met en mesure d'anticiper les attentes de nos clients, que ce soit en offrant une information plus rapide et accessible, ou en produisant une conception optimisée tenant compte au mieux des incertitudes liées au sous-sol. ■

**Élodie Vautherin**, directrice générale  
déléguée filiale numérique  
Groupe Fondasol

**Arnaud Finiasz**, directeur scientifique  
Fondasol

# SoilCloud / Fondasol : retours d'expérience sur plus de deux ans d'utilisation d'un système centralisé de gestion de données géotechniques

Depuis plus de deux ans, la solution SoilCloud, dédiée à la centralisation des données géotechniques, est utilisée au sein du groupe Fondasol, l'un des premiers bureaux d'études géotechniques de France à avoir amorcé la numérisation de ses données de terrain. En février 2023, plus de 130 000 sondages et les différents essais associés ont été traités au travers de l'application. L'article partagera les retours d'expérience des équipes de Soilcloud et des utilisateurs de Fondasol recourant à cette application s'appuyant sur un système d'information géographique (SIG). Il montrera ainsi comment son utilisation a, côté Fondasol, modernisé et fluidifié le travail quotidien des équipes, et, côté Soilcloud, comment elle a permis d'enrichir et de finaliser la solution à travers les retours des centaines d'utilisateurs de Fondasol. L'article présentera les perspectives sur la valorisation des données structurées dans un processus d'ingénierie.

Dédiée à la centralisation des données géotechniques, la solution web SoilCloud est utilisée depuis plus de 2 ans au sein du groupe Fondasol. Le déploiement de cette solution s'inscrit dans une démarche globale de transformation digitale des activités du groupe. Fin juillet 2023, la base de données du groupe Fondasol dans SoilCloud comporte plus de 100 000 sondages et l'ensemble des essais géotechniques associés (pressiomètre, pénétromètre statique et dynamique entre autres...), dont l'accès se fait depuis un SIG. « La force de la solution SoilCloud est qu'elle implique tous les collaborateurs, également en multi-expertises, dès l'acquisition des données remontées du terrain », indique Alexandre Teyssier, chef de projets de développements numériques au sein du groupe Fondasol. Les fonctionnalités de la solution SoilCloud vont au-delà du simple stockage, et donnent la possibilité de dépouiller les essais pressiométriques ou d'éditer les logs des sondages.

## UNE SOLUTION QUI FAIT L'UNANIMITÉ

Le déploiement de la solution SoilCloud s'est appuyé sur un programme de formation lors de la première année d'utilisation, pour accompagner et faire adhérer à la solution l'ensemble des équipes opérationnelles du groupe Fondasol (ingénieurs, assistantes, techniciens). « L'adhésion des équipes opérationnelles est une valeur fondamentale pour nous. Sans elle, la solution n'est pas utilisée et devient très vite obsolète », précise Lucas Janodet, directeur général et cofondateur de SoilCloud. Dès le début du déploiement, un soin

particulier a ainsi été apporté par SoilCloud et le groupe Fondasol, pour proposer les fonctionnalités répondant prioritairement aux attentes des utilisateurs, et garantir un niveau de satisfaction immédiatement élevé, ce qu'a confirmé l'enquête réalisée auprès des utilisateurs 6 mois après le déploiement de la solution.

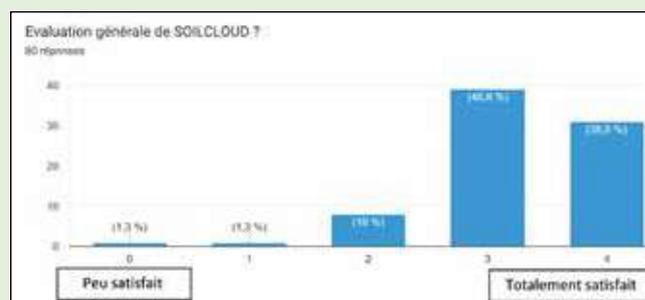
« Ces résultats sont gratifiants et reflètent la pleine mobilisation du groupe Fondasol et de SoilCloud pour accompagner la solution auprès des utilisateurs », constate Alexandre Teyssier. Parmi les motifs de satisfaction liés à l'utilisation de SoilCloud : l'amélioration de la qualité dans le traitement des projets, et un gain substantiel de temps, de 15 à 50 min sur chaque projet. « Ce gain de productivité est le témoin de l'adéquation de SoilCloud avec les besoins des ingénieurs géotechniciens en général, et des ingénieurs du groupe Fondasol en particulier », souligne Lucas Janodet.

À l'issue de 2 années d'utilisation, il a été demandé à de nombreux utilisateurs du groupe Fondasol de savoir s'ils souhaiteraient revenir à d'anciennes solutions de traitement des données géotechniques :

la réponse est définitivement non. « SoilCloud a concrétisé l'envie du géotechnicien de disposer d'un outil numérique, centralisé, collaboratif, en cohérence avec tous les outils mis en place tout au long de la chaîne de production au sein du groupe. Cet outil ne se limite pas seulement aux plans et coupes de sondages ; il lui permet d'interpréter ses données et de dessiner une première approche de ses modèles », indique une utilisatrice du groupe Fondasol.

## UN DÉVELOPPEMENT CONTINU

L'un des facteurs de succès du déploiement réside dans le fonctionnement, en développement continu, entre les équipes de SoilCloud et du groupe Fondasol. Ce mode permet une division du projet en plusieurs sous-phases ; chaque sous-phase étant de taille modeste, le circuit formulation du besoin / développement / correction / validation est plus court, et favorise la livraison de nouvelles fonctionnalités plus rapidement que par un circuit classique, qui nécessiterait la rédaction d'un cahier des charges. « Ce mode de fonctionnement est la force de SoilCloud et est particulièrement pertinent et adapté à notre équipe, composée d'ingénieurs géotechniciens qui comprennent immédiatement les besoins de nos clients », insiste Lucas Janodet. Il permet à SoilCloud de s'inscrire dans un développement continu.



Enquête de satisfaction menée au sein du groupe Fondasol sur l'utilisation de Soilcloud (été 2021 – 6 mois après déploiement).



# Connecteur Lim / SoilCloud : exemple d'une interopérabilité système profitable à l'ingénierie géotechnique Abo-Erg

La société Lim, spécialisée dans la conception et fabrication de matériel d'acquisition de données *in situ* (forage, pressiomètre, lugeon, pénétromètre etc.) ainsi que des applications web associées, et la société SoilCloud, spécialisée dans la transition numérique en géotechnique, collaborent afin de proposer à leurs clients communs une solution de traitement des données, de l'acquisition jusqu'à son exploitation. L'ingénierie géotechnique Abo-Erg consciente des enjeux de la maîtrise de ses données est la première entreprise à profiter de cette collaboration.

## ACQUISITION DES DONNÉES PAR ENREGISTREURS NUMÉRIQUES

L'ingénierie géotechnique s'appuie sur l'acquisition de données sur site. L'acquisition de ces données peut se faire de manière manuelle, mais également par l'utilisation d'enregistreurs numériques. Cette deuxième méthode est recommandée, car elle apporte plusieurs avantages :

- soulager l'opérateur d'une saisie manuelle chronophage et compliquée en cas d'intempéries ;
- améliorer la précision de la mesure ;
- permettre un pas d'acquisition temporel très court.

En pratique française, les principaux essais enregistrés numériquement sont les essais pressiométriques et les enregistrements de paramètres de forages. Dans le cas des paramètres de forages, l'enregistrement ne peut se faire que par un enregistreur numérique. Cependant, pour les essais pressiométriques, l'enregistrement peut se faire de manière manuelle (enregistrement de type A au sens de la norme NF EN Iso 22476-4) ou numériquement (enregistrement de type B ou C selon la norme NF EN Iso22476-4). Un enregistreur est un appareillage électronique composé de capteurs adaptés aux spécifications techniques d'un projet, d'une interface graphique pour le sondeur, d'un stockage des données et d'une connexion 3G/4G pour communiquer dans les deux sens (chantier/Cloud et bureau/chantier).



Vue du PocketLim 6G.

*« Le type de fichier BOR possède une documentation libre et accessible à tous »*

Une des problématiques liées aux enregistrements numériques de données réside dans la pérennité des fichiers produits par les enregistreurs dans le temps et « l'espace ».

En effet, par une mise à jour logiciel, des formats de fichiers numériques peuvent devenir illisibles et donc inexploitable dans le temps.

De plus, en dehors de « l'espace » du logiciel conçu pour lire ces fichiers, il peut être impossible d'accéder à ces données. Ainsi, la notion d'interopérabilité est fondamentale pour tout système d'acquisition de données. L'interopérabilité est la capacité d'un logiciel ou d'un système, tel qu'un enregistreur, de générer des fichiers normés et lisibles par des logiciels ou systèmes tiers. Le respect de cette contrainte d'interopérabilité est fondamental afin d'assurer la pérennité des données en particulier de nos jours avec la généralisation des projets BIM (*Building Information Modeling*).

## LE FICHIER BOR : EXEMPLE D'UN FICHIER INTEROPÉRABLE

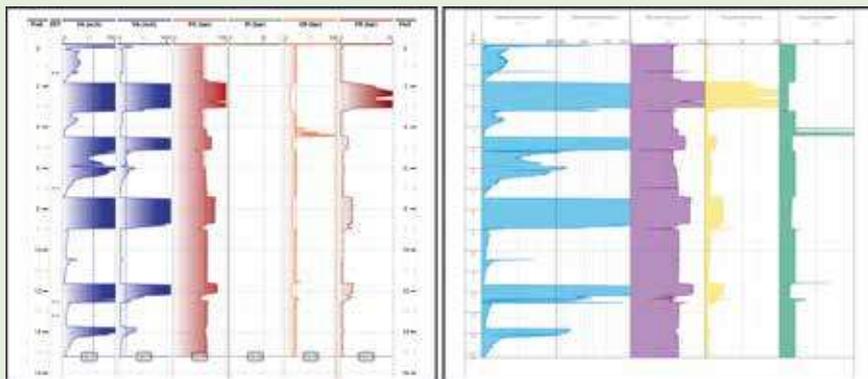
La société Lim construit des enregistreurs de données et d'applications logicielles dans le secteur de la géotechnique et de la prospection minière depuis 38 ans. Consciente des enjeux d'interopérabilité, elle a développé le fichier au format BOR (*Borehole Open Recording*). La nature de ce fichier est de type binaire compressé adapté au volume important de données issu des enregistreurs de paramètres de forage. Les fichiers de type XML (texte paramétré) ne sont pas adaptés pour transmettre ces données dans la mesure où le volume de données d'un fichier BOR est 10 fois inférieur à son équivalent XML.

Le type de fichier BOR possède une documentation libre et accessible à tous (<https://bor-form.at/fr/>). Ce mode de fonctionnement en open source permet le chargement des données des enregistreurs Lim sur des applications tierces. « Par l'ouverture en open source de ses fichiers de données la société Lim prouve son attachement à la notion d'interopérabilité et son souhait de s'ancrer dans les pratiques modernes en ingénierie informatique », précise Frédéric Malinet, président de Lim SAS.

## L'INTEROPÉRABILITÉ AU SERVICE DE L'INGÉNIERIE

Abo-Erg Géotechnique intervient depuis plus de 40 ans dans des projets géotechniques en réalisant les études d'ingénierie ainsi que les investigations. Elle exploite une trentaine d'enregistreurs, dont une vingtaine d'enregistreurs Lim. Dans un souhait de transformation numérique, Abo-Erg a acquis le système SoilCloud, système d'information géographique (SIG) permettant la gestion des données géotechniques. Grâce à la documentation libre des fichiers BOR, les équipes de SoilCloud ont développé les codes informatiques permettant de lire les informations des enregistreurs Lim directement dans SoilCloud. « Le fait d'intégrer directement les fichiers BOR dans SoilCloud est un vrai plus, car nos ingénieurs ne se préoccupent plus de manipuler les fichiers pour les convertir en format CSV », indique Christophe Rondeau, directeur technique d'Abo-Erg. L'image ci-après présente l'exemple d'un jeu de données identique mais représenté de manière différente : à gauche, selon le modèle du logiciel Geolog v4 de la Lim, et à droite, selon le modèle de la solution SoilCloud.

Seul un jeu de données interopérable permet d'être visualisé sur plusieurs systèmes différents. « Le logiciel doit être considéré comme un support de visualisation de la donnée et non pas comme un prérequis à l'exploitation des



© SoilCloud et Lim

données», précise Lucas Janodet, directeur général de société SoilCloud.

Au départ du déploiement de SoilCloud au sein d'Abo-Erg, l'importation des fichiers BOR se faisait manuellement. Bien que les fichiers soient directement lisibles par SoilCloud, cela nécessitait une étape supplémentaire pour les ingénieurs. Ainsi, les équipes de SoilCloud et Lim ont collaboré pour permettre une importation directe des données depuis l'enregistreur Lim jusqu'à SoilCloud. Concrètement, le système Lim@mail développé par Lim a été paramétré afin que les données soient envoyées sur une adresse e-mail administrée par SoilCloud. Ensuite, une interface a été spécialement développée pour permettre aux ingénieurs d'Abo-Erg de

lire le contenu de cette adresse e-mail et d'importer directement les données dans SoilCloud. Sur cette interface, l'ingénieur d'Abo-Erg saisit la date de création de ses fichiers ce qui permet de filtrer les données qu'il souhaite importer dans SoilCloud.

« Pouvoir importer les données de nos enregistreurs directement dans SoilCloud est un réel gain de temps pour nous », confie Christophe Rondeau.

#### RETOUR D'EXPÉRIENCE AU SEIN D'ABO-ERG

Abo-Erg est la première ingénierie géotechnique à utiliser le système d'interopérabilité entre les enregistreurs Lim et SoilCloud. Sur une durée de 6 mois,

entre février et juillet 2023, ce sont environ 1 000 enregistrements de paramètres et 2 200 enregistrements d'essais pressiométriques qui ont bénéficié du connecteur Lim / SoilCloud.

Avant la mise en place du connecteur, chaque fichier devait être individuellement enregistré sur l'ordinateur de l'ingénieur, puis rechargé pour être dépouillé. En supposant que cette opération prenne environ 30 secondes, cela représente, sur 6 mois environ, 25 heures économisées, soit 50 heures par an. Convaincue du bénéfice apporté, Abo-Erg a entrepris, avec ses autres fournisseurs d'enregistreurs, le développement de connecteurs pour que l'ensemble de ces données chantiers soient interopérable avec SoilCloud. « Au-delà du temps gagné, ce qui est important, c'est que la réflexion de l'ingénieur ne soit plus polluée par ces tâches répétitives et sans valeur ajoutée », insiste Christophe Rondeau. « Ce qui permet de nous consacrer plus longuement sur notre métier d'ingénieur et proposer des solutions optimales et de meilleure qualité à nos clients » conclut-il. ■

**Lucas Janodet**

Directeur général SoilCloud

**Frédéric Malinet**, président Lim SAS

**Christophe Rondeau**

Directeur technique Abo-Erg

## A fond les fondations !

En battage ou forage, la LRB 23 fait des prouesses dans l'amélioration des sols.  
[www.liebherr.com](http://www.liebherr.com)

# LIEBHERR

Fondations spéciales LRB 23





## Du grain à l'ouvrage à l'ère du « big data » Application à la caractérisation de sols de surface et aux ouvrages en service

En géotechnique, à l'heure du *big data*, du *machine learning* (ML) et de l'intelligence artificielle (IA), les efforts réalisés pour « maquetter le sol » nécessitent le développement d'appareils de mesure performants et de modèles numériques pour le restituer en 3D ; mais, il est aussi essentiel de mettre en place une architecture claire pour centraliser, stocker, sécuriser, exploiter et modéliser à l'échelle de l'ouvrage les données terrain avec le minimum d'incertitude possible.

Depuis plus de 30 ans, Sol Solution, en collaboration avec l'Institut Pascal et d'autres partenaires universitaires et industriels, consacre d'importants efforts en R&D pour garantir le succès d'un de ses axes de développement stratégique, orienté sur la caractérisation des sols de surface, la numérisation et l'analyse numérique grâce à une approche *big data*. L'objectif est de fournir à ses clients des techniques innovantes pour révéler le potentiel du sol tout en favorisant le développement de constructions durables.

### DU GRAIN À L'OUVRAGE

Modéliser le sol pour l'introduire dans un BIM est un enjeu séduisant et attractif qui nécessite des investissements importants, sans oublier de lever certains verrous techniques et scientifiques : la prise en compte de leur nature granulaire discontinue (i) et la variabilité spatiale à l'échelle du terrain (ii).

Quand on parle du sol, il est inévitable de penser à sa nature granulaire et d'imaginer la vraisemblance avec la notion du « *big data* » : dans une cuillère

de sable, on peut compter plusieurs milliers de grains, différents en taille, forme, et qui interagissent entre eux par leurs contacts. Le comportement d'un groupe de grains est intrinsèquement complexe, car les déformations collectives résultant des interactions locales entre eux, sont responsables du comportement mécanique global observé à une échelle de l'ouvrage. Sous certaines hypothèses, la réponse mécanique du sol dépend uniquement des paramètres

physiques des grains (forme, granulométrie...), de leur assemblage (densité, anisotropie...) et de leur interaction avec les fluides. Une faible variation de l'un de ces paramètres peut conduire à une modification importante du comportement à l'échelle macroscopique. À l'échelle de l'ouvrage, une autre problématique se présente : celle de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques des sols.



Stratégie de caractérisation, numérisation et modélisation des sols de surface.

Dans ce contexte, l'approche du *big data* offre une occasion unique et une voie de R&D très intéressante pour améliorer les modèles de terrain; sous réserve de: (a) collecter beaucoup de données; (b) constituer des bases de données physiques et numériques; (c) mettre en place des techniques ML et IA; et (d) développer des méthodes pour fusionner, spatialiser, probabiliser et modéliser les données. De plus, il est essentiel de mettre en place une architecture informatique solide pour établir une liaison fiable entre les données terrain et les modèles d'ingénierie utilisés dans la conception de projets.

### ÉTAPE 1 - DÉVELOPPEMENT D'OUTILS POUR LA CARACTÉRISATION DES SOLS

La caractérisation de sols doit inclure des informations sur le type de matériau présent, son état de compacité et son degré d'homogénéité. Il est donc nécessaire de développer des techniques simples, basées sur des approches pluridisciplinaires, pour ausculter les sols rapidement, en grand nombre et à faible coût.

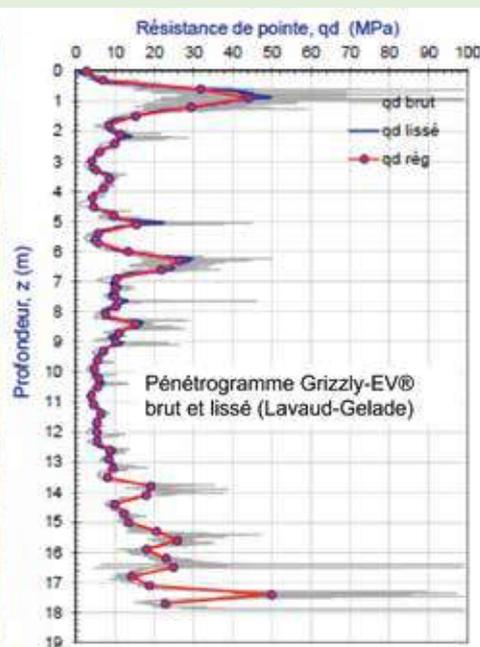
Pour répondre à ce besoin, différents appareils de mesure ont été conçus par Sol Solution et qui répondent à la règle

basique des 5 V du *big data*: volume, véracité, variété, vélocité et valeur. Il s'agit du pénétromètre dynamique instrumenté à énergie variable (Panda, Grizzly-EV, e-Kodiak, Panda 3...) et de la géo-endoscopie. Le grand avantage que le pénétromètre dynamique

à énergie variable offre à la démarche *big data*, est qu'il permet un sondage à haute résolution verticale. La facilité de répétition des essais sur site permet la mise en œuvre de méthodes statistiques pour évaluer la variabilité spatiale des propriétés du sol. ...



Essai de pénétration au DPSH Grizzly-EV (Lavaud-Gelade)



Pénétromètre dynamique instrumenté servo-assisté à énergie variable Grizzly-EV.

# AVENTURE ?

**Les enjeux de vos chantiers sont trop sérieux pour partir à l'aventure !**

**CHOISISSEZ LA RECONNAISSANCE DES SOLS PAR PÉNÉTRATION STATIQUE**

**Travaillez en toute confiance.**



**Le TRACK-TRUCK® GEOSOLTIS**  
Équipement spécial chenilles : accéder de la route à votre chantier le plus inaccessible en moins de 5 minutes.

PLUS D'INFOS





**YANNICK DURMEYER**

RECONNAISSANCE DES SOLS PAR PÉNÉTRATION STATIQUE

**06 84 45 04 44**

[yannick.durmeyer@geosoltis.com](mailto:yannick.durmeyer@geosoltis.com)

[www.geosoltis.com](http://www.geosoltis.com)

10 RUE DE LA BIÈVRE - 57400 SARREBOURG

••• La géo-endoscopie a été développée comme un complément à l'essai de pénétration. Sur le terrain, à l'issue d'un sondage, le train de tiges du pénétromètre est retiré et une caméra miniature est insérée, puis glissée jusqu'au fond du trou. Un système d'acquisition numérise les vidéos et la profondeur en continu. Ces informations sont exploitées dans un logiciel dédié intégrant divers algorithmes de traitement d'images, ce qui permet de multiplier les informations visuellement relevées. L'association avec le pénétrogramme permet d'obtenir un « carottage virtuel ».

Le couplage des informations obtenues avec d'autres techniques (forages, CPT, PMT, géophysique...) permet d'agrèger d'autres données, ce qui est fondamental dans une démarche *big data*. Ces informations doivent être stockées et sécurisées dans une plateforme numérique. Sol Solution a développé une application en ligne, Websprint, multi-équipements, accessible d'un bureau ou d'un chantier, facile à utiliser où toutes ces informations sont sauvegardées, analysées, modélisées et exploitées.

### ÉTAPE 2 - CRÉATION DE BASES DE DONNÉES DE SOLS

Pour accompagner le développement des outils de mesure et faciliter la mise en place des phases d'optimisation, d'apprentissage et de validation comprises dans une démarche ML et IA; la constitution de bases de données est indispensable. Au laboratoire, une BDD physique et numérique d'environ 45 sols différents a été constituée. Pour chaque sol, un échantillon de 2 m<sup>3</sup> a été entièrement caractérisé et une grande quantité d'essais a été réalisée (chargement, pénétromètre, géo-endoscope...) en fonction de la densité et de la teneur en eau.

Une BDD *in situ* a été aussi constituée. Elle comporte d'une part plus de 5 000 études géotechniques réalisées; et d'autre part, plus de 100 000 sondages et 10 000 km de mesures géoradar (GPR) obtenus dans le cadre des missions de diagnostic ferroviaire. Récemment, elle a été complétée par celle créée au sein du projet FUI-24 EMERG3r, associant différents partenaires (université Gustave-Eiffel, laboratoire Navier, Fondasol et Sol Solution). Elle comprend 114 sites, y compris certains historiques, et un total de 1 297 essais.

### ÉTAPE 3 - DÉPLOIEMENT DES TECHNIQUES DE ML, D'IA ET DE FUSION DE DONNÉES

Définir les cibles, préparer les données d'entrée, déterminer le bon modèle;

l'entraîner et l'évaluer pour finalement le tester et le déployer sont les étapes fondamentales d'une approche ML. En fonction du problème abordé et des données d'entrée, les algorithmes utilisés sont divers: réseaux de neurones artificiels, régression logistique, algorithmes génétiques, machines à vecteurs de support... En ce qui concerne la fusion de données, permettant de combiner des données provenant de sources différentes, on utilise différentes approches qui visent à améliorer la précision des prévisions et réduire les incertitudes associées aux modèles géotechniques en combinant les avantages de différentes sources.

L'application du ML et de l'IA aux données du pénétromètre dynamique, du géo-endoscope, et leur fusion avec des observations géophysiques représente une avancée prometteuse. Dans l'avenir, elle pourrait révolutionner la façon dont nous effectuons la caractérisation des sols de surface.

### ÉTAPE 4 - EXPLOITATION : DÉTERMINATION DE LA STRATIGRAPHIE DES SOLS PAR ML & IA

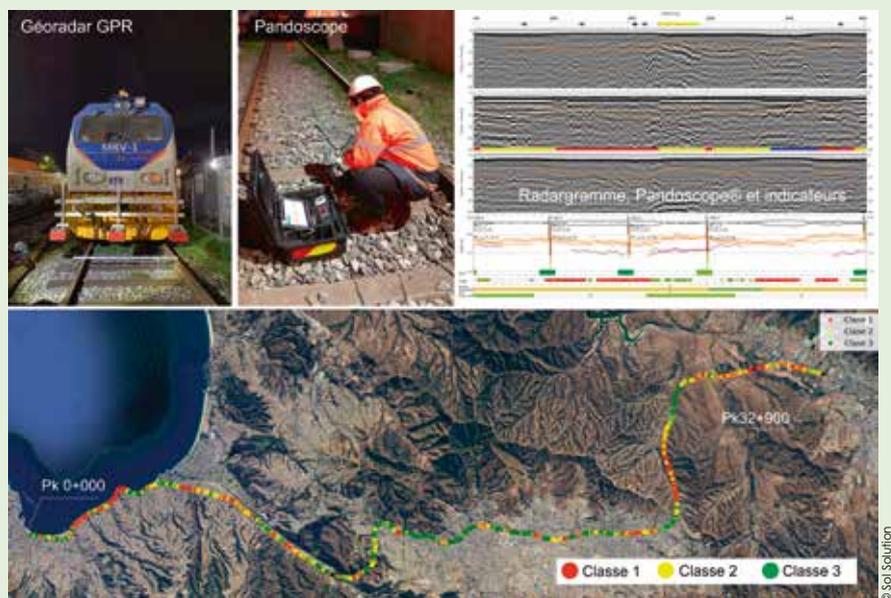
Cette démarche est démontrée au laboratoire. Les essais pénétrométriques et les images géo-endoscopiques sont analysés, traités et exploités afin d'identifier automatiquement, la stratigraphie, la nature et la consistance des sols. Cette approche est composée de 2 procédés: une méthode d'analyse statistique des signaux pour identifier les différentes couches; et une méthode d'analyse d'images par apprentissage en vue de faire la reconnaissance automatique. En laboratoire, les éprouvettes

sont composées de 4 types de sols distincts, chacun ayant des épaisseurs, des compacités et des teneurs en eau différentes. Pour chacune des éprouvettes, 3 Panda et 6 géo-endoscopes sont effectués.

Le signal pénétrométrique est analysé en utilisant une méthode par fenêtre glissante, et la stratigraphie est automatiquement déterminée en calculant un coefficient de corrélation intra-classe et en appliquant un algorithme de détection de pics. La classification de la nature du sol à partir d'images repose sur l'utilisation d'un réseau de neurones profonds pour modéliser le système de données d'images. On compare les prédictions avec le réel. Du laboratoire à l'analyse, cette approche permet d'automatiser la détermination de la stratigraphie et de la nature d'une colonne de sols. Cependant, cette méthode n'est actuellement utilisée que pour un nombre limité de cas.

### DÉVELOPPEMENT DES INDICATEURS POUR LE DIAGNOSTIC DES ASSISES FERROVIAIRES

Le réseau ferroviaire français s'étend sur plus de 30 000 km, sur lequel chaque jour plus de 15 000 trains circulent. La plupart de ces lignes ont plus de 100 ans et vieillissent en raison de l'usure naturelle des matériaux et des conditions environnementales de plus en plus changeantes, et ceci, malgré un entretien régulier de la part du gestionnaire d'infrastructure. Récemment la France s'est engagée à développer et moderniser le transport ferroviaire afin de répondre aux objectifs de la stratégie nationale bas carbone et de la

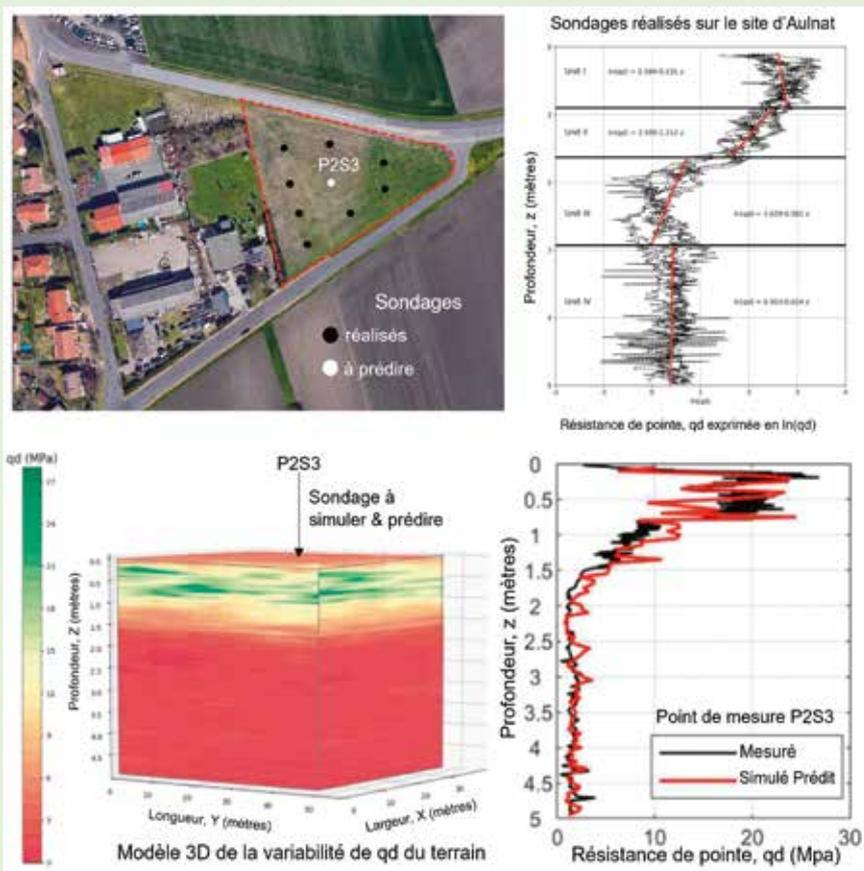


Évaluation de la performance des couches d'assises ferroviaires.

transition vers les modes de transports décarbonés.

La modernisation du réseau ferroviaire exige des études de diagnostics pour mieux comprendre l'état structurel des couches d'assises, principalement constituées de matériaux granulaires comme le ballast, dans le but d'améliorer leur résistance mécanique.

Pour répondre à ce besoin, Sol Solution a développé une méthodologie novatrice en combinant Panda/géo-endoscope (désormais appelée Pandoscope) et géoradar (GPR). Cette méthodologie permet une inspection rapide et non destructive des voies. Jusqu'à présent, plus de 10000km de mesures GPR et plus de 100000 Pandoscopes ont été effectués, formant une vaste BDD. Malgré tous ses avantages (rapidité, volume des données...) le GPR a l'inconvénient de l'interprétation et de son exploitation, qui nécessitent des méthodes d'inversion et d'analyse complexes maîtrisées par des experts. En conséquence, l'utilisation de l'IA, du ML et de la fusion de données est prometteuse pour interpréter, exploiter et modéliser les données en vue de caractériser les couches, évaluer le colmatage du ballast et estimer les propriétés mécaniques des sols traversés. ●●●



Modélisation probabiliste de la variabilité spatiale des sols de surface.

# GEO5

## Suite de logiciels pour l'ingénierie géotechnique

- Stabilité des ouvrages
- Ecrans de soutènement
- Murs de soutènement
- Fondations profondes
- Fondations superficielles

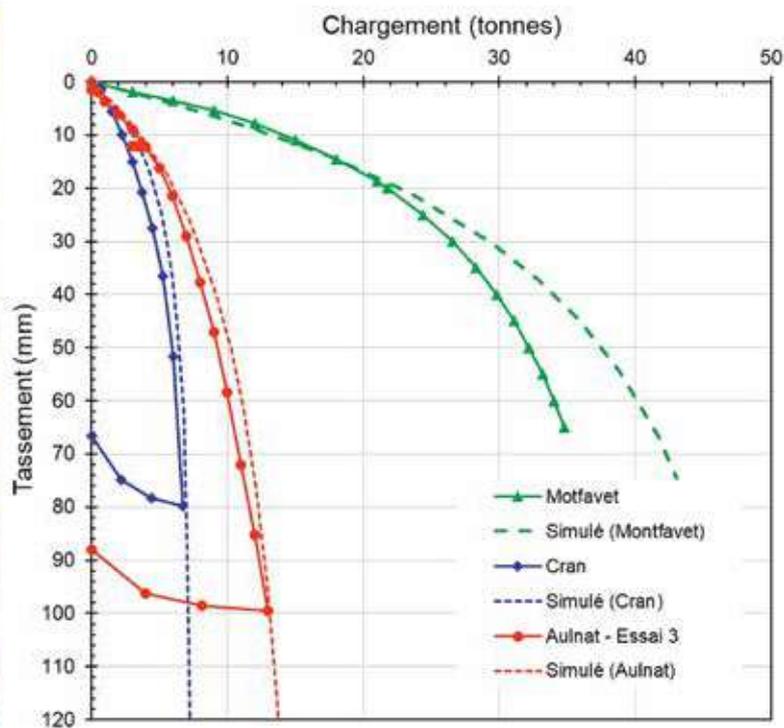
- Essais et sondages
- Modèle géologique 3D
- Coupes stratigraphiques

**BIM géotechnique !**

Version d'essai gratuite et sans engagement sur [www.finesoftware.fr](http://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



### Évaluation des tassements des fondations superficielles.

••• Les signaux GPR sont paramétrisés dans les domaines temporel et fréquentiel, tandis que les données Pandoscope sont utilisées pour établir un paramètre lié à l'état de santé de la couche ballastée. Ces données sont incluses dans la BDD et par la suite les méthodes d'apprentissage, telles que: Kernel Ridge, Support Vector Regression, Linear Regression, Forest Regression, Neuronal-Network et Regression Lasso sont utilisées pour créer un modèle basé sur le GPR permettant d'obtenir le paramètre issu de l'analyse Pandoscope. Pour choisir le meilleur modèle, on évalue sa performance en un point spécifique de la voie en calculant l'erreur absolue moyenne entre la mesure et la prédiction.

### MODÉLISATION PROBABILISTE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES SOLS DE SURFACE

La variabilité spatiale des propriétés des sols est une source majeure d'incertitude en géotechnique. Les essais sur site étant souvent limités, la description de cette variabilité est subjective. Pour remédier à cela, une approche basée sur l'apprentissage automatique (ML) et l'intelligence artificielle (IA) est proposée pour une évaluation plus objective de la variabilité spatiale du sol.

Cette démarche a été étudiée dans le cadre d'une campagne d'essais menée sur un site à Clermont-Ferrand, où 8 sondages Panda ont été initialement réalisés. La première partie de cette

démarche traite de l'identification statistique d'unités de sol homogènes; la deuxième partie se concentre sur la modélisation de la variabilité spatiale par le biais de champs aléatoires conditionnels 3D. Enfin, on vise à démontrer la qualité de nos prédictions: on simule un sondage réalisé dans un point donné du terrain et non inclus dans l'apprentissage.

### ÉVALUATION DES TASSEMENTS DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

L'importance de la donnée pour la caractérisation des sols de surface ne peut être complète sans une mise en pratique. Un cas rencontré au quotidien par le géotechnicien est celui du dimensionnement de fondations superficielles. En France, la méthode directe basée sur les essais au pressiomètre est couramment utilisée. Elle a été adaptée au pénétromètre CPT. Compte tenu de la qualité de la donnée, de l'inclusion des nouvelles technologies, mais aussi par leur similitude et leur bonne corrélation, on propose de l'étendre au pénétromètre dynamique à énergie variable.

Pour ce faire, la BDD support qui comporte à l'origine 70 essais sous charge verticale centrée a été portée à environ 160 essais, dont une centaine de pénétromètres dynamiques. Elle est complétée par des essais de chargement réalisés récemment par l'université Gustave-Eiffel et Sol Solution sur des sites de nature différente: sable, argile

et limons. Une méthodologie prometteuse est proposée pour exploiter les données du pénétromètre dynamique en vue d'évaluer le tassement d'une fondation soumise à une charge axiale. On compare les résultats des mesures et les prédictions obtenues pour trois sites tests. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de l'approche et mettent en valeur l'importance de la data en géotechnique.

À l'ère du *big data* et de la diffusion rapide des méthodes d'IA au domaine de la géotechnique, créer et récolter de données en grande quantité à l'échelle du terrain et à moindre coût reste une étape incontournable. Par la suite, les applications et les opportunités offertes par les approches présentées sont nombreuses. À ce stade, nous considérons important de citer M. J. Biarez qui, en 1992, déclarait: «*Toute mesure "bien faite" in situ est meilleure que rien, donc rien n'est à exclure a priori. Cependant, il faut savoir quelle est l'information qui peut être obtenue sur la loi du comportement du sol...*» Cela afin de passer du grain à l'ouvrage. ■

**Miguel Angel Benz Navarrete**

Responsable recherche, développement et innovation Sol Solution

**Pierre Breul**

Directeur, enseignant et chercheur Polytech Clermont, UCA

**Philippe Moustan**

Responsable commercial Sol Solution

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



# MULTIDRILL XL 140



GÉOTECHNIQUE

*Excellence dans les performances,  
Qualité, Design, Technologie.*

- 148 CV
- Tir 10000 daN
- 1760 daNm couple maxi
- 1330 tours/min maxi



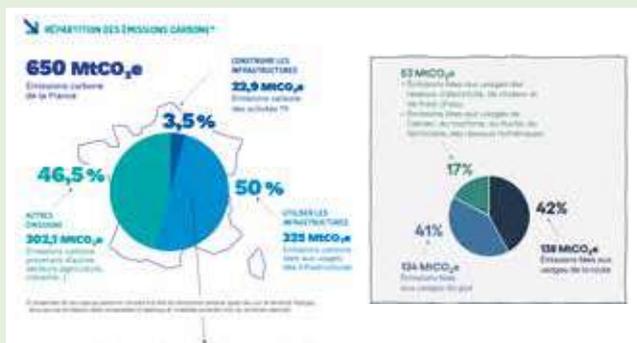
[www.fraste.com](http://www.fraste.com)



# Data et climat: les données à la source d'un outil d'évaluation carbone des ouvrages géotechniques

Devant l'urgence climatique, des stratégies nationales et internationales sont mises en place pour passer progressivement vers une économie à zéro émission nette de carbone d'ici 2050. L'ingénierie géotechnique doit s'inscrire dans cette démarche et intégrer, au cœur même des processus de conception, l'enjeu majeur de réduction de l'empreinte carbone.

La part imputable à la construction des infrastructures (incluant toutes les infrastructures liées à la mobilité, l'énergie, le numérique, l'eau, les ouvrages de protection) représente 3,5% du total des émissions d'équivalent carbone de la France. La géotechnique peut et doit prendre sa place, afin d'agir pour réduire autant que possible cette part d'émissions.



## Répartition des émissions de carbone en France.

Cette intégration passe par le développement d'un savoir-faire : être capable d'appréhender et d'estimer l'empreinte carbone des ouvrages, et en particulier des ouvrages géotechniques. Le nombre de paramètres entrant dans une estimation fine est colossal, et les sources de données permettant de constituer la base nécessaire aux calculs sont multiples et dispersées.

Terrasol s'est constitué une base de données rationalisée qui retient de ce vaste corpus les entrants les plus impactants pour les ouvrages géotechniques. L'objectif a été de développer Ecow, un module de calcul adapté, calibré avec un juste dosage entre précision des estimations et simplicité d'utilisation. Cet outil du quotidien s'intègre dans Orbow, la plateforme web de Terrasol. Il permet, en quelques minutes seulement, de comparer des solutions techniques du point de vue des critères de sobriété carbone.

## OPTIMISATION DES OUVRAGES: UNE ÉVIDENCE, TOUTEFOIS INSUFFISANTE

La conception bas carbone suppose d'intégrer des concepts de frugalité, d'efficacité et d'optimisation. Par nature, les concepteurs d'ouvrages optimisent structurellement les ouvrages et limitent *de facto* leur empreinte par une utilisation plus raisonnée de la matière. Ils utilisent également leurs retours d'expérience pour mettre en avant les solutions les plus pertinentes techniquement et économiquement. Mais, pour être alignée avec les objectifs de décarbonation du secteur de la construction, l'analyse multicritères doit aller plus loin et intégrer, outre les aspects méthodes, planning et coûts, le critère carbone.

Par ailleurs, l'exercice de l'évaluation carbone n'est pas toujours intuitif, et nécessite donc d'être cadré. On peut citer l'exemple d'un ouvrage industriel pour lequel plusieurs variantes de fondations s'avèrent techniquement envisageables vis-à-vis des critères de portance ou de limitation des déformations.

La comparaison menée sur l'empreinte carbone permet de démontrer qu'une solution en pieux battus acier ouvert est largement plus émettrice que la solution en pieux béton armé.

L'évaluation carbone peut également, dans certains cas, amener le concepteur à réévaluer certains critères, ou seuils. On peut citer par exemple la comparaison entre une solution de fondation d'un mur de soutènement sur pieux et une autre sur inclusions rigides. De prime abord, on peut s'attendre à ce que les inclusions, généralement de plus petit diamètre et non ferrillées, aient une empreinte carbone systématiquement favorable. Dans ce cas précis, ce n'est pas le cas du fait de la nécessité du matelas de répartition en tête des inclusions, d'une part, et, d'autre part, car cela conduit à allonger le talon du mur. Certes les deux solutions ne sont pas techniquement équivalentes, mais cela illustre l'intérêt, quand cela est possible, de bien peser le rapport bénéfices-risques entre contraintes techniques et sobriété des solutions évaluées. Dans tous les cas, cela nécessite une estimation étayée, au cas par cas, à l'aide d'un outil adapté.

« La conception bas carbone suppose d'intégrer des concepts de frugalité, d'efficacité et d'optimisation »

## APPLIQUER L'ÉVALUATION CARBONE AUX OUVRAGES GÉOTECHNIQUES

Les ingénieurs géotechniciens ont un rôle important à jouer dans la décarbonation, car les solutions géotechniques qu'ils proposent ont un impact significatif sur les méthodes de construction utilisées et les quantités de matériaux mises en œuvre. Pour parvenir à réduire l'empreinte environnementale des ouvrages géotechniques, une étape indispensable est de mieux cerner les émissions de gaz à effet de serre (GES), induites par les différentes solutions qu'ils conçoivent. Cela nécessite le développement d'outils d'aide à la décision permettant d'estimer les émissions de GES des différentes variantes envisageables.

Un état des lieux des initiatives en cours permet de voir que la profession évolue rapidement sur le sujet :

- de très nombreux logiciels sont disponibles, qui couvrent le domaine de la construction en général (bâtiments notamment), mais ces logiciels sont souvent peu adaptés pour traiter les ouvrages géotechniques ;
- le domaine géotechnique le plus « étudié » est celui des terrassements et mouvements de terre (Logiciels Seve, Ecorce 2, projets TerCO<sub>2</sub>, recommandations Cerema, etc.). Ce secteur de la géotechnique est évidemment important, mais il convient de traiter également tous les autres ouvrages géotechniques.

Des logiciels dédiés à l'estimation de l'impact carbone des fondations et renforcements de sol existent, mais il s'agit

généralement d'outils développés par les entreprises pour les phases exécution des projets, avec une application parfois limitée à un type d'ouvrage géotechnique donné. Ces outils sont précis, mais les calculs d'empreinte carbone peuvent s'avérer chronophages en raison d'un nombre de paramètres important. Fort de ces constats, Terrasol a ressenti la nécessité de développer un calculateur carbone géotechnique plus universel – c'est-à-dire couvrant l'ensemble des activités induisant une interaction avec le sol (terrassment, travaux de fondation, soutènements, renforcements de sol, etc.) – et en même temps plus simple d'utilisation et plus adapté aux usages des ingénieurs géotechniciens. Le développement s'est axé sur plusieurs points d'attention :

- utiliser une méthode de calcul standardisée et conforme aux recommandations actuelles ;
- créer un outil rapide et intuitif qui peut être utilisé facilement par des non-spécialistes des problématiques bas carbone, et dont l'usage peut donc être généralisé rapidement ;
- concevoir une interface pensée pour tenir compte du type d'informations disponibles en phase études, notamment du niveau de connaissance, souvent limité à ce stade, des équipements et machines qui seront mobilisés sur chantier. Le nombre de paramètres doit être limité aux paramètres-clés, tout en donnant des ordres de grandeur suffisamment précis ;
- inclure néanmoins un mode avancé plus précis comprenant plus de paramètres pour réaliser notamment des estimations en phase EXE ;
- inclure des rendus graphiques permettant de comparer immédiatement plusieurs variantes entre elles.

## CHOIX MÉTHODOLOGIQUES

Les principales sources d'émission lors de l'exécution de fondations profondes ou de techniques d'amélioration des sols sont généralement les mêmes, bien que leur importance relative varie en fonction des différentes solutions. Celles-ci peuvent être divisées en sources primaires ou secondaires en fonction de leur importance.

Pour les travaux de fondations et de renforcement ou d'amélioration de sol, l'outil Ecow propose de s'appuyer en partie sur les résultats d'une étude menée par les acteurs de EFFC (European Federation of Foundation Contractors) et DFI (Deep Foundations Institute) dans le cadre du développement du calculateur carbone EFFC-DPI. Dans le cadre de cette étude, une quinzaine de techniques ont été étudiées et confrontées aux émissions de GES mesurées sur des projets réels.

Le calculateur EFFC-DPI donne ainsi une répartition moyenne des postes d'émission par source, notamment pour les émissions liées à la fabrication des matériaux, le transport de ces matériaux et l'énergie, mais aussi pour des postes plus secondaires (transport de machines, déplacements de personnes, immobilisations, déchets) qui sont difficiles à estimer au stade des études. L'étude montre que les émissions de GES de ces postes secondaires sont peu significatives, représentant généralement moins de 1 % du total des émissions.

Dans Ecow, l'approche retenue consiste donc à ne pas tenir compte des émissions GES pour les postes secondaires et à se concentrer sur les postes majeurs que sont les postes « matériaux », « transport des matériaux » et « énergie ». Cette approche est suffisante pour comparer l'empreinte carbone de plusieurs variantes et orienter les choix de conception et décisions des maîtres d'ouvrage.

Le calculateur intègre également les préconisations du guide du Cerema : « *Recommandations pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des projets* ». Ce guide propose des facteurs d'émission « agrégés » pour les travaux de déblais et remblais (avec ou sans traitement aux liants hydrauliques), combinant fabrication, transport et mise en œuvre, et permet d'obtenir des ordres de grandeur des émissions suffisamment précis en adoptant une démarche simplifiée.

Le principe de base du calcul d'empreinte carbone est toujours le même : les données d'activité sont multipliées par les facteurs d'émission (figure 2). Ces facteurs convertissent les émissions associées à chaque activité en équivalent CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>eq), basés sur leur potentiel de réchauffement global. Ces facteurs d'émission viennent de bases de données, publiques ou privées, qui peuvent contenir des milliers de facteurs d'émission, et couvrent un éventail plus large que les activités de fondations profondes ou d'amélioration des sols. Pour le développement de l'outil Ecow, les facteurs d'émission retenus sont issus de bases de données conformes à la norme NF EN 15804.

À noter que seul l'indicateur d'impact « réchauffement climatique » (exprimé en CO<sub>2</sub>eq par unité fonctionnelle de données d'activité) est considéré à ce stade. À terme, d'autres indicateurs d'impact seront intégrés pour permettre une analyse approfondie et globale de l'impact environnemental d'un projet.

$$\text{Emissions GES (kg éq. CO}_2\text{)} = \text{Données d'activité (UF = m}^3\text{, ml, kg...)} \times \text{Facteurs d'émissions (kg éq. CO}_2\text{/UF)}$$

(Fig. 2). Principe de calcul de l'empreinte carbone.

Différentes bases de référence ont été retenues pour les principaux produits intervenant dans les ouvrages géotechniques : une sélection d'une centaine de matériaux différents (bétons, ciments, liants hydrauliques, aciers recyclés ou non recyclés, etc.), et plus de 600 équipements divers (foreuses, grues, pelles, camions, etc.) ont été implémentés dans le calculateur. À chaque facteur d'émission est associé une fourchette d'incertitude qui est prise en compte dans le calcul, permettant d'obtenir des estimations basses et hautes des émissions de GES.

Produit/Activité	Source utilisée
Béton	SNBPE (Syndicat national du béton prêt à l'emploi)
Ciment	ATHIL (Association technique de l'industrie des liants hydrauliques)
Acier	Ecoinvent v3.1
Transport	Ademe – Bas carbone

Sources utilisées dans la base de référence.

## ILLUSTRATION SUR UN CAS D'ÉTUDE

Nous présentons ici la comparaison entre deux solutions de renforcement pour un projet fictif de soutènement : une dalle sur micropieux et une paroi clouée. Des calculs de dimensionnement géotechnique ont été menés pour ajuster les dimensions des clous, des micropieux et de la dalle afin de s'assurer que les solutions sont comparables en termes de performance technique du renforcement et donc que les comparaisons en termes d'émissions de GES sont pertinentes.

Dans le cadre du cas d'étude, la première solution technique étudiée est une paroi clouée sur une surface de 70 m<sup>2</sup> comportant 4 lits de clous et un parement en béton projeté. Les principales caractéristiques de la paroi clouée sont les suivantes :

- 340 ml de clous de diamètre de forage 120 mm avec barres GEWI ;
- sur-volume de coulis : 5 % ;
- béton projeté : épaisseur 15 cm, 2 nappes de treillis soudés.

Cette solution conduit aux émissions carbone suivantes : ●●●

Émissions (t <sub>eq</sub> CO <sub>2</sub> )	Fourchette d'incertitude		
	Basse	Moyenne	Haute
	13	19	27

Évaluation des émissions de GES de la solution paroi clouée pour différentes fourchettes d'incertitude.

●●● La figure 3 montre graphiquement la décomposition de l’empreinte carbone de la solution paroi clouée pour la fourchette moyenne d’incertitude.



(Fig. 3). Décomposition de l’empreinte carbone pour la solution paroi clouée.

Dans le cadre du cas d’étude, la seconde solution étudiée est une dalle sur micropieux. Les principales caractéristiques de cette solution sont les suivantes :

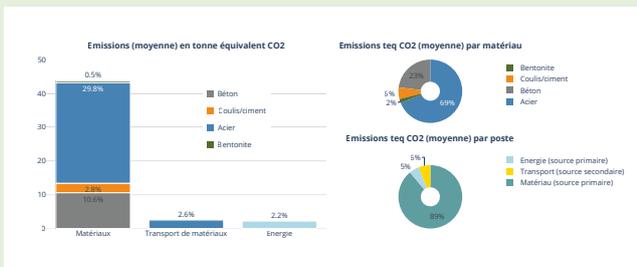
Émissions (t <sub>eq</sub> CO <sub>2</sub> )	Fourchette d’incertitude		
	Basse	Moyenne	Haute
	35	48	64

**Évaluation des émissions de GES de la solution dalle sur micropieux pour différentes fourchettes d’incertitudes.**

- 28 micropieux de diamètre 250 mm armés de tubes pétroliers et de longueur 15 m ;
- tubage provisoire pour le maintien des parois de forages pendant l’exécution ;
- sur-volume lié à l’injection : 5 %.

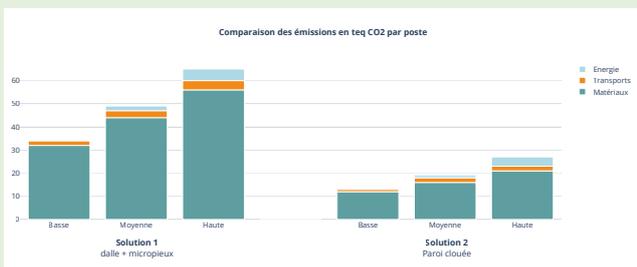
Cette solution conduit aux émissions carbone suivantes :

La figure 4 montre la décomposition de l’empreinte carbone de la solution dalle sur micropieux pour la fourchette d’incertitude moyenne.



(Fig. 4). Décomposition de l’empreinte carbone pour la solution dalle sur pieux.

L’outil permet au concepteur de fournir un nouvel éclairage au maître d’ouvrage, en complément des objectifs financiers et de délais, à l’aide d’une comparaison lisible et quantifiée des émissions de GES des différentes solutions techniques. La figure 5 montre que la solution de dalle sur micropieux est, pour ce cas d’étude, plus émissive que la solution paroi clouée,



(Fig. 5). Comparaison des émissions par poste entre les deux solutions.

et ce, pour toutes les fourchettes d’incertitude. Cela s’explique par le fait que les micropieux présentent une longueur importante pour garantir un ancrage dans le substratum. Cela met en jeu des quantités de matériaux (armature et coulis) plus importantes que pour la solution de clouage.

On remarque au passage que la majeure partie des émissions est naturellement liée au poste « Matériaux » qui est la source d’émission primaire (carbone lié à la fabrication des matériaux).

En complément du calcul précédent, il convient d’inclure également dans l’étude les émissions liées aux mouvements de terre pour aménager une plateforme de travail (et ce même si le projet ne prévoit pas d’artificialisation des sols). Ces émissions sont en partie liées aux opérations de transport, à savoir le transport des matériaux depuis le site d’apport avant le chantier puis le transport jusqu’au site de mise en dépôt à la fin des travaux. À cela s’ajoute le transport interne au sein du chantier.

Les émissions de GES des opérations de terrassement comprennent aussi des émissions liées à la mise en œuvre des remblais en début de chantier et à leur excavation à la fin du chantier. Sur la base des hypothèses faites pour ce cas d’étude, ces travaux de mouvements des terres conduisent aux émissions suivantes :

Émissions (t <sub>eq</sub> CO <sub>2</sub> )	Fourchette d’incertitude		
	Basse	Moyenne	Haute
	1,7	3,0	3,9

**Évaluation des émissions de GES dues aux terrassements pour différentes fourchettes d’incertitudes.**

Dans le cas présent, les émissions complémentaires liées aux mouvements de terre sont donc limitées comparées aux émissions liées à la mise en place des solutions techniques de renforcement.

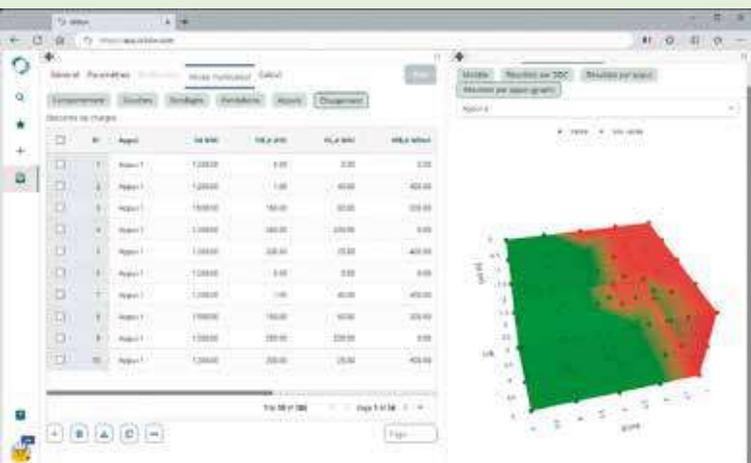
**SYSTÉMATISER L’ÉVALUATION CARBONE POUR LES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES**

L’exemple présenté illustre comment le calcul des émissions de GES peut et doit devenir une étape systématique du processus de conception des ouvrages géotechniques.

Orbow, plateforme collaborative développée par Terrasol, regroupe une base de données des projets, des reconnaissances associées, des outils d’analyses des données et de calculs des ouvrages. Cette application est conçue pour couvrir tout le cycle d’étude d’un projet géotechnique, et donc devenir un outil quotidien du géotechnicien. Le module de calcul de l’empreinte carbone s’intègre dans la bibliothèque des modules de calcul.



(Fig. 6). Bibliothèque des modules de calcul sous Orbow.



(Fig. 7). Exemple d'un calcul d'optimisation de dimensionnement de fondations superficielles sous Orbow.

Par ailleurs, la puissance des outils web s'exprime par leur faculté à se connecter facilement à d'autres bases de données, mises à jour et complétées régulièrement au fil du temps. Si aucune base de données publique ne centralise pour le moment l'ensemble des données qui ont été agrégées pour la construction de l'outil présenté ici, espérons, vu l'importance du sujet, que cela se fera rapidement.

Il ne faut pas oublier que le calcul des émissions de GES des ouvrages géotechniques doit également s'intégrer dans une évaluation plus large réalisée pour l'ensemble du projet (une solution peut générer peu d'émissions via les ouvrages

géotechniques, mais induire des émissions plus importantes via la structure par exemple).

Enfin, mis à part la norme NF 15804 qui cadre le calcul du facteur d'émission d'un produit donné, il manque à l'heure actuelle une norme qui impose le calcul systématique de l'empreinte carbone. On peut espérer que les stratégies bas carbone nationale et européenne, ainsi que la nouvelle directive CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*), devraient permettre d'avancer rapidement en ce sens. À l'échelle de notre profession, cela pourrait trouver logiquement sa place dans une future révision de la norme cadrant les missions géotechniques. À travers les différents groupes de travail de Syntec Ingénierie, du CFMS et de l'USG, le monde de la géotechnique s'est emparé du sujet. Terrasol s'engage d'ores et déjà concrètement dans cette voie, en particulier avec l'outil Ecow. ■

**Charles Bernuy**

Directeur de l'agence Rhône-Alpes  
et directeur stratégie bas carbone  
Terrasol

**Gilles Chapron**

Directeur projets Data et Orbow  
Terrasol

**Jasmine Targhaoui**

Ingénieure géotechnicienne  
Terrasol

**Beyond Monitoring**

- Plateforme de monitoring temps-réel
- Centralisation de toutes vos mesures : structure, sol, environnement
- Vos données transformées en informations utiles

monitoring@sixense-group.com  
www.sixense-group.com

Transforming your infrastructure into living assets

# Les données dans les fondations

Aujourd'hui, les données sont au cœur de nos métiers, et leur bonne utilisation est capitale pour améliorer les processus d'étude, de design et de production. Pionnier dans l'introduction de l'informatique technique dans les procédés de travaux géotechniques, Soletanche Bachy nous décrit, entre autres, ses propres solutions numériques qu'il adapte à ses métiers et à ses procédés.

## UNE ENTREPRISE À LA POINTE DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES

Les moyens électroniques et en logiciels n'ayant pas cessé de croître d'année en année, la complexité des services rendus par les fonctions informatiques aux utilisateurs en bureau d'études, en R&D et sur chantier a considérablement augmenté. Ce phénomène offre ainsi toujours davantage de temps aux utilisateurs pour se concentrer sur la création d'autres tâches ou métiers à nouvelles valeurs ajoutées. Selon ce principe, le curseur se voit donc toujours déplacé dans le sens de l'amélioration du service rendu et de la productivité pour les chantiers. Soletanche Bachy s'inscrit parfaitement dans cette démarche en pensant et en réalisant ses propres solutions numériques adaptées à ses métiers et à ses procédés.

## LES DONNÉES AU CŒUR DU PILOTAGE DES MACHINES

Sur les chantiers de Soletanche Bachy, toutes les machines de forage sont connectées et produisent des masses de données, qu'elles soient des données liées au procédé de forage acquises à travers une supervision (on parle de données de production) ou directement liées au fonctionnement et position de la machine (on parle alors de données télématiques). On est en mesure de visualiser en temps réel aussi bien l'évolution du forage en cours, sa profondeur, les déviations et les vrillages d'outil, que les régimes moteurs, la consommation du fuel et la position GPS de la machine.



Grand Paris - Pont de Sèvres.

Les pupitres de commande des machines et les supervisions sont deux interfaces historiquement différentes, avec pour seule interaction entre les deux, un flux entrant de données de la machine vers la supervision. La supervision est un organe passif qui permet à l'opérateur de contrôler en permanence le respect des tolérances, et si besoin, de corriger les trajectoires, via le pupitre de commande. Les développements de nouvelles machines

nous confrontent à de nouveaux défis dans le cadre de la convergence IT/OT. Cette convergence consiste à intégrer les systèmes informatiques traditionnels (IT) aux systèmes opérationnels (OT) pour améliorer leur efficacité et la sécurité des opérations. Cette approche permet de faire face aux enjeux tels que l'automatisation, la numérisation et la connectivité des équipements. L'interface homme-machine de notre dernière

génération d'Hydrofraises, équipées de grippeurs, illustre très bien cette convergence : elle intègre pupitre de commande (OT) et supervision (IT) en une seule interface pour l'opérateur. Cela simplifie l'interaction entre l'opérateur et la machine et permet de mieux gérer les opérations en temps réel.

L'intégralité des données est exploitée pour assister l'opérateur dans ses choix, voire automatiser des fonctions et gagner ainsi en productivité.

## ZETTA-LYZE, LA PLATEFORME BIG DATA ET IA DE SOLETANCHE BACHY

### HUB DE DONNÉES HÉTÉROGÈNES ET MULTIDOMAINES

Quelles que soient la machine de forage ou d'excavation, sa géolocalisation et la technique de travaux, les données sont collectées 24/7 en direct.

En plus des données de production et télématiques, Zetta-Lyze ingère également des données géotechniques de caractérisation des sols, provenant de sondages, de carottages, des tests en laboratoire, et dont certaines sont conformes au standard AGS.

Ce hub de données diverses permet à Soletanche Bachy de croiser des données massives de production, de sol et de matériels de forage.

Comme nous le verrons plus loin, le gros intérêt de cette possibilité est qu'elle aide à répondre à différentes questions métier ou à comprendre des types de problèmes variés, dans un délai court.



Zetta-Lyze Telematics.



Zetta-Lyze SoilLib.

Les données d'équipements sont enrichies par des informations provenant des déclarations et analyses de pannes mécaniques, hydrauliques et électriques, ainsi que d'opérations de maintenance.

Implicitement, cette multitude de flux de données massives et hétérogènes, aspirées par notre plateforme Zetta-Lyze, sont structurées de telle sorte que leur exploitation aval en est améliorée et accélérée.

En effet, nous jugeons important de restituer avec une grande réactivité pour les utilisateurs, des tableaux de bord à jour des données fraîches du chantier, des rapports, des courbes ou autre sortie de type *business intelligence*.

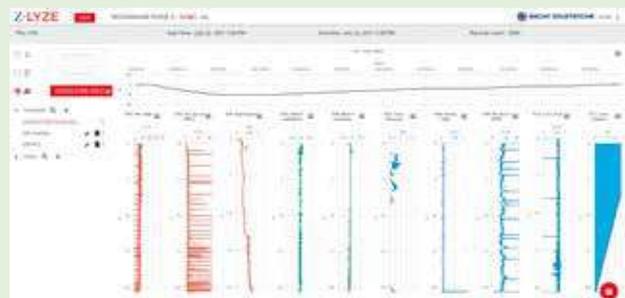
## HUB D'APPLICATIONS MÉTIERS

Au sein de cette plateforme Zetta-Lyze, résident plusieurs applications métier qui mettent en forme et présentent les données brutes ou nettoyées dont il est question dans le paragraphe précédent, mais aussi des données consolidées, agrégées ou filtrées.

D'une manière générale les applications affichent des plans, des graphiques et des tableaux qui font gagner du temps à la compréhension de l'avancement de chantier et au suivi qualité.



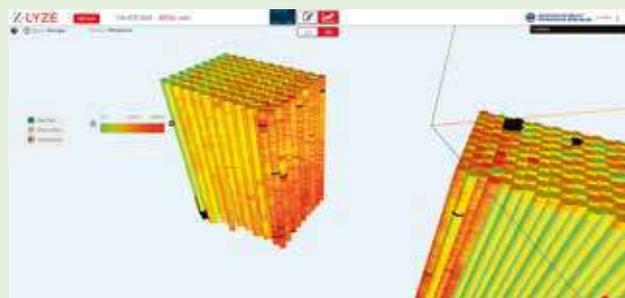
Avancement de production dans Z-Lyze.



Rapport d'excavation dans Z-Lyze.

Sont aussi mises à disposition des fonctions plus avancées faisant appel aux techniques du *big data* comme :

- la visualisation rapide en 3D des paramètres de forage ou d'excavation en fonction de la profondeur. Tous les paramètres enregistrés lors de la production sont traités et visualisables avec une granularité très fine soit par tranche de 20 cm ;



Visualisation 3D dans Z-Lyze.

- l'analyse d'utilisation des machines en fonction des paramètres de fonctionnement et du sol, pour mieux choisir les équipements nécessaires au bon déroulement du chantier dans le respect de l'environnement.

Ce tout-intégré apporte des services orientés métier, en vulgarisant le *big data* et masquant aux utilisateurs la complexité technique associée.

## LA « DATA SCIENCE » AU SERVICE DE NOS MÉTIERS ET DE NOTRE INNOVATION

Les volumes considérables de données variées que Zetta-Lyze permet de pérenniser nous servent, d'une part, à constater, décrire les faits techniques réels, et rapporter sur nos opérations de travaux ; d'autre part, l'exploitation des masses de données de travaux récoltées en direct depuis tous nos chantiers sur la planète, donne l'opportunité de révéler de la valeur ajoutée qui n'est quasiment pas visible sur la donnée simplement brute.

C'est par l'utilisation de la « science des données » et de l'intelligence artificielle que nous mettons en lumière des bonnes ou mauvaises pratiques dans nos opérations, des baisses d'efficacité, des optimisations possibles de procédés. Nous croisons des données de sources diverses pour comprendre des comportements (rendements, consommation de carburant, activités, environnement...). Nous créons des traitements et des modèles basés sur des algorithmes adaptés à nos données et nos processus.

Ce travail est dans un premier temps réalisé en mode exploratoire et incrémental de manière à atteindre un traitement jugé satisfaisant, ajusté et couvrant la quasi-totalité des cas pouvant se présenter sur l'analyse attendue.

On passe aussi par des phases invisibles pour les consommateurs : le nettoyage et la normalisation des données.

Quand cette étape est franchie, nous transformons ces livrables expérimentaux en traitements automatiques industriels. Pour cela, il nous faut les rendre stables, reproductibles et systématiques sans avoir à solliciter un utilisateur pour interagir. Au contraire nous souhaitons que ces résultats d'algorithmes à valeur ajoutée viennent à l'utilisateur et non l'inverse pour apporter de l'aide sans consommation de temps humain.

Des exemples d'atelier de *data science* que nous avons :

- l'analyse rapide « self-service » des séquences de production de pieux CFA ;
- le calcul de rendements d'excavation par Hydrofraise ;
- le calcul de rendements d'excavation par benne.

En suivant cette démarche, notre volonté est de faire bénéficier de ces outils à un public plus large dans notre groupe. Notre but étant d'en dégager des références et des indicateurs fiables.

## CONCLUSION

Le travail fait ces dernières années par Soletanche Bachy pour mettre les données au cœur du processus de production est désormais dans la phase de déploiement. Grâce aux développements de la plateforme Zetta-Lyze, nos opérateurs et ingénieurs auront plus de temps et de moyens pour capitaliser et augmenter la productivité, tout en améliorant l'impact environnemental de nos procédés. ■

**Alexandre Scarwell**, directeur ingénierie systèmes et données  
Soletanche Bachy

**Jean-François Mosser**, directeur recherche & développement  
Soletanche Bachy

# SmartSheetPile : des solutions intelligentes pour des infrastructures modernes

Dans un monde en constante évolution, l'expansion continue du commerce maritime met en évidence le besoin croissant de solutions innovantes qui non seulement garantissent la sûreté, la sécurité, la durée de vie et la maîtrise des impacts environnementaux des installations portuaires et fluviales vitales, mais optimisent également leurs performances. Dans ce contexte, le lancement de la solution SmartSheetPile, système de surveillance de l'intégrité structurelle des infrastructures développé par ArcelorMittal Palplanches, constitue une étape importante.

La solution SmartSheetPile aide les gestionnaires d'infrastructures à minimiser les arrêts, en veillant à ce que les équipements restent opérationnels et accessibles quand on en a le plus besoin. Grâce à ses capacités étendues, le système permet également d'instaurer une maintenance préventive et prédictive, en traitant de manière proactive les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent inévitables.

En associant des capteurs à des algorithmes avancés d'analyse de données, SmartSheetPile recueille des informations cruciales concernant la surveillance et la préservation de l'intégrité de l'infrastructure. Cela inclut des paramètres, tels que la corrosion, les fluctuations du niveau d'eau, la déformation, l'inclinaison, la contrainte, etc. Ces données sont ensuite transmises à une plateforme basée sur le *cloud*, où elles peuvent s'intégrer au développement d'un jumeau numérique de l'infrastructure surveillée. En outre, lorsqu'ils sont associés à des sources de données externes telles que des informations satellitaires, les algorithmes basés sur l'IA peuvent prédire des problèmes opérationnels ou environnementaux imminents et déclencher des alertes au moment opportun.

## UN SYSTÈME DE SURVEILLANCE DE L'ÉTAT DES INFRASTRUCTURES

Le récent rapport\*, publié par le groupe de travail de l'AIPCN (Association mondiale des gestionnaires et ingénieurs pour les infrastructures de transport par voie d'eau) sur la surveillance de l'état des structures portuaires et des voies navigables, souligne l'importance de la mise en œuvre de systèmes efficaces de surveillance de l'état des structures.

Ce rapport a souligné la nécessité de solutions complètes et intégrées pour le suivi de la santé structurelle des infrastructures portuaires et a recommandé l'utilisation de technologies avancées et d'approches axées sur les données.

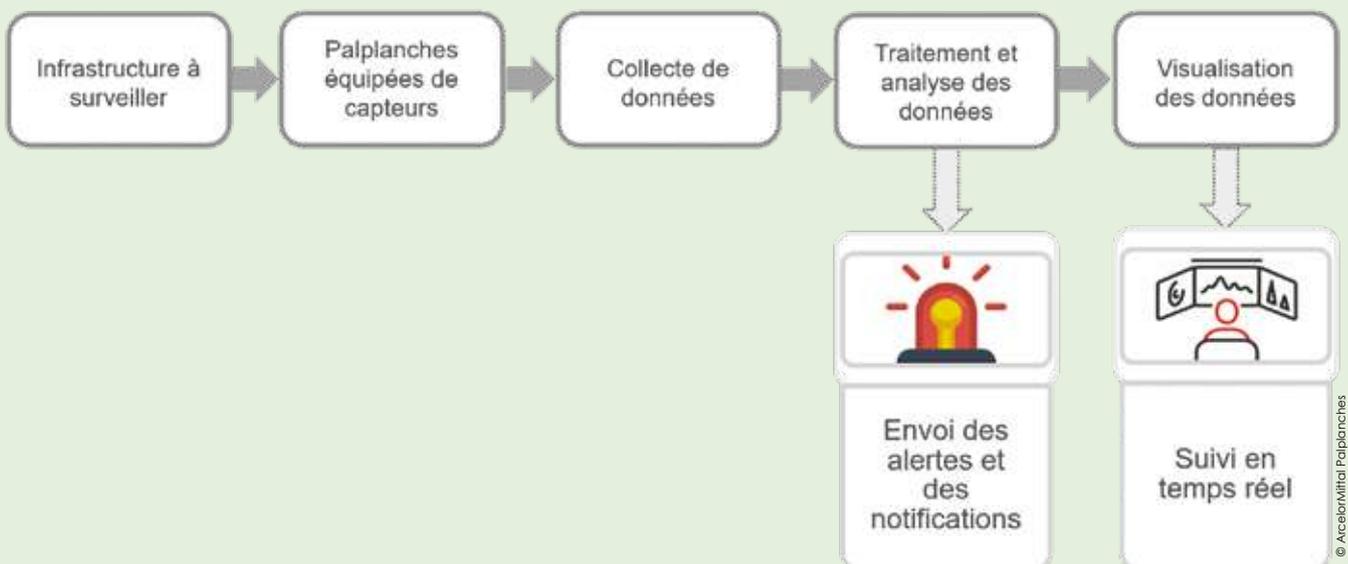
L'objectif premier d'un programme efficace de surveillance de l'état des structures peut être résumé en 4 questions-clés :

1. y a-t-il des dommages ?
2. quelle est la localisation exacte du dommage ?
3. quelle est l'étendue des dommages ?
4. quelle est la durée de vie restante de la structure avant que des problèmes de sécurité ne se posent ?

La solution SmartSheetPile permet d'atteindre les objectifs-clés décrits dans ce rapport, notamment la surveillance continue, la détection précoce des problèmes structurels et la maintenance prédictive. Par exemple, les niveaux de corrosion peuvent être surveillés et analysés en permanence, ce qui permet d'intervenir et d'effectuer des travaux de maintenance en temps voulu pour réduire les dommages.

En outre, SmartSheetPile ouvre la voie à la transformation numérique en intégrant les données collectées de manière transparente dans le jumeau numérique de la structure. Les parties prenantes disposent ainsi d'une vue multi-dimensionnelle des performances de la structure et de ses interactions avec l'environnement, ce qui facilite une gestion efficace des actifs.

De plus, ce système excelle à découvrir les capacités cachées et à identifier les vulnérabilités en recueillant des données précises sur l'état de la structure. Ces données peuvent être utilisées pour optimiser l'utilisation de la structure, en libérant tout son potentiel et en améliorant par la suite le rendement du projet tout en prolongeant sa durée de vie. Par essence, SmartSheetPile ne se contente



pas de protéger l'infrastructure, mais améliore également ses performances et sa longévité pour répondre aux exigences du monde moderne.

## PRINCIPES TECHNIQUES

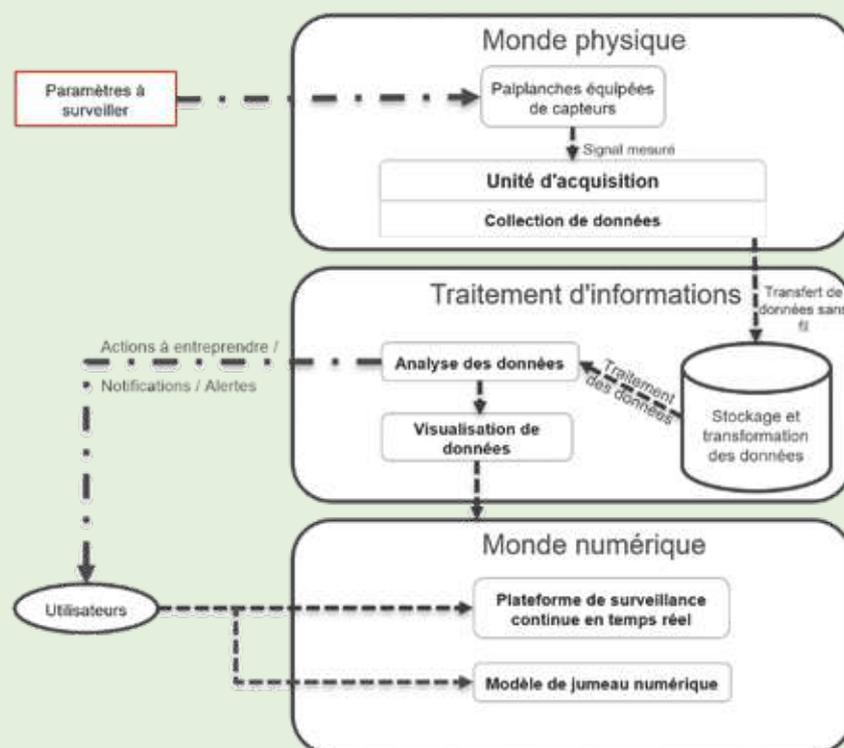
SmartSheetPile consiste en un système modulaire combinant différents types de capteurs, des systèmes d'acquisition et de stockage de données, ainsi que le traitement et l'analyse des informations. La mise en œuvre de cette solution commence par la sélection des capteurs nécessaires à l'analyse des paramètres sélectionnés. Un cas typique d'instrumentation pour un mur de quai en palplanches acier comprend des capteurs de corrosion, des jauges de contrainte, inclinomètres, accéléromètres, des capteurs de pression piézoélectriques et des paramètres environnementaux courants tels que la température.

L'emplacement des capteurs est ensuite défini en fonction des caractéristiques de la structure (longueur des palplanches, longueur du mur de quai, type de palplanches). Les capteurs sont montés dans des boîtiers de protection spécifiques soudés aux palplanches. Les câbles reliant les capteurs au système d'acquisition passent à travers des tubes en acier pour les protéger à la fois pendant le fonçage des palplanches et pendant toute la durée de vie du produit. Chaque palplanche peut être équipée de plusieurs capteurs, de chaque côté.

« *SmartSheetPile aide les gestionnaires d'infrastructures à minimiser les arrêts, en veillant à ce que les équipements restent opérationnels et accessibles* »

Le système d'acquisition se compose d'une unité centrale qui collecte les données des capteurs. Ils sont connectés directement à la centrale d'acquisition (dans un rayon de 30m), ou indirectement via des nœuds de réseau sans fil de type LoRaWAN s'ils sont situés à plus grande distance de l'unité centrale. Les nœuds de mesure et la centrale d'acquisition sont protégés par des boîtiers conçus pour résister au rude environnement maritime.

En ce qui concerne la gestion de l'énergie, 3 solutions sont possibles : un système à très faible consommation peut être alimenté par des batteries (qui devront être remplacées au bout de 5 à 10 ans, selon le type de mesures et



leur fréquence); un système alimenté par des batteries rechargées par des panneaux photovoltaïques; ou enfin une alimentation électrique filaire si un réseau électrique est disponible à proximité.

La gestion des données se fait en plusieurs étapes. Le stockage local initial et le prétraitement de base sont effectués par le système d'acquisition. Lorsqu'une quantité suffisante de données a été collectée, un bloc complet est transmis à une plateforme *cloud* via les réseaux mobiles ou une connexion filaire.

La communication à distance avec le système peut être établie de différentes manières, en fonction des besoins. Généralement, le système fonctionne de manière autonome et se connecte en toute sécurité à une plateforme dans le *cloud* pour transmettre des données de mesure et des informations sur le système.

La dernière étape consiste à analyser et à afficher les données filtrées. Les données stockées sur la plateforme *cloud* sont directement accessibles via un tableau de bord, avec la possibilité de configurer des alarmes pour détecter tout signal d'anomalie. Enfin, les données collectées à moyen et long terme, ainsi que les paramètres initiaux de l'infrastructure, serviront de base à l'entraînement des modèles de jumeaux numériques pour prédire les changements structurels.

## UNE AVANCÉE SIGNIFICATIVE

En conclusion, SmartSheetPile représente une avancée significative dans la gestion des infrastructures, conçue

pour améliorer la sécurité, la durabilité et la performance des installations portuaires critiques. Son intégration d'une technologie de capteurs de pointe avec des analyses de données permet non seulement une surveillance en temps réel, mais donne également aux parties prenantes les moyens de s'engager dans une maintenance proactive, une prise de décision basée sur les données et une optimisation de la longévité des actifs maritimes.

Le système apporte de la valeur en permettant la surveillance à distance en temps réel, de mettre en place une maintenance prédictive et préventive, et l'analyse des forces, des faiblesses et du potentiel de développement de l'infrastructure.

SmartSheetPile est déjà en cours avec l'exécution d'un premier projet de mur de quai fluvial, démontrant sa praticité et son impact immédiat dans le renforcement des infrastructures portuaires vitales. En outre, ArcelorMittal participe activement à deux projets de recherche visant à développer des analyses basées sur l'IA pour les modèles de prédiction de la corrosion.

Alors que l'industrie maritime continue d'évoluer, SmartSheetPile apparaît comme un outil indispensable qui pourrait jouer un rôle central pour assurer l'avenir d'installations portuaires, tout en évoluant continuellement grâce à la recherche et à l'application pratique. ■

**Abir Gallala**

ArcelorMittal Palplanches

\* InCom WG. Health Monitoring of Port and Waterways Structures. s.l. : PIANC, 2023.

# Le canal Seine-Nord Europe : base de données et numérique – SIG et BIM

Le canal Seine-Nord Europe est une infrastructure linéaire de 107 kilomètres de longueur, entre Aubencheul-au-Bac (Nord) et Compiègne (Oise). Cette infrastructure est divisée en barrages, dont 4 de classes A, une retenue barrage de classe A, 60 rétablissements et 3 ponts-canaux, y compris autoroutiers et ferroviaires, et comporte 7 écluses. Pour la Société du canal, il est très important de pouvoir accéder rapidement à toutes les données recueillies : parcellaires, archéologie, pyrotechnique, cavités, sondages, profil en plan, dépôts ; et de mettre ces données à disposition de l'ensemble de l'équipe et des partenaires. Détails de la prise en compte de la géotechnique dans le SIG et le BIM.

Les terrassements du canal Seine-Nord Europe en termes géotechniques nécessitent de :

- prendre en compte la nature des formations,
- surveiller les nappes,
- estimer les risques naturels liés à la qualité des sols et adapter nos techniques,
- estimer les difficultés du futur terrassement,
- préciser les essais sur sites (sondages, essais d'eau, géophysiques) et en laboratoire.

En tout, ce sont ainsi plus de 4 500 sondages, dont 822 pour la pose de piézomètres qui sont référencés et suivis sur le portail Websig, (outil de consultation pour les partenaires).

## LA GÉOTECHNIQUE ET LE SIG

Le SIG SCSNE comporte un volet géotechnique en capacité de mixer données géotechniques et données du projet canal, d'assurer un suivi des sondages réalisés ou à réaliser, de gérer un suivi des libérations foncières nécessaires et d'assurer un suivi photographique (visite de terrain) chronologique.

Le SIG pour la géotechnique permet concrètement de :

- collecter les informations : le parcellaire, cadastral, la topographie, tracé en plan, ouvrages de rétablissements, zones de cavités potentielles ou avérées, pyrotechnique, archéologie...
- localiser les points de sondages et profils (PK), notamment par rapport aux ouvrages futurs,
- faciliter leur consultation et la mise en relation avec d'autres données des métiers du canal (environnement, architecture...),
- donner accès à la consultation et à la visualisation des sondages carottés en lien avec notre stockage en carothèque,
- assurer un suivi des investigations et au préalable permettre la programmation des libérations foncières nécessaires.



Ouvrages emprise piezo.

Le SIG permet la localisation de toutes les investigations terrains (sondages et essais de laboratoire, la géophysique, les suivis hydrogéologiques,) et accompagne l'analyse en phase d'ingénierie.

## EXEMPLE DE SUIVI DU RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE

Les campagnes définies font l'objet d'un calque des points géo référencés de sondages à réaliser et réalisés en début et fin, fournis par les MOE.

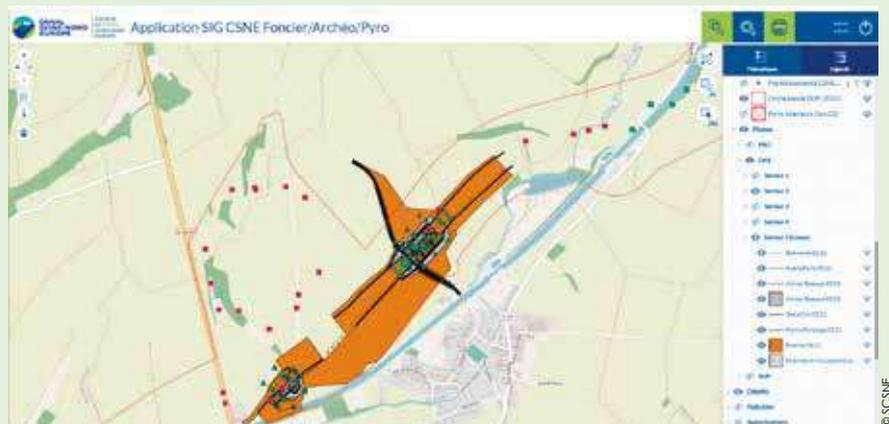
## UNE CODIFICATION POUR UN MEILLEUR SUIVI

Chaque prestataire est tenu de coder son sondage selon une instruction

SCSNE. Cette dernière permet de fournir un identifiant unique à chaque sondage. Cette codification s'établit sur l'année, le type de sondage, le secteur géographique et le numéro du sondage. Elle permet un suivi des déplacements ou annulation de sondage en cours de campagnes, par l'ajout d'un index ; ainsi, la connaissance de la position initiale et finale d'un sondage est suivie.

## FOCUS SUR LA VISUALISATION DES SONDAGES CAROTÉS

Le portail SIG donne accès en direct à la coupe lithologique et aux planches photographiques des sondages carottés. En effet, le portail SIG, pour les sondages carottés, s'ouvre directement sur



Sondages positionnés autour d'une écluse.

le serveur de stockage des rapports de laboratoire et des photos des carottes.



Fiche avec lien carothèque.



Caisse à carottes.

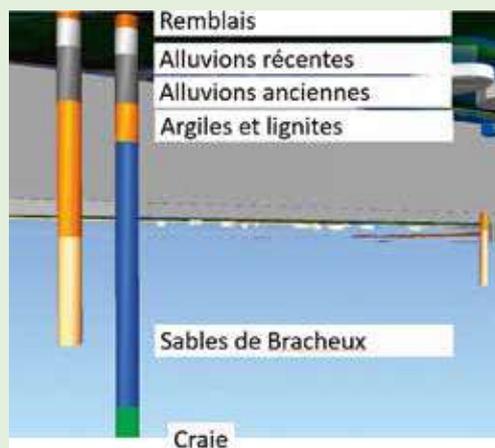
## LA GÉOTECHNIQUE ET LE BIM

L'innovation est un point-clé pour la Société du canal Seine-Nord Europe. Le BIM fait partie de cette stratégie. Très peu d'ouvrages linéaires sont, en effet, jusqu'à aujourd'hui, modélisés à partir de cette technologie. La SCSNE a pour objectif d'obtenir l'ensemble des DOE (dossiers des ouvrages exécutés) en fin de chantier en BIM (les fiches techniques ainsi que le profil géologique seront donc intégrés à la maquette).

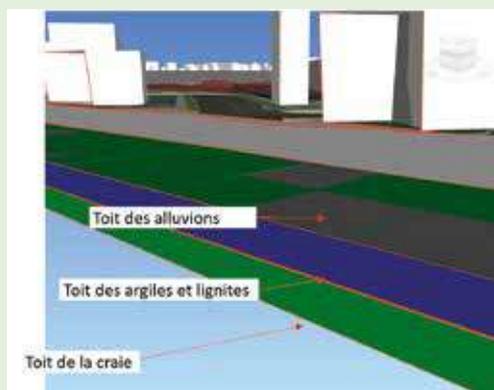
Contrairement à ce que l'on croit, le BIM n'est pas un dessin en 3D, mais le fait de mettre de l'information dans le dessin.

En ce qui concerne la géotechnique, en phase de conception, les équipes de maîtrise d'œuvre ont intégré l'ensemble des points de sondage à la maquette 3D BIM ce qui permet d'avoir une meilleure approche des terrains traversés, et donc une meilleure conception des ouvrages.

Suite à l'intégration de chaque point de sondage, les différents niveaux de faciès ont été reliés entre eux pour former des plans et ainsi obtenir, par extrapolation, une représentation des toits des couches géologiques sur l'ensemble du tracé de CSNE.

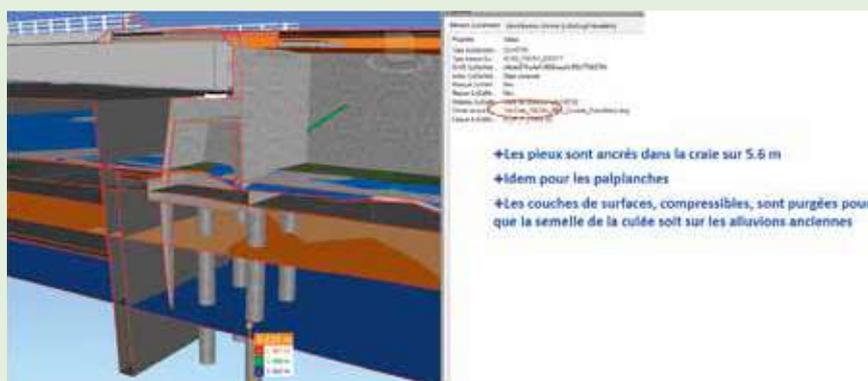


Exemple d'un sondage modélisé sur la maquette BIM PRO V2 du secteur 1.



Exemple du dessin par extrapolation des différents sondages obtenus sur la maquette BIM PRO V2 du secteur 1.

Cette représentation ne reste toutefois qu'une extrapolation entre différents sondages. Elle ne constitue donc pas une donnée d'entrée pour les études, mais permet de vérifier les résultats en quelques instants. Comme pour le SIG, la maquette permet de retrouver, en un clic, les rapports de chaque sondage. Il est également possible de vérifier, par exemple, sur l'ensemble du linéaire si les pieux des ouvrages d'art sont ancrés dans les couches de terrain indiquées dans les notes de calcul.



La maquette BIM PRO V2 du secteur 1 Pont sur le CSNE.

La maquette permet également de repérer les points singuliers, à surveiller et à travailler de façon plus précise (jonction entre différents systèmes d'étanchéité par exemple).

Aujourd'hui, le BIM est complètement intégré dans la conception du canal Seine-Nord Europe. Les logiciels sont en cours de développement permanent et correspondent de plus en plus aux demandes des ouvrages linéaires. L'objectif, à terme, est de réaliser l'ensemble des plans d'exécution à partir de la maquette qui sera ensuite complétée avec l'ensemble des documents techniques demandés aux DOE.

## CONCLUSIONS

L'utilisation de données numériques et des bases de données permet aux collaborateurs de la SCSNE d'analyser rapidement les données dont il dispose toutes thématiques confondues. Ceci permet d'optimiser les conceptions proposées, mais également de définir le besoin de levée de doutes par rapport à l'existence ou non de certaines investigations qu'il resterait à réaliser. Ces outils permettront également de mieux suivre la réalisation des travaux et de finaliser les dossiers de récolement et notamment vis-à-vis de la sécurité des barrages. ■

**Karine Mention**, cheffe de projet SIG

**Jean François Gheeraert**  
Ingénieur infrastructure S1

**Véronique Berche**, directrice risques géotechniques et barrages

# La « data » pour sécuriser la qualité des chantiers

Dans le cadre des projets du Grand Paris, le groupement Avenir (Demathieu et Bard - Implenia - Pizzaroti - BAM) avec Keller comme sous-traitant, réalise le lot 1 de la ligne 17, qui reliera Paris à l'aéroport Charles de Gaulle. Exemple du suivi 3D en continu de la réalisation des bouchons de jet-grouting sur cette ligne 17-1.

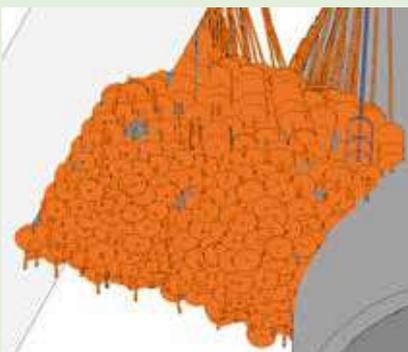


Vue globale du chantier.

## PRÉSENTATION DU PROJET

Pendant la phase d'appel d'offres, le groupement a proposé une variante de traitement des connexions puits-tunnels étudiées avec Keller. Après adjudication du chantier au groupement avec cette variante intégrée, Keller a exécuté les travaux en s'appuyant notamment sur un système élaboré de traitement de données en temps réel.

Le lot 17-1 comporte près de 6 km de tunnels et deux gares, ainsi que 6 puits intermédiaires. Ces puits sont creusés à proximité du futur tunnel. Il convient ensuite de creuser les connexions entre le tunnel et les puits à des profondeurs de 25 à 30 m sous le terrain naturel, appelés rameaux.



Vue 3D du récolement des colonnes de jet grouting de IOA 3500.

Ces rameaux sont excavés de manière traditionnelle, sous nappe. Il est donc nécessaire de sécuriser cette phase de travaux en réalisant un bloc de jet-grouting qui englobe l'ensemble de la zone terrassée. Une sécurité d'au moins 2 m de sol traité autour des zones creusées a été établie pour garantir le creusement des rameaux.

## GÉOTECHNIQUE : DES SABLES DE BEAUCHAMPS PEU FAVORABLES

Les sols rencontrés pour ce creusement sont les sables de Beauchamps, encadrés en haut par le marno-calcaire de Saint-Ouen, et en bas par les marnes et caillasses. Les bouchons de jet-grouting interféraient localement avec le Saint-Ouen et les marnes et caillasses, mais la couche géologique principale concernée est les sables de Beauchamps. Ces sables sont connus en région parisienne pour leurs caractéristiques difficiles à manier lors du terrassement.

En effet, cette couche n'a de sable que le nom, étant constitués globalement de sables très fins argileux, avec des passées d'argiles ou marnes franches, ainsi que des couches indurées. Ces sables sont compacts et gorgés d'eau et peuvent entraîner des phénomènes de boullance lors des terrassements. Il est donc indispensable de prévoir un

traitement préalable au terrassement sous nappe. Mais ces sables ne sont pas non plus injectables, de par leur granulométrie. La solution retenue fut un bloc de jet-grouting, traitant 100 % des sols de chaque volume.

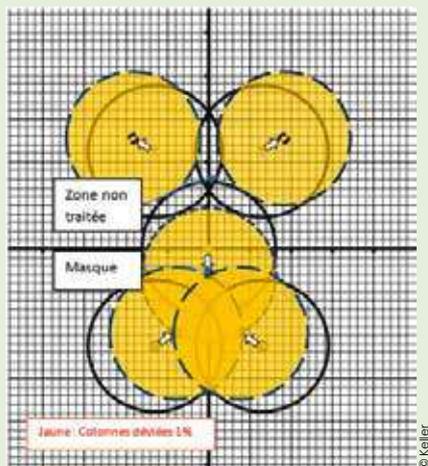
Les objectifs des blocs de jet-grouting étaient les suivants :

- renforcement des sols par un béton de sol avec une résistance de 3 MPa travaillant en voûte et sécurisant le front de taille ;
- débit résiduel faible permettant les travaux de terrassement et bétonnage des rameaux.

La nature des sables de Beauchamps est cependant peu propice au jet-grouting simple, étant géologiquement compacts, argileux et cohésifs. Il a fallu utiliser les dernières avancées techniques de Keller pour réaliser des diamètres significatifs. La technique retenue fut le jet double avec prédécoupage : un jet d'eau haute pression (500 bar) commence à découper le sol en place, aidé par un jet d'air qui le canalise et permet d'augmenter l'efficacité de la découpe. Puis, un deuxième passage mélange le sol prédécoupé avec le coulis de ciment pour créer un béton de sol. L'ajout d'air permet une meilleure remontée des spoils, diminuant les risques de soulèvement. Ce procédé est nécessairement accompagné d'un alésage important du trou de forage pour permettre une bonne remontée des spoils dans le vide annulaire entre le sol et les tiges de forages. L'emploi du matériel spécifique à Keller a permis d'obtenir des colonnes de diamètre 1,6 à 1,8 m de manière industrielle, avec des colonnes d'essais atteignant 2 m.

## PROBLÉMATIQUE DES DÉVIATIONS

La profondeur du traitement est venue compliquer la problématique. Les Eurocodes indiquent une déviation possible de 2 % lors du forage. De fait, même en l'absence de blocs et avec des tiges de rigidité renforcée, les forages dévient rapidement de 1 %. Avec 30 m de profondeur, on parle donc de 30 voire 60 cm de déviation théorique pour une colonne, et potentiellement autant pour la colonne adjacente. Avec des rayons



**Modélisation de déviation de colonnes d'1,6 m à 30 m, avec une déviation de 1 % uniquement au forage.**

d'action de 90 cm à 1 m, il devient alors impossible de déterminer une maille réaliste entre colonnes : les colonnes se chevauchent alors tellement qu'il y a risque d'« écran » entre colonnes : la colonne primaire empêche la colonne secondaire de bien se développer.

Dans la recherche d'une étanchéité en jet-grouting, il est donc dangereux de déterminer une maille de jet-grouting en fonction du diamètre et ensuite de réaliser le jet-grouting sans se préoccuper des déviations. Le procédé de jet-grouting est un procédé de substitution des sols par un béton de sol et ne traite pas le sol en dehors de la zone de découpage – même à 10 cm, seules des fissures existantes sont traitées. Des fuites peuvent rapidement arriver en cas de déviation importante, avec des sinistres importants constatés lors de l'excavation.

### SOLUTION : COLLECTER ET INTERPRÉTER LES DONNÉES EN DIRECT

Keller a donc utilisé les derniers outils développés pour sécuriser et rationaliser l'approche de ce type de blocs de jet-grouting en profondeur. L'idée est de suivre en direct les travaux réalisés, en termes de déviation et de diamètre, pour adapter la suite des travaux aux colonnes déjà réalisées :

- mesure systématique de la déviation pour 100 % des colonnes, grâce à des mesures inclinométriques dans les forages. La procédure est la suivante :

1. forage à la profondeur recherchée ;
2. dévissage de la tige au-dessus du sol ;
3. géolocalisation du haut du train de tige laissé dans le sol ;
4. passage d'une sonde inclinométrique adaptée dans le train de tige ;
5. envoi des *data* vers le logiciel 3D.

- mesure régulière des diamètres obtenus en direct grâce au système ACI, développé par Keller. Ce système breveté consiste à mettre en place temporairement des tiges métalliques dans le sol à une distance connue du forage. Le passage du jet haute pression sur ces tiges crée des ondes caractéristiques qui sont enregistrées par une sonde. Les données de la sonde et de la foreuse sont asservies pour connaître la profondeur et les caractéristiques du jet correspondant. Si le jet touche la tige, le diamètre réel est supérieur à la distance mesurée. Du fait des grandes profondeurs, il est bien sûr réalisé des mesures inclinométriques sur les tiges pour vérifier les positions relatives des tiges et du forage du jet avec la profondeur.

Plusieurs tiges métalliques peuvent être mises pour la même colonne. La remontée du jet-grouting est ensuite adaptée en direct en fonction des résultats de l'ACI.

Les mesures de diamètre à l'ACI sont faites sur les premières colonnes de production et permettent de corréliser les paramètres obtenus avec les diamètres correspondants. Cela permet de garantir et d'adapter les diamètres des colonnes suivantes, et ainsi créer une cartographie des paramètres de jet-grouting en 3D, suivant les variations géologiques. Et ces variations géologiques sont apparues sur de petites distances lors de certains plots du fait de l'hétérogénéité des sables de Beauchamps.

- l'ensemble de ces données sont intégrées dans un modèle 3D sur le logiciel Revit, avec une mise à jour journalière des travaux réalisés.

Grâce à ces collectes de données, les travaux de jet-grouting ne se déroulent pas à l'aveugle. Il est possible de déterminer précisément la géométrie des colonnes réalisées et leur position relative entre elles. Et donc, déterminer la géométrie optimisée des futures colonnes pour assurer un traitement optimal du bloc.

La procédure sur chantier fut la suivante :

- maille triangulaire originelle de 1,3 m pour des colonnes de 1,6 m, maille couramment rencontrée dans les DCE de la SGP ;

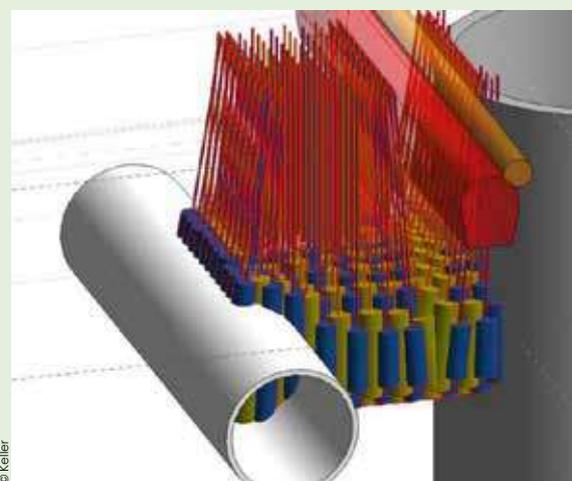
- réalisation d'une ligne primaire de colonnes de diamètre 1,80 m avec mesures de déviation systématique, et vérification des premières colonnes de production à l'ACI et vérification en continu d'un échantillon de colonnes en phase de production industrielle ;

- analyse des données dans le logiciel 3D pour déterminer la nouvelle position et le diamètre optimal des colonnes secondaires, diamètre variant entre 1,60 m si peu de déviation et 1,80 m en cas de déviations importantes ;

- réalisation des lignes de colonnes secondaires, avec suivi systématique des déviations en direct : la position de la colonne précédente influe sur la colonne à réaliser. Et parfois même la mesure en direct de la déviation d'une colonne permet d'anticiper un changement de diamètre pour assurer au mieux le contact avec les colonnes déjà réalisées ;

- analyse des données pour repérer des éventuels trous dans le bloc. Et ajout de colonnes complémentaires tertiaires localement en cas de défaut.

L'ensemble des données collectées sont ensuite insérées dans le modèle BIM du projet global.



**Vue 3D du rameau OA3500.**

### RÉSULTAT

Cette procédure a permis de prévoir au plus juste les colonnes de jet-grouting. Elle a un coût, car elle ralentit la production du jet-grouting à chaque étape de mesure, mais elle garantit un travail de qualité au droit des bouchons. Cette qualité fut confirmée à l'ouverture des rameaux. L'aspect caractéristique du ciment rencontré sur la hauteur du front de taille montrait que le sol était traité de manière uniforme, avec des débits bien inférieurs aux objectifs convenus. L'excavation des différents rameaux s'est donc déroulée dans de bonnes conditions pour les équipes du groupement Avenir. ■

**Benoît Paineau**

Responsable commercial grands projets  
Keller

**Vincent Bourcey**

Ingénieur travaux principal  
petites perforations et injections  
Keller

# 25 ans de données d'instrumentation géotechnique et structurelle, réflexions et ouvertures vers le futur

**Il y a 25 ans, vers la fin des années 1990, les premières bases de données d'instrumentation faisaient leur apparition dans le domaine de la géotechnique et des chantiers de construction. Il s'agissait d'accompagner ce qui n'était alors que le début de l'explosion des volumes de données de mesure, avec la diffusion des premiers capteurs automatiques et l'augmentation des volumes de mesures manuelles. Depuis, l'évolution et les innovations ont continué dans le domaine et la tendance va se poursuivre largement dans le futur.**

Notre industrie bénéficie des découvertes et processus mis au point dans d'autres secteurs d'activité. L'amélioration des méthodes et des capacités de traitement des données aide à gérer le risque, une priorité permanente des acteurs de la géotechnique. Les objectifs à l'heure du numérique ne sont pas vraiment différents de ceux des années 1990: fiabiliser la donnée, passer de la donnée à l'information, aider à l'analyse et à la décision. Ce sont les outils et les capacités qui progressent. Nous illustrons l'évolution des méthodes avec des études de cas et des références en France, mais aussi largement à l'étranger, puis cherchons à déchiffrer quelques caractéristiques liées à notre usage du numérique.

## 30 ANS DE TRAITEMENT DES DONNÉES EN INSTRUMENTATION GÉOTECHNIQUE ET STRUCTURELLE

Nous basons nos exemples sur les projets de fouilles urbaines, telles que les constructions de tunnels, creusement ou agrandissement de gares souterraines ou de parkings souterrains, reprises en sous-œuvre, et autres ouvrages de ce type.

## AVANT LES ANNÉES 1990: SURVEILLANCE SANS ORDINATEUR, DES DONNÉES PEU NOMBREUSES

Les instruments que nous utilisons aujourd'hui existaient déjà il y a de nombreuses années. La plupart des principes et même la conception des capteurs datent de la période 1940-1990. Dans la première moitié de cette période, les instruments furent inventés par des ingénieurs répondant aux besoins de l'observation sur le terrain. Les instruments étaient pour la plupart mécaniques, parfois hydrauliques. Au cours des années 1970-1990, les fabricants

d'instruments ont conçu des versions électriques des mêmes capteurs.

Sur la grande majorité des sites, même dans les années 1980, époque où existaient les instruments électriques et les premiers enregistreurs et ordinateurs, les capteurs étaient lus manuellement. Des techniciens ou des ingénieurs se rendaient sur le terrain, effectuaient la lecture et l'enregistraient, traitaient et présentaient les données.

Dans la majorité des cas, les lectures étaient effectuées par un personnel bien formé et, surtout, par un personnel intéressé par les résultats et les besoins du projet d'instrumentation. Le coût humain de prise des mesures entraînait une utilisation poussée des dites mesures, la donnée était rare, chère, et donc traitée avec précaution et intérêt.

De manière générale, on pourrait conclure que de bons résultats étaient obtenus si les mesures étaient réalisées par un personnel motivé et formé, mais le côté chronophage signifiait que la quantité de mesures devait être limitée.

## ANNÉES 1990: DIFFUSION MASSIVE DE L'AUTOMATISME, DES ORDINATEURS, LES AUSCULTATIONS BASCULENT DANS L'ÈRE DU NUMÉRIQUE

Avec les progrès de la technologie et de l'informatique, il est devenu possible d'enregistrer automatiquement les données des capteurs électriques. Les ordinateurs deviennent un produit industriel standard, les logiciels se développent, le numérique va pouvoir alors faire son entrée dans le monde du génie civil. Les auscultations entrent dans l'ère du « temps réel », c'est-à-dire les mesures lues et rendues disponibles automatiquement 24h/24 et 7j/7.

L'extension de la « ligne du jubilé\* », de 1994 à 1997, a été construite sous le contrôle de centaines de capteurs de

type réseaux d'électronivelles connectés à des systèmes d'acquisition automatique de données et de divers autres instruments. Les premières bases de données de surveillance sont également développées et mises en place à cette époque, fonctionnant sous environnement DOS et bientôt sous Windows 3.1. De telles bases de données et logiciels étaient forcément rustiques, mais



*Fin des années 1999, chantier Hong Kong KCRC402, base de données Smacslog, ancêtre de Geoscope et Beyond, la salle de contrôle et ses disquettes.*

certaines fonctionnaient encore au milieu des années 2000.

Dans la seconde moitié de la décennie, les premières stations totales automatiques motorisées Cyclops (théodolites automatiques), permettant le suivi en



*Fin des années 1999, les premiers théodolites motorisés Cyclops, ici à Hong Kong.*

temps réel de 30 à 100 prismes en X, Y et Z, font leur première apparition sur les chantiers de construction. En particulier, les constructions de tunnels pour trains de banlieue à Hong Kong comprenaient entre 2 et 4 machines de ce type en service par site.

Déjà, les bases de données d'instrumentation visaient à la simplification de l'analyse, avec, par exemple, des visualisations cartographiques et graphiques colorées en fonction des seuils d'alarme, et des contrôles qualité automatiques sur les données des théodolites automatiques.

## 2000-2010 : DÉMOCRATISATION DU SUIVI EN TEMPS RÉEL, L'ÈRE DU NUMÉRIQUE EST EN PLACE

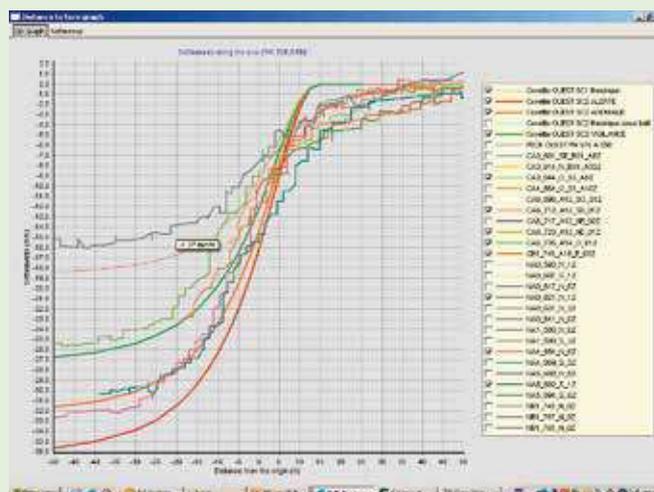
Cette décennie a vu les grands sites de surveillance en temps réel devenir la nouvelle norme.

Le métro d'Amsterdam aux Pays-Bas a probablement représenté l'étape la plus significative vers l'état actuel des pratiques. Lancé en 2000, il est resté pendant toute la décennie le « modèle » ou « l'extrême », selon les opinions. Il comprenait près de 80 théodolites automatiques, plus de 5 000 prismes de surveillance relevés en temps réel à une fréquence de 1 heure pendant les périodes de chantier, 3 000 instruments automatiques en forage (inclinomètres, extensomètres, piézomètres), 1 000 instruments automatiques de structure (électroniveaux et jauges de contrainte), un réseau wi-fi couvrant la partie de la ville de 4 km de longueur et base de données d'instrumentation spécialement conçue. Le volume de données produites, près de 50 000 mesures par heure, représentait à l'époque un défi majeur. Le projet était également novateur avec la contractualisation de pénalités financières sur absence de données.

Vers la fin des années 2010, de plus en plus de chantiers de métro intègrent de grands programmes de surveillance automatique : Barcelone, Budapest, Toulon, etc.

Le nombre croissant de capteurs et donc la quantité croissante de données enregistrées nécessitent de nouveaux systèmes logiciels pour stocker et analyser les données. La disponibilité des données alimente désormais la demande d'analyses interdisciplinaires de fusion des données et d'outils de prédiction.

L'exemple du chantier du tunnel de Toulon est emblématique. Le contrat de construction prévoit une adaptation journalière des méthodes de soutènement en fonction des prédictions de tassements fournies par le logiciel de gestion des mesures.



Deuxième tube de Toulon en 2008, graphique distance to face permettant d'anticiper les tassements futurs et d'adapter les soutènements en temps réel.

## LA DERNIÈRE DÉCENNIE : ENCORE UN SAUT EN VOLUME DE DONNÉES PRODUITES ET TRAITÉES

Au cours de cette dernière décennie, au moins trois projets en Europe ont été à l'origine d'une nouvelle augmentation majeure des mesures réalisées : Londres Crossrail, le Grand Paris, et High Speed Two, la ligne TGV entre Londres et Birmingham.

Sur ces affaires, les deux effets de l'ère numérique et de l'ère du « rejet de l'incertitude » se conjuguent. En conséquence, la quantité de données de surveillance acquises a été multipliée à nouveau par 10 à 100.

Cependant, l'ampleur du suivi effectué pour un projet doit toujours être considérée en termes de coût et de bénéfice, l'appel à une meilleure gestion des risques et à une réduction des coûts globaux du projet conduit à la demande d'un suivi plus important et de meilleure qualité. En particulier, les tunnels situés dans des zones urbaines et dans des environnements géotechniques difficiles nécessitent une surveillance plus avancée et plus étendue.

## LES PRIORITÉS DES TRAITEMENTS DES DONNÉES EN AUSCULTATION GÉOTECHNIQUE ET STRUCTURELLE

On vient de montrer l'explosion du nombre de données traitées au cours des 30 dernières années. Cependant, on se heurte potentiellement à l'écueil du trop-plein de données : un débit énorme de chiffres issus des centaines et milliers de capteurs mis en place n'apporte rien à l'utilisateur si les données ne sont pas prétransformées en informations pertinentes.

On peut lister quelques actions principales sur lesquelles nous travaillons depuis toujours, mais qui sont renforcées par les technologies récentes :

### FIABILISER LA DONNÉE

Des données erronées ou peu précises rendent leur utilisation impossible et instaillent le doute sur l'ensemble des données du projet. Toutes les

mesures du site deviennent alors rapidement inutiles.

Quelques pistes pour fiabiliser la donnée :

- dès la source, l'organisation et les priorités de l'équipe chargée des mesures, la formation, le niveau d'effort alloué à la prise des mesures, permettent d'améliorer leur qualité ;
- la redondance sur les données, géographiques (plusieurs points de mesure proches), historiques (mesures successives rapprochées) ou technologiques (plusieurs types de capteurs différents pour approcher une même information) aide à ces contrôles ;
- des systèmes automatiques de validation des alarmes sont également cruciaux, de fausses alertes entraînant rapidement une perte de confiance de l'équipe qui utilise les données ;
- des systèmes de contrôle automatiques et intelligents peuvent aider. Récemment, l'intelligence artificielle vient renforcer l'arsenal disponible.

### TRANSFORMER LA DONNÉE EN INFORMATION UTILE À L'ANALYSE ET À L'AIDE À LA DÉCISION

Les contrôles mentionnés ci-dessus, la fusion des données entre différents capteurs de même technologie ou de technologies complémentaires, les outils de calculs simples ou évolués de paramètres résultants, de niveau de confiance, de suggestion de niveau de risque, donnent de la valeur et de l'utilité aux données.

Les outils de traitement des données et de visualisation vont aider l'utilisateur à synthétiser les masses de données disponibles. L'objectif est de transformer les données en une information utile pour l'analyse et l'aide à la décision. ●●●

••• Les tableaux de bord, les affichages de cartes augmentées, les graphiques, les extrapolations sont des exemples historiques qui sont encore améliorés avec les technologies récentes.

Les présentations de prévisions météo sont l'exemple commun typique: des données fiables ou fiabilisées sont utilisées dans des calculateurs puissants et les résultats des estimations présentés de manière simple sur des tableaux de bord ou des cartes augmentées.

### QUELQUES POINTS PARTICULIERS LIÉS À L'ÈRE DU NUMÉRIQUE:

#### CAPTEURS IOT (INTERNET OF THINGS, OU « OBJETS CONNECTÉS »)

En 2022 et 2023, de nombreux dispositifs IoT ont fait leur apparition dans notre domaine et leur simplicité d'utilisation pousse à leur multiplication.

#### LE SUJET DE LA SÉCURITÉ DE L'INFORMATION ET DE LA CYBERSÉCURITÉ

Les enjeux sur les données traitées en auscultation d'ouvrage sont souvent très élevés, avec des risques structurels et humains forts.

L'un des défis des technologies de l'information, et donc aussi des systèmes de surveillance, est la sécurité de l'information. Le terme « sécurité de l'information » désigne la protection des informations et des systèmes d'information contre tout accès, utilisation, divulgation, perturbation, modification ou destruction non autorisés afin de garantir l'intégrité, la confidentialité et la disponibilité des informations.

Les logiciels et bases de données d'auscultations les plus modernes, et notamment ceux fonctionnant en mode SaaS (*Software as a Service*, c'est-à-dire hébergés et sécurisés par le prestataire mettant le logiciel à disposition), gèrent les risques liés à la cybersécurité et à l'intégrité des données.

Mais il existe encore de nombreux systèmes qui ne fournissent pas le niveau de protection requis. Et d'autre part, l'ensemble de la chaîne de mesure est concerné, y compris la partie amont, entre le capteur, le système d'acquisition et la base de données.

Bien que certains de ces domaines soient traités et pris en compte par certains produits, une généralisation serait nécessaire afin de garantir l'authenticité et la durabilité des systèmes de surveillance.

### LA DISPONIBILITÉ DES DONNÉES

La disponibilité des données, c'est-à-dire l'accès rapide et fiable à l'information, est un autre domaine qui nécessiterait une plus grande attention.

La disponibilité de données fiables devenant cruciale à beaucoup de projets, il apparaît donc nécessaire de prioriser cet élément. À cet effet, les marchés de monitoring pourraient intégrer des pénalités claires, détaillées et utilisables facilement afin de garantir le délai de mise à disposition des données et le niveau de qualité de ces données.

### L'OUVERTURE DES DONNÉES

La disponibilité des données devient une caractéristique de plus en plus importante dans la mesure où la base de nombreuses décisions repose sur les informations fournies par différents outils qui fonctionnent ensemble dans un système de surveillance.



**2022, salle de contrôle de monitoring du pont 1915 Çanakkale en Turquie, le plus long pont suspendu du monde, plateforme instrumentation Geoscope/Beyond.**

Les logiciels de traitement des données et d'aide à la décision doivent savoir fonctionner sous forme de guichet unique pour toutes les données de suivi pertinentes pour le projet.

Alors que certains systèmes ont répondu à cet appel en introduisant des référentiels de données centralisés, le concept de stockage de données décentralisé, mais d'accès centralisé aux données, attire de plus en plus l'attention de nos jours.

Ce stockage décentralisé est rendu possible par les technologies WMS (*Web Map Services*) et également la généralisation des API (*Application Programming Interface*). Les flux WMS permettent aux applications de partager entre elles des données cartographiques de type GIS, tandis que les API permettent aux développeurs de coder aisément des liens entre outils de traitement des données, l'API servant de langage commun ou de décodeur.

Au minimum, les données doivent être rendues accessibles via une API. C'est une condition nécessaire pour permettre d'accéder aux données avec d'autres outils en toute sécurité.

### LA GESTION DES DONNÉES DANS LE TEMPS

Ce sujet est l'un des oubliés de l'ère du numérique.

En fin de contrat d'instrumentation, que deviennent les données? Il serait souvent utile d'y avoir accès même plusieurs années après l'achèvement des travaux de construction d'un projet.

Le problème est le même pour tous les domaines du numérique: en cas de changement d'outil informatique ou d'application mobile, ou en cas de fin de contrat avec une solution donnée, il est complexe de récupérer ses données pour le futur. Ainsi, par exemple, des applications sportives grand public de suivi des performances, Decathlon coach, Strava, Mapmyrun ou des dizaines d'autres: en cas de changement de prestataire, il est extrêmement compliqué ou impossible de garder son historique.

Pour résoudre cette difficulté, un format d'échange commun ou un format d'archivage commun serait nécessaires. Certains domaines du numérique développent de tels outils.

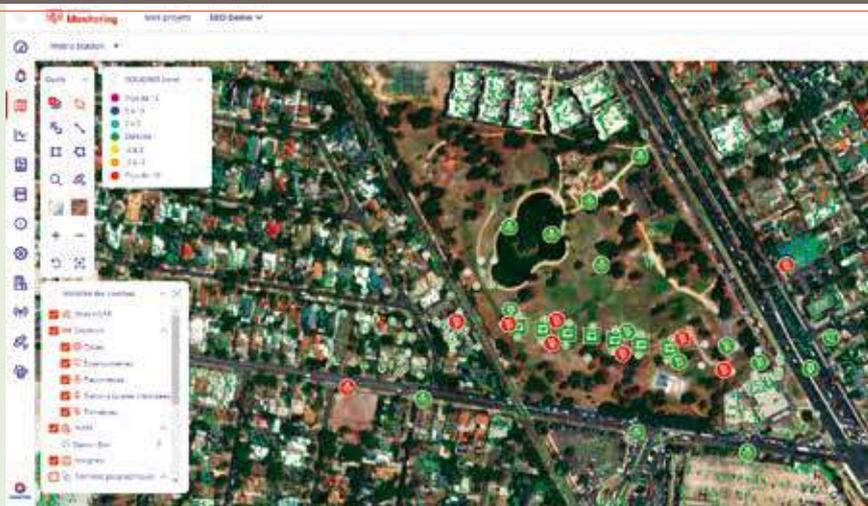
En attendant, dans notre domaine des solutions de contournement existent et sont régulièrement mises en œuvre: transfert des données via une API vers la nouvelle base si elle existe, transfert des données en formats plats XLS, CSV ou txt pour réutilisation future, archivage sécurisé des données (notamment pour les systèmes fonctionnant sur le *cloud* en SaaS).

### INTÉGRATION DE DONNÉES, FUSION DE DONNÉES

La révolution logicielle a impacté l'ensemble du processus de construction. Par exemple, la plupart des engins de chantier lourds, dont évidemment tous les tunneliers, intègrent désormais un ordinateur ou une boîte noire qui enregistre tous les paramètres importants nécessaires à la compréhension du comportement et des performances de l'engin.

Autre exemple, les mesures environnementales: outre les limites de vibrations, chaque ville a désormais des limites de bruit et de poussière que les opérations de construction ne peuvent dépasser.

Enfin, dans le seul domaine des mesures géotechniques, certaines technologies de mesures sont très différentes les



Données nuage de points satellite Atlas InSAR et points de mesures au sol fusionnés dans plateforme instrumentation Beyond Monitoring.

unes des autres, par exemple entre les capteurs sur site, les mesures au théodolite robotisé Cyclops ou les mesures par satellite Atlas InSAR.

Tous ces systèmes de mesure peuvent vivre indépendamment les uns des autres ; cependant, ils ont tous une interaction claire et tirer parti de ces interactions est essentiel. Cette intégration globale a commencé avec les projets d'injection de compensation dans lesquels les données d'injection (volume et pression du coulis à chaque point d'injection) devaient être combinées et comparées avec le tassement ou le soulèvement en temps réel. Elle est maintenant largement utilisée. Par exemple, sur des projets de tunnels où les paramètres du tunnelier tels que la pression de front et les volumes de déblais sont combinés aux données de tassement, pour permettre un meilleur ajustement des paramètres de construction en temps réel.



Tunnels du Grand Paris Express. Salle de contrôle tunnelier en surface avec informations tunnelier et mesures géotechniques, plateforme Beyond Monitoring.

## ANTICIPER ET COMPARER AUX CALCULS

La prochaine étape de cette intégration globale est de pouvoir enfin comparer le comportement du sol anticipé à partir de l'analyse de conception avec

les données de suivi de la construction aussi facilement et aussi rapidement que possible.

Il existe des sites où une telle avancée a déjà été mise en œuvre, par exemple le tunnel de Toulon, déjà mentionné au paragraphe intitulé : 2000-2010 : démocratisation du suivi en temps réel, l'ère du numérique est en place.

Mais cette fonctionnalité pourrait se décliner en expérience temps réel plus largement sur la plupart des projets de tunnels pour alimenter les modèles de construction avec des paramètres réels (les fameux jumeaux numériques géotechniques).

## INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (IA) ET « BIG DATA »

L'IA est un sujet à la mode, peut-être un peu galvaudé. Il regroupe finalement des outils informatiques permettant d'aider à la recherche d'information dans les données.

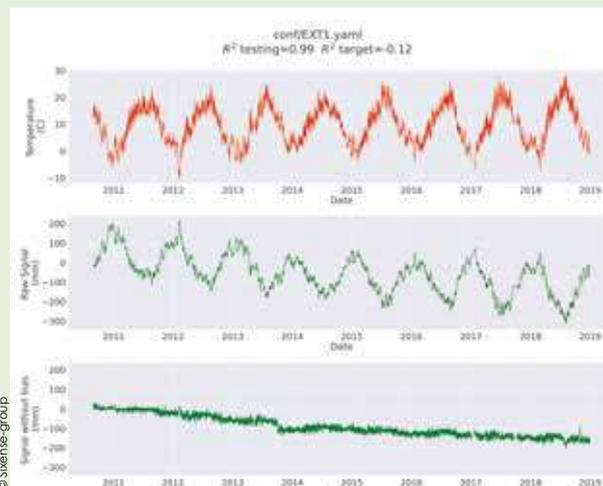
Dans notre domaine, on parle sans doute de « machine learning » plutôt que d'« intelligence artificielle » dans son sens le plus noble. Sans aucune donnée d'entrée autre qu'un « lac » (« data lake », en anglais, nous y reviendrons plus bas) de mesures, on est dans le domaine du *deep learning*, qui semble un objectif relativement éloigné à ce stade. Les cas opérationnels sont tous basés sur des sachants donnant à l'ordinateur des indications sur les relations possibles, ou une multitude d'exemples documentés, et l'algorithme détecte et affine le poids relatif des relations ou sait reconnaître des tendances dans les mesures sur la base des exemples connus.)

Les usages de l'IA en instrumentation géotechnique et structurelle sont multiples et opérationnels, en voici quelques exemples :

- traitement automatique des signaux de surveillance de ruptures dans les

câbles de précontrainte sur des ponts, pour classifier les signaux entre les artefacts extérieurs (objet tombant d'un camion sur le pont, travaux à proximité) et les enregistrements de réelles ruptures de fils ;

- recherche automatique de corrélation dans un signal entre plusieurs sources de données. Par exemple, recherche de l'impact de la température sur les mouvements d'un immeuble, ou de l'effet du niveau d'eau dans une retenue sur les mouvements du barrage, ou de l'effet cumulé des pluies des semaines passées sur un basculement de mur de soutènement. Une fois cette corrélation obtenue, on peut l'extraire des données pour surveiller l'apparition d'autres événements autrement masqués, ou mieux comprendre et même anticiper les mouvements futurs.



Intelligence artificielle appliquées aux mesures. Graphique signal extérieur en haut (ici une température), graphique mesures brutes au milieu, et graphique signal décorrélé en bas. Un mouvement apparaît nettement, alors qu'il était rendu invisible dans le signal brut.

On a mentionné plus haut les « data lake », qui font référence au « big data », un autre terme très entendu. En termes simples, on considère que l'ordinateur est capable de trouver des informations utiles dans une masse de données variées, stockées dans un immense « lac » de données. On note plusieurs initiatives dans notre domaine, mais qui semblent encore au stade de la recherche et de la préparation du futur : récupération automatique de toutes les données par les grandes entreprises, prévue par contrat avec les prestataires, et construction de ces lacs d'informations. Clairement les entreprises ont pris conscience de la valeur des données, annoncée comme « l'or noir du 21<sup>e</sup> siècle ». ■

\* La ligne du jubilé (Jubilee line) est une ligne du métro de Londres, reliant Stanmore au nord-ouest à Stratford, à l'est.

Martin Beth, Sixense

# Techno Pieux: pieux vissés pour fondation

La fondation est la partie essentielle de tout bâtiment, car elle assure la stabilité, la durabilité et la sécurité de la structure. Toutes les constructions, qu'elles soient légères ou lourdes, nécessitent des fondations plus ou moins profondes. Techno Pieux est une technologie innovante, durable et économique capable de répondre à toutes les exigences concernant des projets de petite et moyenne envergure, de la terrasse à la maison traditionnelle, du type R+1 à R+2.

Les Techno Pieux vissés sont installés à une profondeur prédéfinie par le service d'ingénierie de la société du même nom afin de s'assurer de l'obtention d'une capacité portante supérieure aux charges de la structure. En effet, lorsqu'une solution de fondation sur pieux vissés est envisagée pour un projet résidentiel, commercial ou industriel, les ingénieurs de Techno Pieux déterminent le type de pieux à utiliser en fonction du projet et des caractéristiques du sol.

Le procédé ne nécessitant aucune excavation, cela implique une baisse de coûts et une rapidité d'exécution, d'autant qu'aucun temps de séchage n'est requis puisque l'installation se fait en filière sèche. Par ailleurs, la mise en œuvre dégage une faible empreinte carbone grâce à des machines légères et compactes, fonctionnant aux fluides hydrauliques biodégradables, et aucun béton n'est injecté dans le sol.

## UNE SOLUTION AUX PROBLÈMES DE REPRISE EN SOUS-ŒUVRE

Il est fréquent de nos jours de constater des fissures sur les murs des habitations. Les causes d'apparition peuvent être multiples (contrefaçons de construction, infiltrations d'eau, mouvements de terrain, sols instables, inondations). Selon la nature du sol, les mouvements de terrain peuvent provoquer des tensions sur le bâtiment, et c'est à ce moment que les fissures surviennent. La technique Techno Pieux est simple: le service ingénierie analyse la situation, dimensionne et réalise un plan de l'implantation des pieux qui sont vissés dans le sol jusqu'à ce que ce dernier soit suffisamment dense et porteur. Puis, à l'aide de vérins, une pression est exercée sur les murs dans le but de redresser la structure.

À noter qu'une visite du projet sur place sera effectuée, elle permettra de mieux connaître les contraintes qui peuvent survenir lors des travaux. Des photos et/ou des vidéos seront prises, elles permettront de documenter les informations sur la structure à soutenir et donneront un bon aperçu de l'état des fondations existantes.

## STABILISATION PARTIELLE OU COMPLÈTE ?

Les travaux de stabilisation de fondations sont divisés en deux catégories: complets ou partiels. Lorsqu'il est clair que le dommage est causé par un problème localisé, tel un remblai incontrôlé sur un côté de la structure, une reprise en sous-œuvre partielle peut être efficace. Mais, lorsque la cause et l'étendue du dommage ne sont pas clairement identifiables, il est généralement prudent de recommander une reprise en sous-œuvre complète des fondations afin de minimiser le risque de dommages futurs. En effet, si une partie du bâtiment s'est affaissée, il est possible que d'autres parties du bâtiment s'affaissent dans le futur.

## EXEMPLE DE SUIVI D'UN CHANTIER: TRAVAUX DE RENFORCEMENT EN SOUS-ŒUVRE

L'intervention a lieu en Normandie, sur une maison mitoyenne, de deux niveaux, construite en 1997. La maison se présente comme suit: murs périphériques / extérieurs en maçonnerie porteuse, planchers courants en béton, escalier en bois, toiture en charpente bois, cloisons non porteuses légères, la maison s'étend sur deux niveaux: un RDC, qui comprend également un

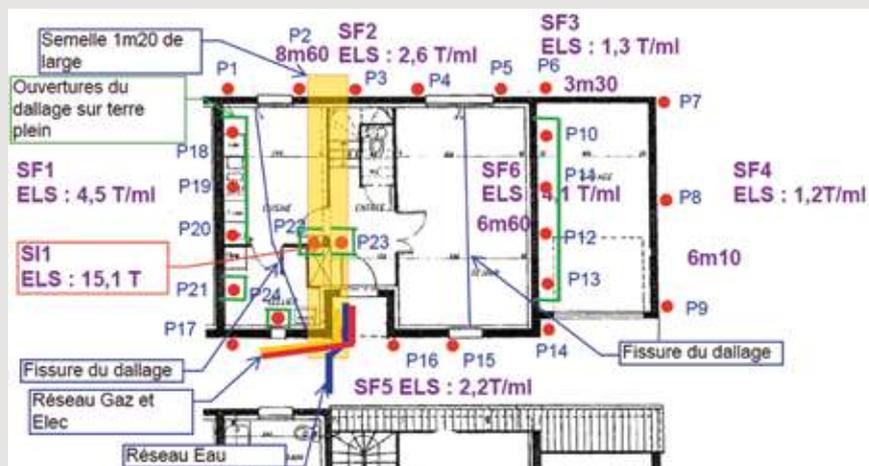
garage et un étage. Les combles ne sont pas aménagés. L'examen visuel de la structure de la maison a révélé des fissures, des lézardes et un affaissement du seuil en béton.

## PHASES DE LA REPRISE EN SOUS-ŒUVRE

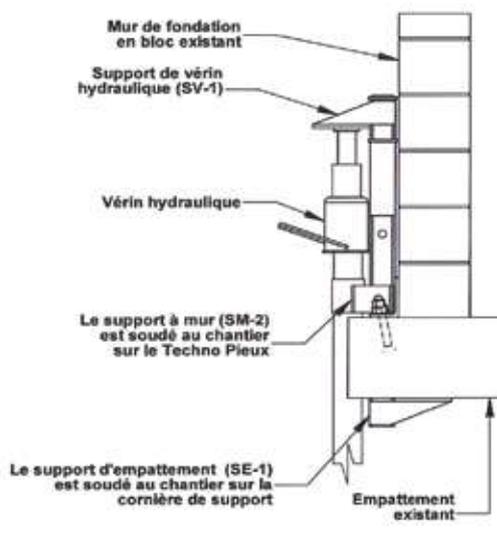


L'ouverture d'accès aux semelles filantes est réalisée au moyen d'une minipelle mécanique à l'extérieur et dans le garage, puis manuellement dans la maison.

Dans le cadre d'une reprise en sous-œuvre, la charge se trouve excentrée par rapport au fût du pieu, créant un mouvement en tête du pieu. Pour diminuer au maximum ce mouvement, les pieux doivent être installés au plus proche du mur. Il est donc nécessaire d'effectuer des entailles dans les semelles.



Implantation des pieux et charges au droit des sabots qui a été définie suite aux différentes études techniques.



Le système de reprise en sous-œuvre pour semelles est constitué du support d'empattement ou sabot SE-1 et du support à mur SM-2. Les étapes de mise en œuvre sont : 1. mise en place du sabot SE-1 ; 2. positionnement du Techno Pieux ; 3. mise en place du support à mur SM-2 avec fixation à la semelle par chevilles.

### LE TRANSFERT DES CHARGES SUR LES PIEUX

Des supports de vérins SV-1 sont fixés temporairement aux sabots SE-1. Le vérin hydraulique est positionné sur la tête du pieu pour soulever le sabot SE-1 au travers du support de vérins



Les Techno Pieux sont vissés jusqu'à obtenir la pression nécessaire permettant la reprise de charge. Des rallonges sont soudées sur site pour descendre à la profondeur suffisante.

SV-1. Le vérin est actionné et l'altimétrie de la fondation au droit du pieu est surveillée au moyen d'un niveau laser. Dès qu'un déplacement de la fondation est observé, l'opération de levage est stoppée. Un contrôle d'altimétrie est réalisé après 10 min. Si la semelle est redescendue, l'opération de levage reprend toujours par cycle de 10 min jusqu'à la stabilisation totale du pieu. Le cône de tassement sous l'hélice du pieu est créé.

### LES FIXATIONS DÉFINITIVES

Le sabot SE-1 est soudé au support à mur SM-2; ce dernier est soudé au fût



du pieu. L'opération de reprise en sous-œuvre est terminée; les vérins sont retirés ainsi que les supports de vérins SV-1. La tête de pieu est découpée au-dessus du cordon de soudure.

Enfin, les tranchées extérieures sont refermées et les ouvertures intérieures du dallage sont comblées avec du béton ferrailé et solidarisé au dallage existant. ■

**Angélique Bethfort**  
Techno Pieux France



INFRANEO



Antémys DU GROUPE INFRANEO  
Géotechnique, Essais, Expertise

## ANTÉMYS INTÈGRE LE GROUPE INFRANEO

L'acquisition de l'entreprise ANTÉMYS vient renforcer l'expertise géotechnique du Groupe INFRANEO et développer son rayonnement en région Auvergne-Rhône-Alpes.

Acteur majeur de l'ingénierie sur le marché européen, INFRANEO déploie son activité grâce à ses 450 collaborateurs en France, en Allemagne, en Belgique et en Espagne.

Le développement du Groupe est rythmé par la multidisciplinarité des compétences techniques, l'innovation continue, et une présence accrue sur les chantiers.

Notre leitmotiv :

“ PROTÉGEONS L'EXISTANT, PRÉPARONS LE FUTUR ! ”



INGÉNIERIE  
DES SOLS



CYCLE  
DE L'EAU



CONTRÔLES  
ET ESSAIS



INGÉNIERIE  
DES STRUCTURES

[www.infraneo.com](http://www.infraneo.com)

# SoilCloud enclenche la transition numérique de la géotechnique

Créée en 2019, par Lucas Janodet, ingénieur géotechnicien, et Tomasz Daktera, docteur en géotechnique, la société SoilCloud propose une solution informatique web complète, facilitant le travail de l'ingénierie géotechnique. La solution SoilCloud est un système d'information géographique (SIG) associé à une architecture de base de données, auquel s'ajoutent des utilitaires spécialement conçus pour les métiers de la géotechnique. Cette approche innovante permet à cette solution d'être utilisée par les principales ingénieries géotechniques françaises et confirme la position de spécialiste de la société dans ce segment.

## UNE SOLUTION RECONNUE EN FRANCE...

Le groupe Fondasol, conscient des enjeux de structuration de ses données géotechniques, a été la première ingénierie en France à pleinement faire confiance à SoilCloud pour l'aider dans sa démarche de transition numérique. La fin de l'année 2020 a été dédiée au pré-déploiement de cette solution, pour une utilisation opérationnelle dès le début de l'année 2021.

En 2022, c'est le groupe Abo-Erg qui souscrit à la solution SoilCloud. Mais c'est en 2023 que le basculement s'opère avec le déploiement de la solution auprès des ingénieries Ginger CEBTP, groupe Géotec et Sémofi. Ce sont ainsi près de 1300 utilisateurs dans ces 5 entreprises, représentant 50 % du marché total de l'investigation géotechnique qui utilisent SoilCloud pour traiter leurs données géotechniques. La profession, consciente du saut technologique qu'apporte cette solution, lui a attribué le trophée de l'Innovation Solscope dans le cadre du Salon de cette année.



**Tomasz Daktera (à gauche) et Lucas Janodet (à droite), cofondateurs de SoilCloud, lors de la remise du trophée de l'Innovation 2023.**

La force de SoilCloud est d'être un éditeur de solutions informatiques pilotées par des experts en géotechnique avec une expérience significative en études géotechniques. Ainsi, les fonctionnalités proposées sont en accord avec les attentes du marché. L'outil du dépouillement de l'essai pressiométrique, conforme à la version de la norme NF EN ISO 22476-4 de juin 2022, illustre bien la volonté de l'entreprise de s'ancrer dans les pratiques françaises en ingénierie géotechnique.

## ... ET À L'INTERNATIONAL

Les fondateurs de SoilCloud ont un profil international. En effet, Tomasz Daktera est franco-polonais, parle couramment trois langues (polonais, français et anglais) et dispose d'expériences significatives au Royaume-Uni et en Pologne. Lucas

Janodet, quant à lui, possède une expérience de 15 ans en dimensionnement d'ouvrages géotechniques sur des projets en France et à l'international et à acquis une expérience professionnelle en Nouvelle-Zélande. Cette ouverture internationale permet à leur société d'élargir ses services au-delà des frontières de la France. Cette ouverture internationale impose d'adapter l'offre aux pratiques des autres pays. L'essai au pénétromètre statique (CPT) est un essai largement utilisé en Pologne. Ainsi, tout comme l'essai pressiométrique pour la France, un travail important a été mené pour proposer un outil complet de dépouillement de l'essai CPT adapté aux pratiques de la Pologne et des autres pays.

S'adapter aux pratiques des différents pays est un des enjeux de SoilCloud. Un des exemples est l'essai au pénétromètre standard (SPT) dont la pratique est différente d'un pays à l'autre, bien que cet essai soit « standard ». La pratique internationale consiste à compter le nombre de coups pour faire pénétrer la sonde de 3 incréments de 15 cm (N0, N1 et N2). Cependant, en Angleterre, la pratique est de compter le nombre de coups pour 6 incréments de 7,5 cm. Et pour finir, la pratique canadienne est de compter le nombre de coups pour 4 incréments de 15 cm (N0, N1, N2 et N3). SoilCloud ayant des clients dans ces pays, la structure de la base de données doit être conçue en amont pour s'adapter à ces spécificités locales. Au-delà de la France, la société a des clients au Royaume-Uni, en Pologne, en Roumanie, au Maroc, au Sénégal et au Canada. Des discussions avec des prospects aux États-Unis, au Moyen-Orient et en Australie sont également engagées et devraient aboutir en 2024.

L'Association of Geotechnical & Geoenvironmental Specialists (AGS) a publié une norme pour le transfert électronique de données géotechniques et géo-environnementales (*Electronic Transfer of Geotechnical and Geoenvironmental Data – AGS4*). Cette norme est mondialement reconnue pour l'échange des données géotechniques. Pour SoilCloud, être compatible avec cette norme est indispensable afin de proposer une solution adaptée aux marchés étrangers. En France, de plus en plus de maîtres d'ouvrage imposent la restitution des données des campagnes d'investigations géotechniques sous format AGS. Dans ce contexte, les clients français de SoilCloud s'appuient sur son expertise pluridisciplinaire, géotechnique et informatique, pour délivrer à leurs maîtres d'ouvrage les fichiers AGS conformément aux spécifications de leurs marchés d'investigations.

Lors de la remise du trophée de l'Innovation Solscope, Jacques Robert, président du jury a déclaré : « Avec cette solution, la France est en avance sur le reste du monde : alors, profitez-en ! » Il est vrai que l'enthousiasme des 1800 utilisateurs et des prospects internationaux de SoilCloud est toujours au rendez-vous tant la solution a tout le potentiel pour changer en profondeur les pratiques internationales de l'ingénierie

géotechnique. Grâce au déploiement de SoilCloud au sein de principales ingénieries française, la France est devenue un exemple à suivre et se positionne comme un des pilotes internationaux incontournables en matière de transition numérique en géotechnique.

### UN ÉLARGISSEMENT DE LA GAMME DE PRODUITS

En 2023, SoilCloud décide d'élargir sa gamme de fonctionnalités afin d'inclure d'autres métiers dans sa stratégie globale de transition numérique en géotechnique. Ainsi, le module dédié aux travaux de fondations spéciales, en coopération avec Spie Batignolles Fondations, est créé permettant de visualiser les paramètres de forages des pieux. Ce visualisateur est couplé avec une interface permettant de contrôler la production d'un chantier (cadence de forage et volume béton) et les données géotechniques du projet. Stratégiquement, il s'agit d'un ajout important pour SoilCloud, car il permet d'inclure les ingénieurs travaux dans le processus de transition numérique de la géotechnique. Jusqu'alors seuls les ingénieurs études étaient concernés.

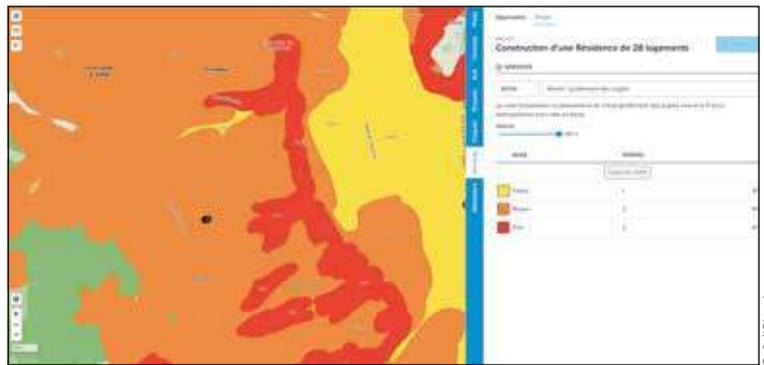


Exemple de vue de l'outil de suivi de production d'un chantier de pieux.

Cette démarche d'inclure le maximum d'acteurs de la géotechnique est une volonté de SoilCloud, raison pour laquelle des modules spécifiques ont été développés ou sont en cours de développement. Nous pouvons citer, le module dédié aux sites et sols pollués, aux essais de terrassement (essai de plaque, essai proctor...) ou le module de dépouillement des essais laboratoire.

### LES DERNIÈRES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES AU SERVICE DE LA GÉOTECHNIQUE

Bien que SoilCloud permette de dépouiller des essais géotechniques, l'expertise de la société réside dans l'organisation des données géotechniques dans une base de données dédiée. La structuration des données est un prérequis à toute valorisation d'un jeu de données. Dans tous les secteurs de notre quotidien, les données ont une valeur et il n'y a pas de raison qu'il en soit autrement dans la géotechnique. Ainsi, la structuration des données avec SoilCloud ouvre un champ de possibilité infini. Ce qui est important de souligner, c'est que chacun des clients de SoilCloud reste propriétaire de ses données. Le rôle de SoilCloud est de proposer des fonctionnalités pour que chacun de ses clients tire profit de leurs données. Ainsi, aucun commerce ni utilisation des données n'est fait. Pareillement, un jeu de données appartenant à un client A n'est jamais cédé à un client B. Ce principe est fondamental parce qu'il assure la neutralité de SoilCloud sur les données stockées dans sa base de données. La structuration des données permet d'accéder aux technologies les plus avancées en matière de science de l'informatique : *big data*, *machine learning*, intelligence artificielle... Grâce à SoilCloud, un client pourra bientôt prédire, en se basant sur un jeu de données existant, les résultats d'essais en y affectant un indice de confiance. Les campagnes d'investigations géotechniques pourront alors être optimisées pour



Exemple de vue d'un flux de données public (carte aléa RGA du BRGM).

se concentrer que sur les zones à fort aléa. Dans le secteur des fondations spéciales, les entreprises de travaux pourront anticiper de manière plus fiable les cadences et les surconsommations dans des horizons géologiques spécifiques en étudiant automatiquement les retours d'expérience réalisés sur les chantiers précédents.

Les technologies web permettent également un inter-échanges de données suivant le protocole Application Programming Interface (API). Ce principe permet à un système de consulter des données hébergées sur un serveur tiers. Dès le début de son développement, la société SoilCloud a prévu de tels connecteurs, ce qui permet de récupérer sur son interface les informations venant d'organismes publics, tels que Infoterre, le BRGM, le cadastre... Cette norme est largement utilisée de par le monde et SoilCloud prévoit d'étoffer la liste des services publics visibles sur son interface, en particulier au Canada, en Australie et en Angleterre. ■

*Tomasz Daktera, président SoilCloud*

*Lucas Janodet, directeur général SoilCloud*



**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

# Tec System : un matériel pour travaux spéciaux et fondations « made in France »

**Tec System concepteur et fabricant français de matériel de géotechnique, de sondage et de forage est installé à Naintré dans la Vienne. L'entreprise propose l'une des plus larges gammes du marché et prépare des innovations pour toujours plus de performance, de fiabilité et de respect de l'environnement.**

Pour l'entreprise, tout a commencé il y a plus de 60 ans sous le nom de Domine. Elle devient ensuite Tec System en 2001, lors de la fusion de Domine et de Bonne Espérance, deux fabricants de matériels géotechniques et de fondations spéciales, sous la houlette de Soletanche Bachy, filiale du groupe Vinci. Depuis, elle poursuit le développement de sa gamme pour ses clients en France et à l'étranger. « À ce jour, nous réalisons environ 80% du chiffre d'affaires en France », indique Sébastien Canac, directeur général de l'entreprise. « Nous travaillons sur tous les continents au travers de Soletanche Bachy et en direct, principalement au Maghreb, mais aussi en Suisse, Belgique, Espagne et en Italie. Notre objectif est de poursuivre notre progression à l'international dans les années à venir. »

## UNE MAÎTRISE DE L'ENSEMBLE DU PROCESS

Tec System regroupe toutes les compétences, depuis la conception de matériel jusqu'au service après-vente, en passant par la fabrication et la commercialisation. « Nous disposons d'un bureau d'études de 6 personnes, d'un service d'achat, d'une supply chain pour la production, avec un magasin de pièces détachées qui compte plus de 9000 références en stock, d'un service commercial et marketing, et enfin d'un service après-vente pour la réparation sur place et la mise en service des machines sur site », décrit Sébastien Canac. Pour compléter la partie service, outre les 4 techniciens qui peuvent se déplacer partout en France pour intervenir, Tec System travaille en partenariat avec l'entreprise SAML du groupe Fayat, spécialisée dans la maintenance de parcs matériels. « Ils disposent de 3 agences à Paris, à Lyon et à Marseille et, pour compléter, un réseau d'indépendants vient en renfort, ce qui permet de disposer d'un maillage complet sur le territoire et d'intervenir en moins d'une demi-journée chez le client. »

## UNE ÉQUIPE PASSIONNÉE

Au total, Tec System, c'est une quarantaine de personnes, hommes et femmes, animés par une même passion du métier. À titre d'exemple, Sébastien Canac a toujours travaillé dans les fondations spéciales. C'est d'ailleurs au sein de Tec System qu'il a commencé son parcours professionnel lors de son stage de fin d'études. « J'ai fait toute ma carrière dans le monde des fondations. C'est un milieu où, comme le sol, tous les clients et interlocuteurs sont différents. C'est véritablement passionnant. » Un enthousiasme partagé par Nisrine Mechtaly, ingénieure technico-commerciale de l'entreprise : « J'ai découvert ce monde lors d'un stage dans une autre entreprise de fabrication. Ce que j'aime particulièrement, c'est le côté humain. Nous sommes dans un métier où nous devons allier la technique et l'humain pour accompagner nos clients et trouver des solutions aux défis de leurs chantiers. »



**L'entreprise est composée d'hommes et de femmes qui, comme Nisrine Mechtaly, sont animés par une même passion pour le métier.**



**Sébastien Canac a repris la direction générale de l'entreprise en novembre 2022, à l'endroit même où il commençait son parcours professionnel.**

## UN FABRICANT « MADE IN FRANCE »

Parmi les spécificités de l'entreprise, Tec System est un concepteur-fabricant français, qui revendique le *made in France*. L'entreprise s'approvisionne en France et au plus proche de son territoire. « Nous avons une réelle démarche de proximité. Cela nous tient à cœur de faire vivre le tissu économique local. L'impact est positif, tant pour le secteur que pour l'environnement », commente Sébastien Canac. Ainsi la plupart des fournisseurs de pièces manufacturées se trouvent dans un rayon de 100 à 150 km de l'entreprise. Par exemple, l'un des principaux fournisseurs partage même un mur avec l'usine de Tec System ! Et, cette proximité apporte également de la flexibilité et la réactivité. « Nous sommes capables de livrer rapidement les machines et, si besoin, de les adapter en fonction des spécificités de nos clients, même si notre catalogue couvre déjà une grande partie des besoins », ajoute-t-il.

## UNE OFFRE POUR QUATRE DOMAINES

Autre particularité de Tec System : il s'agit d'un constructeur multimétiers. La gamme de l'entreprise couvre 4 domaines : les machines de fabrication et injection, les fondations spéciales et Cutter Soil Mixing, les sondages géotechniques, sans oublier les foreuses. Le point commun entre ces matériels ? Fiabilité, performance et facilité d'utilisation. « Notre offre d'unités de fabrication et d'injection comprend les pompes d'injection hydrauliques, le mélangeur et injecteur pneumatique MI100 P et l'Unitrailer qui permet de fabriquer le coulis, le stocker et le dessabler », détaille Nisrine Mechtaly. Tec System peut ainsi apporter une réponse clés en main sur les chantiers d'injection.

Pour les sondages géotechniques, l'entreprise propose sa gamme Abyss composée de 4 modèles pouvant ainsi descendre jusqu'à 200 m. « Mais les deux les plus demandés sont la 50 et la 75 qui répondent le mieux aux standards des marchés européens. »

Pour les fondations spéciales, l'entreprise propose la Baya, une benne hydraulique permettant l'extraction des sols qui peut se monter sur tout type de porteur selon les besoins. Le CSM (Cutter Soil Mixing) complète l'offre.

Enfin, dernière gamme, et non des moindres : les foreuses, disponibles en moteur thermique ou électrique. « Les Futuro



© TEC SYSTEM

**L'entreprise maîtrise tous les process en interne : du bureau d'études au SAV en passant par la fabrication.**

représentent environ deux tiers de notre production. C'est notre modèle phare. » Ses atouts, selon le directeur général : sa compacité, la puissance embarquée dans une si petite machine ainsi que le système électro-hydraulique. « C'est une machine qui répond aux besoins pour les travaux en reprise en sous-œuvre, pour lesquels la demande explose en raison du changement climatique. » En effet, la sécheresse endommage les fondations d'un nombre croissant d'habitations, ce qui nécessite de plus en plus d'interventions de reprise en sous-œuvre par micropieux.

**LA NOUVELLE GÉNÉRATION DE LA FUTURO DÉBARQUE EN 2024**

Le bureau d'études de Tec System a travaillé au développement d'une nouvelle génération de foreuse, la Futuro NG1, qui sera commercialisée courant 2024. « Nous avons présenté un premier modèle lors du Salon Solscope et il a été très bien accueilli par les visiteurs. Les utilisateurs actuels ont été réceptifs aux améliorations que nous avons apportées. Ils ont apprécié que nous ayons entendu leurs attentes. » La nouvelle gamme de foreuses apporte encore plus de fiabilité et de simplicité d'utilisation, tout en reprenant les qualités qui ont fait la force de la Futuro. « Nous améliorons sans cesse le compromis performance

et compacité », ajoute Sébastien Calac. Disponible en version thermique ou électrique, elle dispose de 20 % de puissance supplémentaire, sans pour autant être plus imposante. Cette nouvelle génération est actuellement en phase d'essai chez différents clients. « Une fois que nous aurons les retours de ces tests, nous pourrons alors réaliser les éventuels ajustements afin d'apporter sur le marché un produit fini l'année prochaine. »

**2024 SIGNERA LE GRAND RETOUR DE LA GAMME DOMINE DCH**

Lorsqu'il a repris la direction de l'entreprise, Sébastien Calac s'est aussi fixé pour objectif de remettre au goût du jour les foreuses Domine DCH, abandonnées il y a quelques années. Les équipes travaillent donc pour remodeler ces foreuses sur tourelle à barillet attendues sur le marché et retrouver la place que l'entreprise occupait avec la Domine DCH. « C'est une machine que l'on ne trouvait plus sur le marché et qui répond aux besoins notamment pour les travaux en reprise de sous-sols où la demande explose avec les changements climatiques. » En effet, les travaux de reprise en sous-œuvre des fondations par micropieux des habitations sinistrées par la sécheresse se font de plus en plus nombreux. « Nous nous préparons au futur très proche. Les nouvelles versions permettront très facilement de passer d'un moteur thermique à électrique, voire à d'autres sources d'énergie à l'avenir. » Un atout de taille, car cela permettra d'adapter la motorisation de la machine aux caractéristiques de chaque chantier.

Nul doute que Tec System pourra s'appuyer sur son bureau d'études intégré et sur l'écoute de terrain pour poursuivre le développement et la mise à jour de sa gamme. Avec pour ambition de proposer des matériels toujours plus performants et adaptés aux attentes des clients. ■

**Maylis Roizard**

## Nicolas Nayrand : un géotechnicien investi !

Véritable passionné de géotechnique, mais aussi des relations humaines, Nicolas Nayrand évolue dans le milieu depuis près de vingt ans. En plus de ses activités professionnelles, il s’est également engagé au sein du Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS), et plus particulièrement dans la commission scientifique et technique (CST) qu’il préside depuis un peu plus d’un an.

C’est au cours de ses études que Nicolas Nayrand découvre le monde de la géotechnique. Après une formation de génie civiliste et une formation d’ingénieur géotechnicien, il intègre le service bureau d’études de l’entreprise Franki Fondation, filiale du groupe Fayat. Après 12 années au sein du groupe bordelais Fayat, il rejoint Bureau Veritas Construction en tant que spécialiste national des ouvrages géotechniques. « Je représente la direction technique de l’entreprise et m’occupe de tout ce qui concerne les ouvrages géotechniques », précise-t-il.

Au fil des années, il a développé une véritable passion pour ce milieu qu’il partage avec beaucoup d’enthousiasme. « C’est un domaine avec beaucoup d’empirisme. On ne connaît jamais tout sur le sol ou sur le bâtiment ; et pourtant, il faut que les ouvrages géotechniques puissent assurer ce trait d’union nécessaire entre les deux afin de garantir la sécurité et la solidité des structures. C’est sans fin ; on ne maîtrise jamais totalement toutes les composantes. Et c’est ce qui est captivant », analyse-t-il.

### LA PRÉSIDENTE DE LA CST

Outre ses activités professionnelles, Nicolas Nayrand est également très

impliqué au sein du Comité Français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS) qui rassemble des experts, des ingénieurs, des chercheurs et des professionnels du secteur. Un engagement incontournable pour ce passionné de géotechnique. « C’est la société savante de référence dans le domaine de la géotechnique. Elle a 75 ans cette année. »

Plus qu’un simple membre, Nicolas Nayrand s’est engagé au sein de la commission scientifique et technique. Après un premier mandat de 3 ans, il a été réélu pour trois années supplémentaires en 2021. Depuis juin 2022, il est président de la CST aux côtés de Maxime Fonty, le vice-président. « Nous formons un véritable binôme. Ensemble, nous veillons à la continuité du travail réalisé au sein de cette commission », insiste Nicolas Nayrand. Celle-ci est composée de quinze personnes élues pour 3 ans, dont le mandat est renouvelable une fois. « Cela permet d’avoir un renouvellement des membres, de nouveaux points de vue et d’entretenir le dynamisme du comité. C’est certainement perfectible, mais le rouage est bien huilé entre renouvellement et stabilité. »

### LES MISSIONS DE LA CST

La CST pilote différents groupes de travail constitués autour de plusieurs



**En plus de son poste chez Bureau Veritas Construction, Nicolas Nayrand est également très impliqué dans la commission scientifique et technique du CFMS.**

thématiques afin de créer ou de mettre à jour les recommandations techniques sur différents types d’ouvrages géotechniques. « Nous publions régulièrement des recommandations. Nous avons actuellement une dizaine de groupes de travail qui œuvrent à la rédaction et à la publication de ces documents. La commission veille ensuite à la communication, à l’organisation de webinaires et de journées scientifiques et techniques pour diffuser ces recommandations à l’ensemble de la profession. C’est notre rôle au sein de la CST que de piloter ces groupes de travail. » En effet, l’un des rôles du CFMS est de promouvoir la recherche, le développement et la diffusion des connaissances géotechniques.

### LA NAISSANCE DES RECOMMANDATIONS POUR LES VOILES PAR PASSES

Ainsi, Nicolas Nayrand a travaillé au sein du groupe de travail sur les voiles par passes, présidé par Pascal Aguado, à l’initiative de ce projet. « Nous venons de publier les premières recommandations du CFMS sur cette solution technique. » Ces recommandations pour la conception, le dimensionnement, l’exécution et le contrôle des voiles par passes sont vouées à évoluer dans les années à venir, voire à devenir une norme. « Nous utilisons cette technique depuis 50 ans. Jusqu’alors il n’y avait aucun référentiel pour la profession afin qu’elles soient réalisées dans les règles de l’art. »

Pour que les recommandations soient bien représentatives de la profession dans son ensemble, le groupe de travail était donc constitué de personnes représentant tous les intervenants du bureau d’études aux entreprises en passant par les contrôleurs, maîtres d’œuvre et assureurs. Pour chaque groupe de travail, c’est jusqu’à une cinquantaine de personnes qui s’investissent sur des temporalités différentes. Cette large



De gauche à droite : Nicolas Nayrand, président de la CST ; Maxime Fonty, vice-président, et Pascal Aguado à l’initiative des recommandations sur les voiles par passes.

représentativité donne lieu à des débats que Nicolas Nayrand et Pascal Aguado ont modérés au sein du groupe de travail des voiles par passes dans le but de trouver le consensus. « C'est toujours enrichissant. Mais, il est essentiel de faire preuve de diplomatie. » C'est cette vaste représentativité qui permet de tirer la quintessence du travail collectif. Il est essentiel que tous les éléments de la chaîne soient représentés pour que chacun puisse se retrouver dans le travail collectif.

Après 4 années de travail, les recommandations sur les voiles par passes sont finalisées. Elles reprennent les



© Nicolas Nayrand

**Les recommandations sur les voiles par passes visent à donner les bonnes pratiques pour l'usage de cette solution.**

différentes étapes des projets de soutènement par voiles par passes. La première étant la conception. « Il était essentiel de bien définir le cadre dans lequel l'usage des voiles par passes correspond à une solution adaptée. C'est là que tout se joue. »

En effet, si la solution plaît, notamment pour son aspect compétitif, elle ne peut pas être utilisée en toutes circonstances. « Avant de retenir cette solution technique, il faudra en particulier s'assurer que la cohésion des sols est suffisante, que la bonne gestion des éventuelles venues d'eau en fond de fouille est garantie, et que la vulnérabilité des avoisinants est adaptée aux déplacements attendus des voiles réalisés par passes alternées », précise Nicolas Nayrand. Les recommandations reprennent ensuite les études d'exécution, puis le mode opératoire et les dispositions constructives, avant d'aborder le suivi, le contrôle et la réception de ces ouvrages. Des recommandations qui se veulent les plus complètes possible pour répondre aux besoins de la profession dans son ensemble.

### UN TRAVAIL D'ÉQUIPE

Cette mission au sein de la CST représente un investissement important pour Nicolas Nayrand, mais il minimise :



© Nicolas Nayrand

**Les voiles par passes sont employées depuis plus de 50 ans en France, mais jusqu'alors aucunes recommandations n'avaient été éditées.**

« Cela prend du temps, mais je ne travaille jamais seul. Je suis sans cesse en lien avec Maxime Fonty, ou encore Pascal Aguado dans le cadre du groupe de travail sur les voiles par passes. Nous essayons de former l'attelage le plus robuste possible pour que cela aboutisse à quelque chose de solide. On ne peut pas travailler seul. Il est essentiel d'échanger, de confronter les idées pour se nourrir. » Pour occuper ce poste de président de la commission scientifique et technique, il faut aimer l'échange et le collectif. « Il ne faut pas oublier que l'on n'a pas le pouvoir de contraindre, mais celui de convaincre », conclut Nicolas Nayrand. ■

**Maylis Roizard**



# APAGEO

Découvrez la dernière innovation de notre gamme de Pressiomètres® Ménard



HypePAC  
50 MPa  
APAGEO



HypePAC  
25 MPa  
APAGEO



PRESSIOMETRE®  
100 bar  
ET  
140 bar



GeoPAC  
10 MPa  
APAGEO



GeoPAC  
5 MPa  
APAGEO

NOUVEAUTÉ 2023

GeoPAC® Compact

Transport aisé avec PELI™ Case à roues  
Dimensions : 60x45x30 cm

• Option Essais Cycliques, Volume Contrôlé et Sinusoïdaux pour conformité totale avec les nouvelles normes NF EN ISO 22476-4 et 22476-5

01.30.52.35.42 | info@apageo.com | www.apageo.com

Suivez-nous :   

# La sécurisation de la route RD 900 contre les éboulements rocheux dans le secteur de La Rochaille : un défi technologique pour la sécurité des usagers de la route

Au cœur des Alpes-de-Haute-Provence, la route départementale RD 900, reliant la vallée de la Durance à l'Italie par le col de Larche (« colle della Maddalena » en Italie), traverse un territoire aussi majestueux que capricieux. Cependant, un segment de cette route, appelé « La Rochaille », situé à proximité du village de Meyronnes, fait face à des défis naturels exceptionnels. La Rochaille est un lieu où la beauté brute de la nature se heurte à sa force dévastatrice : des chutes de pierres impressionnantes, des coulées de boue et des avalanches menaçantes sont autant de périls qui guettent cette portion de la route.

## UN AXE STRATÉGIQUE ENTRE LA FRANCE ET L'ITALIE

La RD 900 ne se contente pas d'être une route de passage. Elle incarne un lien vital entre la France et l'Italie (entre la ville de Barcelonnette en France et la ville de Cuneo en Italie), facilitant le transport routier international et favorisant le tourisme alpin. Cette voie revêt une importance capitale pour l'économie locale, créant des opportunités commerciales et attirant des visiteurs du monde entier. Pour les habitants des villages de Meyronnes et Larche, situés dans la commune de Val d'Oronaye, cette route est synonyme de connexion avec le reste de la vallée de l'Ubaye. Lorsque La Rochaille se montre capricieuse, ces communautés se retrouvent isolées, mettant en péril leur accès aux services essentiels.

## ÉVÉNEMENTS HISTORIQUES ET MENACES ACTUELLES

L'histoire de La Rochaille est jalonnée d'événements exceptionnels. Parmi ceux-ci, on compte plusieurs éboulements de grande envergure et deux accidents mortels causés par des chutes de pierres en 1959 et 1987, événements qui ont laissé une empreinte indélébile dans les mémoires. Dès 1994, en réaction à ces tragédies, le Département des Alpes-de-Haute-Provence a pris des mesures en installant 300m d'écrans de filets pare-blocs le long d'une partie de la route. Cependant, malgré ces précautions initiales, les éboulements continuent de se produire avec une fréquence alarmante, et la menace de chutes de pierres et de petits blocs reste omniprésente.

Durant leur service, les écrans installés dans les années 1990 ont été plusieurs fois impactés, forçant le gestionnaire

de la route à des mesures d'entretiens très importantes. En outre, la parution en décembre 1996 de la norme française NF P95-308 sur les équipements de protection contre les éboulements rocheux et la plus récente ligne guide européenne ETAG 027 rendait désormais ces écrans obsolètes et non plus efficaces par rapport aux produits testés et certifiés proposés sur le marché.

## CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES ET TOPOGRAPHIQUES UNIQUES

La Rochaille est un lieu d'une beauté sauvage, mais aussi d'une complexité géologique unique. La route traverse un environnement à 1400m d'altitude, au pied d'un versant abrupt de 1000m de dénivelé, dominé par la majestueuse « Tête de l'homme ». Les couches géologiques de cette région appartiennent au flysch à helminthoïdes, une formation

qui fait partie de la nappe du Parpaillon. La topographie est caractérisée par des escarpements rocheux fortement plissés et fracturés, sillonnés par de vastes couloirs orientés du nord au sud. Toutefois, le cœur de La Rochaille abrite un éboulis actif, une montagne de roche s'éteignant sur plus de 400m de dénivelé, sur une distance de 300m par rapport à la route. Cette configuration géologique a incité les autorités à installer un dispositif de détection des éboulements en 2001, suite à un événement majeur ayant détruit les écrans de filets existants. Le dispositif consistait en l'envoi de signaux d'alerte grâce à un système de pendules qui permettait de capter les mouvements de terrain le long du versant. Grâce à une centrale d'acquisition des données présente le long de la route, des feux et des panneaux de signalisation pouvaient être actionnés en cas d'éboulement.



Topographie des escarpements rocheux, secteur B3A.

### PLAN DE SÉCURISATION ET ÉTUDES DE CONCEPTION

En 2018, le Département des Alpes-de-Haute-Provence a entrepris une démarche ambitieuse pour sécuriser la RD 900. Le plan de sécurisation comprend la création de galeries de génie civil pare-blocs le long des couloirs principaux et l'installation de diverses parades, telles que des écrans de filets pare-blocs, des écrans déflecteurs et des parades actives (confortement ou déroctage) sur les versants situés entre les couloirs. Cette tâche complexe a été confiée à la société Géolithe, bureau d'études français spécialisé dans la conception de protections contre les éboulements rocheux, reconnu dans le monde entier.

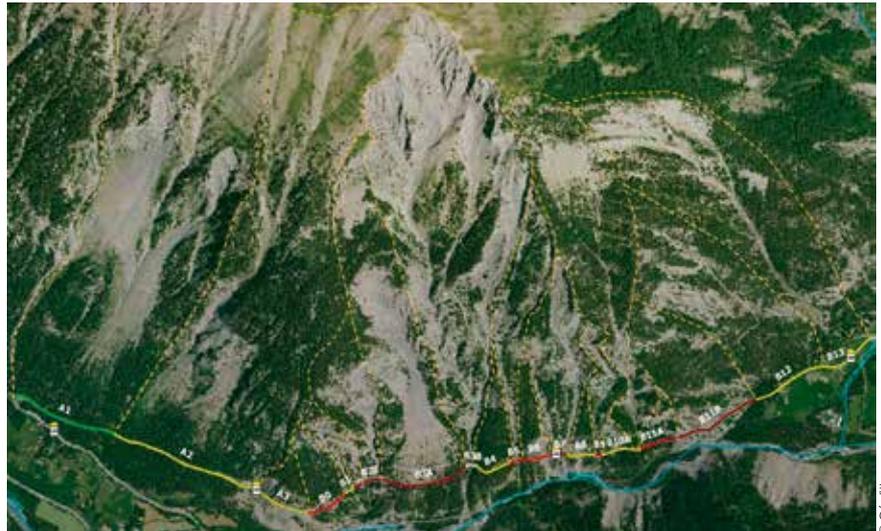
### LES ÉTAPES POUR LA SÉCURISATION DE LA RD 900

La première phase des travaux a débuté en mars 2021 et se concentre sur la sécurisation des zones de versant. Cette étape cruciale est réalisée par l'entreprise EPC France. À ce jour, 7 secteurs ont déjà été sécurisés, représentant environ 830 m de route. Simultanément, les études de conception des galeries pare-blocs, menées par Géolithe,

préparent la deuxième phase des travaux, prévue pour 2024, qui prévoit la réalisation des ouvrages en génie civil avec plusieurs galeries « casquettes » pare-blocs. L'ensemble de l'opération, comprenant la sécurisation des versants (phase 1) et la construction des galeries pare-blocs (phase 2), est estimé à 40M€ TTC, financé à hauteur de 52 % par le Département, 24 % par la Région et 24 % par l'État.

### CONCEPTION DES STRUCTURES DE PROTECTION

En 2019 et 2020, le bureau d'études Géolithe a réalisé les études de conception des parades de protection contre les éboulements rocheux. La complexité de la zone a nécessité des reconnaissances approfondies, notamment par hélicoptère, à pied, en rappel et avec des drones. Le diagnostic s'est appuyé ●●●



Secteurs définis des interventions.



# LITEF

## YOUR FIRST DRILLING HITS THE TARGET

You need precise drilling results fast and easy?

Just do the measurement and alignment with the LIPAD®-100 yourself.



Book your live demo on site

[LITEF.COM](http://LITEF.COM)

”

LIPAD®-100 has proven itself to be the best measuring device even under the toughest conditions.

Rickard Lindström  
CEO at Xploration Products AB

••• sur un modèle numérique de terrain (MNT) dérivé d'un levé photogrammétrique géoréférencé de l'ensemble du versant. Chaque secteur a fait l'objet d'une conception spécifique, prenant en compte les phénomènes géologiques, la morphologie du versant et les contraintes propres à la zone d'étude. L'objectif ultime est de minimiser les risques d'éboulements au niveau de la route.

### SOLUTIONS SUR MESURE POUR LA SÉCURITÉ

Certaines sections de La Rochaille présentent une morphologie relativement simple, avec des barres rocheuses en

normes européennes qui permettent leur certification CE. Les kits de protection pare-blocs sont garantis, car ils sont testés à échelle réelle suivant le protocole d'essais défini par le European Assesment Document EAD 340059-00-0106. Parmi ceux-ci, les nouvelles barrières RB 2000 et RB 3000 se démarquent par leur système de frein novateur et leur facilité de montage qui permet de réduire le temps d'exposition des ouvriers aux potentielles chutes de blocs. Toutes les structures se caractérisent par leur hauteur résiduelle importante (catégorie A), leur déformation dynamique limitée et leur absence d'ouverture latérale entre le poteau et



**Barrières dynamiques EPFM 5000.**

amont d'un versant boisé, encadré par deux couloirs, et un talus raide en pied. Ici, des écrans de filets pare-blocs ont été installés en partie inférieure du versant, associés à des traitements individuels, tels que le confortement ou le dérochage, pour les compartiments rocheux dépassant les capacités des écrans. L'objectif est de réduire au maximum les interventions sur les barres rocheuses, en raison de leur difficulté d'accès et de leur activité continue.

Certaines zones ont même nécessité l'utilisation d'écrans de filet à haute capacité d'énergie (5000 kJ). Ces écrans, répartis sur cinq secteurs, affichent des capacités énergétiques de 750 kJ (200m), 1000 kJ (180m), 1500 kJ (60m), 2000 kJ (70m), 3000 kJ (375m) et 5000 kJ (576m) et des hauteurs variables entre 3m (pour les 750 kJ) et 7m (pour le 5000 kJ). Les talus ont été traités par des purges, suivies de la mise en place de grillages plaqués ou pendus. Tous les écrans installés ont été fabriqués et fournis par la société Maccaferri. Ces ouvrages de protections répondent aux plus strictes



**Écran pare-blocs RB2000 – Détail des dissipateurs d'énergie.**



**Barrières dynamiques RB 750.**

le filet. Cela se traduit par des performances exceptionnelles en termes de hauteur résiduelle et d'élongation.

En plus des écrans pare-blocs testés et certifiés (selon l'EAD 340059-00-0106) et des parades actives en grillages, filets et ancrages, certains couloirs considérés comme critiques pour le risque de chute de blocs ont été équipés de plusieurs avaloirs (environ 2 000 m<sup>2</sup>) constitués de filets à anneaux, câbles et dissipateurs d'énergie. Ces ouvrages ont été conçus, fabriqués et fournis par Maccaferri spécialement pour ce chantier afin de prendre en compte les différentes contraintes du site (énergie, hauteurs et vitesses des blocs et géométrie du site).

Contrairement aux écrans pare-blocs certifiés qui ont la capacité de stopper et arrêter les blocs contre leur surface d'interception, le but de ces ouvrages de protection de type passif est celui de contrôler les trajectoires des pierres et/ou des blocs issus d'un talus ou d'un versant directement à l'amont et les guider vers une zone de réception ou de les arrêter à la base du relief. Le filet permet en particulier d'éviter les rebonds aériens et la prise de vitesse. ●●●



© Maccatenti

Grillage double torsion de protection de falaise ; MacMat R plaqué.



© Maccatenti

Avaloirs composés de dissipateurs d'énergie et filets à anneaux MacRing.



# orbow

Un véritable système d'exploitation dédié à la géotechnique

-  Travailler en mode collaboratif
-  Cartographie intégrée
-  Gestion des reconnaissances des sols
-  Nombreux outils d'analyse et de calculs



Une plateforme web avec un flux de travail fluide et complet pour tous vos projets géotechniques

### ... INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA SÉCURITÉ

Au-delà des structures de protection avancées, testées et certifiées, les maîtres d'ouvrage et maître d'œuvre se sont également tournés vers des innovations technologiques afin de renforcer la sécurité. L'une de ces avancées majeures est le système HelloMac, un système d'alerte intelligent conçu pour détecter les événements graves tels que les impacts, les détachements et les déformations des talus le long des écrans pare-blocs. HelloMac permet d'offrir une réponse en temps réel aux dangers potentiels.

Le chantier de La Rochaille marque une étape décisive en devenant le premier en France à intégrer le système HelloMac. Cette technologie novatrice a été déployée sur les écrans fournis par France Maccaferri, ainsi que sur ceux qui étaient déjà en place depuis 2019.



Les centrales d'acquisition actionnent en cas d'impact les signaux d'alerte.



Système d'alerte HelloMac sur une barrière dynamique EPFM 5000.

En cas d'impact, une série de niveaux d'alerte est déclenchée, permettant une réaction rapide et adaptée aux menaces. Cette innovation technologique réduit considérablement le temps de réponse et accroît la sécurité sur la route de La Rochaille.

Le système a été calibré par les techniciens de Maccaferri afin de détecter, selon le positionnement de la ligne d'écran sur le versant, un possible impact au MEL (énergie ultime) et/ou au SEL (énergie de service). Les HelloMac, directement installés sur les structures

de protection passives, sont connectés via radio à 2 centrales d'acquisition (Hubir) qui permettent, en cas d'impact, d'actionner des signaux d'alerte directement positionnés sur la route (feux, panneaux de signalisation et sirène), ainsi que d'envoyer un message directement aux personnels en charge de la gestion et entretien et sécurité de la route, via une application directement sur Smartphone. Étant donné la position géographique du site et la difficulté du réseau téléphonique, les centrales Hubir communiquent vers un serveur central par satellite.

#### LES INTERVENANTS DU CHANTIER

- Intervenant maître d'ouvrage : Département des Alpes-de-Haute-Provence
- Intervenant maître d'œuvre : Département des Alpes-de-Haute-Provence et Géolithe
- Entreprise adjudicataire : EPC France
- Fournisseur : France Maccaferri

#### CONCLUSION

La sécurisation du passage de La Rochaille est un défi complexe, mais vital. Ce projet, qui vise à protéger les voyageurs, les habitants locaux, ainsi qu'à maintenir l'activité économique et touristique, est une démonstration de l'ingénierie moderne et de l'innovation technologique. La combinaison de structures de protection avancées, de dispositifs de détection sophistiqués et d'une planification minutieuse marque une étape importante dans l'assurance de la sécurité sur cette route stratégique reliant la France et l'Italie. Alors que les travaux se poursuivent, La Rochaille s'affirme comme un exemple dans la manière dont la technologie peut résoudre des problèmes complexes et sauver des vies, tout en préservant la beauté naturelle des Alpes-de-Haute-Provence. ■

**Alberto Grimod**

Responsable du département  
risques naturels  
France Maccaferri

# Accompagner les grands projets d'infrastructures urbaines



# Tunnel Lyon-Turin, le travail d'un bureau d'études géotechniques

TELT<sup>(1)</sup> est maître d'ouvrage du projet de liaison ferroviaire transalpine Lyon-Turin. Ce chantier unique est réparti en 12 chantiers opérationnels (CO) entre la France et l'Italie pour, à terme, réaliser un tunnel de base de 57,5 kilomètres et au global 162 kilomètres de galeries. L'avancement à septembre 2023 de l'excavation et des constructions dépasse 20 %.



Intérieur du tunnel – CO5a – juillet 2023.

TELT a attribué le contrat de 220M€ pour le lot CO5a au groupement nommé Lyto et composé de Vinci Construction Grands Projets, Dodin Campenon Bernard, Vinci Construction France, Webuild et Bergteamet. Le groupement Egis/Alpina est chargé de la maîtrise d'œuvre.

Les matériaux extraits durant l'ensemble des travaux sont soit valorisés par recyclage dans les constructions du tunnel, soit utilisés pour la réhabilitation et la renaturalisation de sites identifiés sur le territoire. Sur le lot CO5a les matériaux sont mis en dépôt.

Les déblais du marché CO5a sont issus des puits de ventilation d'Avrieux (500 m de profondeur, 5,2 m de diamètre), d'un tronçon du site de sécurité (dont une galerie de 2,5 km, section 50 à 90 m<sup>2</sup>) et des 7 cavernes (791 m, section 200 à 400 m<sup>2</sup>) qui serviront à l'assemblage des tunneliers pour creuser ensuite en direction de l'Italie. L'excavation des matériaux est prévue de 2020 à 2024, soit une durée totale de 4 ans.

Les déblais rocheux nommés Matex sont extraits principalement par méthode traditionnelle, c'est-à-dire par explosifs, mais aussi par des tunneliers de type

Raise Boring Machine (puits). À la sortie de cette descendrie, les matériaux sont réceptionnés sur les sites des Moulins et des Tierces, au niveau de Modane.

À la demande et pour le compte du groupement Lyto, le bureau d'études géotechniques Confluence intervient

dans le cadre d'une mission de type G3 – Phase étude et suivi, sur les communes de Avrieux/Villarodin-Bourget/Modane (Savoie) comportant :

- l'aménagement du site des Moulins :
  - définition des arases et PST et le dimensionnement des plateformes avec: conditions de mise en œuvre, stabilité au poinçonnement et tassements, stabilité générale;
- l'aménagement du site des Tierces :
  - définition des arases et PST et le dimensionnement des futures plateformes avec les conditions de mise en œuvre;
  - étude de la stabilité du remblai définitif avec: conditions de mise en œuvre, stabilité au poinçonnement et tassements, stabilité générale;
  - étude de la stabilité provisoire du remblai tampon;
- la réalisation du convoyeur entre les sites des Moulins et des Tierces :
  - étude du mode de fondations du convoyeur, calculs des tassements et vérification de la portance des fondations ainsi que le calcul des tassements apportés par des remblais périphériques; ●●●



Photographie depuis le Nord sur les sites des Moulins (premier plan) et des Tierces (second plan) ainsi que sur le convoyeur – Juillet 2023.



**FRANKI**  
FAYAT FONDATION

  
**FAYAT**  
FONDATIONS

  
**SEFI-INTRAFOR**  
FAYAT

  
**FRANKI**  
FONDATION  
FAYAT

EXPERT EN FONDATIONS SPÉCIALES

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

[FONDATIONS.FAYAT.COM](http://FONDATIONS.FAYAT.COM)

- - mise en place et suivi de tassomètres sur le site des Moulins.

La zone des Moulins (environ 40 000 m<sup>2</sup>) est le site de réception, de tri et de concassage (0/250 mm) des matériaux avec un stockage provisoire et définitif de faible capacité. La zone des Tierces (environ 70 000 m<sup>2</sup>) est le site de stockage définitif principal des matériaux du marché CO5a puis du marché CO11 (volume final de 2,37 millions de m<sup>3</sup>).

Les deux sites se situent de part et d'autre de l'Arc, la construction d'un convoyeur pour transporter les matériaux a été retenue par le maître d'ouvrage dès la conception pour éviter un transport par camions, source de pollution et nuisances pour les riverains. Ainsi, depuis son démarrage, le convoyeur a déjà évité l'équivalent de 20 000 camions poids lourds pour faire transiter de l'ordre de 10 % du volume total.

### CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET ANOMALIES GÉOTECHNIQUES

Au droit des deux sites, les campagnes de sondages réalisées entre 1999 et 2021 ont consisté à plus de 70 fouilles à la pelle, plus d'une trentaine de sondages pressiométriques, quasiment une quarantaine de sondages pénétrométriques et plus d'une dizaine de sondages carottés; les profondeurs atteignent 50 m. De nombreux essais en laboratoire et des campagnes géophysiques ont aussi été réalisés.

L'ensemble des investigations a permis d'identifier un contexte géologique

Ces anomalies géotechniques nous ont amenés à adapter la conception initiale.

### DES TASSEMENTS, DE LA PORTANCE ET DU POINÇONNEMENT

Concernant les questions des tassements, de la portance et du poinçonnement, s'agissant de sols non saturés et non impactés par une nappe de versant généralisée, les durées de consolidation seront limitées et l'amélioration de la cohésion rapidement obtenue. À cela s'ajoute une durée de mise en œuvre importante. Finalement, nous avons considéré que la majeure partie des tassements, d'ordre métrique, sera acquise en phase d'élaboration du dépôt, et que des tassements à long terme se manifesteront dans une moindre mesure. Néanmoins, dans la zone de faible compacité, nous avons recommandé le suivi des tassements pour s'assurer *in situ* du bon comportement des remblais au fur et à mesure de leur élaboration, qui sera possible rapidement.

### STABILITÉ DU DÉPÔT

À propos de la stabilité du dépôt, le choix d'une solution dépendant de nombreuses hypothèses ou valeurs moyennes à définir, a été plus complexe. En effet, l'originalité des partages des marchés impose une montée du remblai des Tierces par deux groupements d'entreprises et deux équipes de maîtres d'œuvre différents. Malgré la réalisation

### CHOIX PARAMÈTRES ET SUIVI

Le choix des paramètres à prendre en compte dans les Matex mis en dépôt conditionne le calcul de stabilité. Après de nombreux questionnements, nous avons proposé une campagne d'essais en laboratoire afin de qualifier précisément des paramètres géomécaniques réels des Matex pour optimiser notre calcul de stabilité. Étant donné la granulométrie importante des matériaux (concassés à 0/250 mm), un essai de cisaillement à la grosse boîte 1 m x 1 m permettant de tester de façon représentative une granulométrie 0/100 mm a été effectué au sein de notre laboratoire (Saint-Vulbas-Ain) dans le cadre de nos études d'exécution G3.

Les marins sont produits par différents types d'extraction et sont variables géologiquement ce qui conduit à des granulométries très variées. Ceci peut remettre en question les paramètres géomécaniques fixés dans nos calculs de stabilité.

Tout d'abord, nous avons étudié la problématique par une analyse paramétrique permettant de conclure qu'une diminution de 15 % de l'angle de frottement se traduit par une diminution limitée à 10 % du coefficient de sécurité sur la stabilité générale. De la même façon, une augmentation de 10 % du poids volumique se traduit par une diminution limitée à moins de 1 % du coefficient de sécurité sur la stabilité générale. Dans les deux cas, il n'y a pas d'effet de « seuil ». Ainsi un suivi des variations des paramètres géomécaniques est nécessaire, mais ne remettra pas en question la conception du dépôt.

Ensuite nous avons réfléchi à un moyen de contrôler les variations possibles des coefficients géomécaniques au fur et à mesure de la mise en dépôt. La réalisation d'un essai grosse boîte engendre à la fois un coût et un délai peu compatibles avec l'avancement des terrassements. Ainsi, en parallèle de chaque essai de cisaillement à la grosse boîte, nous avons réalisé des essais de cisaillement classiques (fraction 0/5 mm, boîte de Casagrande) afin d'établir une corrélation entre ces deux essais (valable seulement pour ce type de matériaux). Cela permet un suivi plus réactif des Matex. Dès qu'une diminution de l'angle de frottement est notée, un essai de cisaillement grosse boîte peut être réalisé pour quantifier l'écart de caractéristiques sur la granulométrie réelle, valider si cela a un impact sur la stabilité et tracer la lithologie dans le dépôt. De la même façon, un essai de cisaillement à la grosse boîte est réalisé à chaque changement de faciès lithologique.



Photographies par drone du site des Tierces – Juillet 2021.

proche de la géologie attendue avec néanmoins quelques anomalies du côté des Tierces :

- présence locale d'alluvions fluviales ou de formations morainiques de granulométrie fine et de compacité faible,
- la présence locale de vides,
- l'absence du substratum dans les premiers mètres comme attendu en phase de conception.

d'une étude pour le lot CO5a qui ne met en place que le premier tiers du dépôt, nous avons dimensionné le dépôt dans son entièreté afin d'assurer que la base du remblai que nous mettons en place est compatible avec le volume que doit ajouter le lot CO11. Ainsi, le dialogue ne concernait plus seulement les intervenants du lot CO5a, mais aussi le lot CO11 puisque nos choix de réalisation les contraignent sur la suite.

### CALCULS ET NAPPES DE RENFORCEMENT

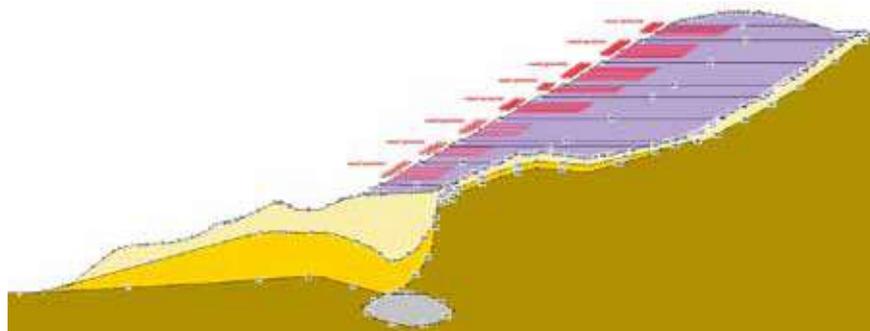
Une fois les paramètres géomécaniques des Matex mesurés et validés par l'ensemble des intervenants, nous avons réalisé 3 coupes de calculs de stabilité. Ils ont été effectués par phase c'est-à-dire par risberme en vérifiant à chaque fois la stabilité générale (à l'échelle du versant), locale (à l'échelle du remblai) et locale au droit du dernier talus monté. Si la phase n'est pas stable sans renforcements, un massif de géogrilles est ajouté.

Le choix de la longueur des nappes dépend de la géométrie des cercles de ruptures et leurs espacements et leur résistance unitaires. Au total, la coupe la plus défavorable, faisant plus de 50m de hauteur par rapport au terrain naturel, nécessite 3 massifs (24 nappes) de résistance à la rupture 225 kN/m et de 20m de longueur et 5 massifs (51 nappes) de résistance à la rupture 675 kN/m et de 20m de longueur.

des tassements absolus et différentiels acceptés au droit de chacune des gares, la difficulté réside en le respect d'un tassement différentiel maximum entre les deux ouvrages. Les fondations sont de type superficiel via un massif d'environ 24 x 12 m. À la suite des calculs des tassements propres aux fondations, les tassements dus aux terrassements effectués à proximité des massifs de fondations ont été pris en compte dans l'évaluation des tassements totaux.

La zone des Moulins était concernée par des remblais d'aménagements: 5m de remblais pour mettre en place la plateforme et un merlon paysager à proximité (distance de 5m, hauteur de 2,8m). Afin de limiter les tassements après coulage du massif, le phasage a consisté à monter l'ensemble des remblais, monitorer par suivi tassométrique, puis couler le massif une fois une stabilisation des tassements observés.

Du côté de la zone des Tierces, le convoyeur est dans la zone d'influence



Extrait d'une coupe Geostab.

### CONVOYEUR ET SUIVI TASSOMÉTRIQUE

La structure et les forces exercées sur le convoyeur se rapprochent d'un ouvrage de type pylône de télécabine. Au-delà

du remblai. Les tassements absolus et différentiels estimés sont cependant acceptables. En revanche, cette gare est située en haut d'un versant, nous avons dû démontrer que l'ajout de cet ouvrage n'a pas d'impact sur la stabilité du versant.



Photographie du convoyeur (gare aval) en cours d'installation – Septembre 2022.



Photographie de la mise en place du suivi tassométrique – Mars 2022.

### CONCLUSION : RÉALITÉ DU TERRAIN ET SUIVI DE CHANTIER

À la fin août, 28 % de l'avancement a été atteint pour le lot CO5a. Le site des Moulins, la plateforme du site de Tierces et le convoyeur sont opérationnels depuis fin 2022. Les matériaux ont été stockés provisoirement sur l'emprise du futur dépôt définitif, dans l'attente du démarrage du remblai définitif. La gestion des deux flux (convoyeur et dépôt provisoire) amène des contraintes d'exécution.

Actuellement, le sous-traitant du groupement (Guintoli), retenu pour réaliser les travaux de terrassement et le renforcement par nappe du remblai des Tierces, finalise ses plans d'exécution en concertation avec notre bureau d'études géotechniques Confluence dans le cadre de notre mission G3 – phase suivi de chantier. Notre assistance géotechnique se poursuit tout au long de la réalisation du dépôt définitif du lot CO5a pour à la fois aider à l'application pratique des différentes préconisations évoquées dans notre étude G3, mais aussi accompagner le groupement lorsqu'une anomalie ou un cas particulier sont identifiés.

Cette mission a mobilisé l'ensemble des compétences du bureau géotechnique (siège à Saint-Vulbas et agence de Chambéry) composé de sondeurs, techniciens et ingénieurs: sondages, essais en laboratoire et notamment un essai atypique avec un bâti de grande dimension pour un cisaillement sur la fraction 0-100mm des remblais, essais et auscultation sur site, calculs et dimensionnements. ■

**Agathe Duval**  
Ingénieure chargée d'études Confluence

**Pierre-Yves Vecchio**  
Gérant Confluence

1. Tunnel euralpin Lyon-Turin

## La tomographie électrique pour une étude de sol dans la zone d'estran

ArkoGeos, bureau d'études en géophysique, à l'origine toulousain, spécialisé dans les études de sous-sol, a créé il y a trois ans une agence à Saint-Malo. Cette dernière a réalisé une étude du sol par tomographie électrique pour une traversée de rivière dans le Morbihan afin d'étudier le meilleur tracé pour le réseau d'eau.

Le bureau d'études ArkoGeos est spécialisé en imagerie du sous-sol et expertise d'ouvrages par méthodes géophysiques. « Nous réalisons des études de 0 à 300m de profondeur selon les besoins, en déployant les différentes méthodes qui existent : l'électromagnétisme, la sismique (réfraction, réflexion, MASW), la tomographie électrique ou encore le géoradar. Chaque méthode a ses propres avantages et contraintes, ce qui permet d'adapter l'approche en fonction des besoins spécifiques du projet », explique Guillaume Trancart, ingénieur géophysicien, responsable de la région nord-ouest chez ArkoGeos.

La plupart du temps, le cahier des charges dans les appels d'offres mentionne la méthode qui doit être utilisée. « Mais on retrouve parfois une clause qui indique qu'il est possible de proposer une autre méthode en argumentant les atouts. Et il est à mon sens important d'avoir un bon regard technique lors des appels d'offres. Nous avons également un devoir de conseil pour nos clients. Nous veillons à proposer la solution la plus efficace, mais aussi la moins invasive possible au regard de la précision attendue. »

### DÉPLOYER LA MÉTHODE LA PLUS ADÉQUATE

Sur ce chantier au sud de la Bretagne, deux tracés de forages dirigés étaient



**L'équipe a déployé deux lignes de 475 m et 535 m, de respectivement 96 et 108 électrodes.**



**L'objectif de ce chantier était de déterminer le meilleur tracé pour la traversée d'un réseau d'eau.**

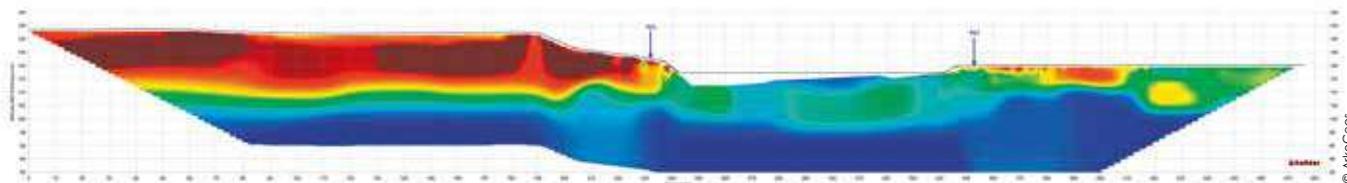
à l'étude dans le cadre du projet de restructuration et de sécurisation de la chaîne de transfert des eaux usées. L'étude de sol permettait de déterminer le tracé le plus favorable. « Les géotechniciens ont besoin de forages pour établir un modèle géologique de berge à berge. Cependant cette solution présentait des contraintes majeures, d'importants moyens et nécessitait beaucoup de temps », poursuit Guillaume Trancart. En effet les interventions sur le site étaient contraintes par les marées. « Seul un forage par jour aurait pu être réalisé, et le sol vaseux ne facilitait pas les interventions, il était alors nécessaire de disposer de barges. » Aussi, ArkoGeos a proposé d'utiliser la tomographie électrique pour étudier les différents tracés, complétée par des forages mécaniques aux extrémités. « La géophysique et la géotechnique sont très complémentaires. La combinaison des deux permet d'avoir une image complète du sous-sol. » En effet, les méthodes géophysiques fournissent des informations complémentaires aux méthodes traditionnelles d'investigation des sols. Elles permettent de détecter des hétérogénéités et de mettre en évidence les variations du sol tant verticalement que

latéralement à partir des paramètres physiques mesurés.

L'objectif de la prospection était d'aider à imager le sous-sol jusqu'à une profondeur de 50m environ, en particulier d'apprécier les ondulations du toit du substratum granitique. « Nous ne sommes pas en concurrence avec les géotechniciens, mais bien complémentaires. Les forages aux extrémités permettent de confirmer la coupe géophysique obtenue », précise l'ingénieur géophysicien.

### LA TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE, UNE SOLUTION AVANTAGEUSE

La tomographie électrique présentait en effet plusieurs atouts dans ce contexte. « Le milieu dans lequel nous sommes intervenus était très conducteur avec la présence d'eau saumâtre et donc propice à cette méthode. Les méthodes sismiques n'auraient pas apporté de tels résultats », souligne le spécialiste avant d'ajouter : « La tomographie électrique permet d'obtenir une image détaillée de la structure électrique du sol et donc d'identifier les différentes couches géologiques. C'est un outil précieux pour l'étude et la caractérisation du sous-sol. ». Elle permet ensuite de reconstruire



La tomographie électrique permet d'obtenir une image détaillée de la structure électrique du sol et donc d'identifier les différentes couches géologiques.

la variation de la résistivité électrique du sous-sol en 1D, 2D voire en 3D.

Par ailleurs, il s'agit d'une technique non invasive qui ne nécessite pas de forage ou de creusement. De plus, c'est une solution dont la mise en œuvre est assez rapide comparativement à d'autres et,



Vu la situation, les forages présentaient des contraintes trop importantes pour mener à bien cette étude.

de facto, moins coûteuse. Ainsi, sur ce chantier, l'équipe a pu réaliser l'étude d'un tracé par jour. Grâce à des moyens nautiques et terrestres, et beaucoup de savoir-faire, elle a pu déployer deux lignes de 475 m et 535 m, de respectivement 96 et 108 électrodes à travers vents, boues et marées. Des électrodes ont donc été disposées sur la surface du sol et reliées à un générateur de courant. Le courant électrique a été injecté dans le sol via une paire d'électrodes, tandis que les autres électrodes mesuraient la différence de potentiel électrique induit. Les mesures de potentiel électrique étaient enregistrées pour chaque configuration d'électrodes. « Les conditions d'interventions étaient difficiles », concède Guillaume Trancart. « Entre les marées et la vase dans laquelle l'équipe évoluait, il était essentiel d'être vigilant et de déployer les moyens nécessaires pour sa sécurité ».

## PRENDRE EN COMPTE LES MARÉES DANS LES CALCULS

Les données de tomographie électrique peuvent être difficiles à interpréter. Elles nécessitent une inversion informatique pour obtenir, à partir de la pseudo-section de résistivité apparente, une mesure quantitative de la résistivité électrique vraie. « Sur ce chantier, la particularité dans l'interprétation résidait essentiellement dans l'influence des marées et donc le niveau de l'eau qui variait. Il était essentiel d'ajouter ce paramètre dans les calculs. » Les deux forages aux extrémités ont ensuite permis d'étalonner les coupes interprétatives issues de la prospection géophysique confortant l'idée de la complémentarité des deux approches. ■

Maylis Roizard

## 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](http://www.groupefondasol.com)

SOCIÉTÉS	PAGES
ABO-ERG	45
APAGEO	77
ARCELORMITTAL	11
AXEL TRAVAUX	73
BMS	31
CAJ TRAVAUX SPÉCIAUX	8
CIANCALEONI	33
CPI - SALINA	21
FAYAT FONDATIONS	85
FONDASOL	89
FRASTE	53
GEOSOLTIS	49
GÉOTEC	9
INFRANEO	71
ITECH	51
KILOUTOU	7

SOCIÉTÉS	PAGES
LIEBHERR	47
LIM	27
LITEF	79
MASSENZA - EPD	2 <sup>e</sup> de couv.
MEDUSOIL	12 & 13
EIFFAGE	83
SIXENSE	57
SOILCLOUD	41
SOLETANCHE BACHY	4 <sup>e</sup> de couv.
SOLS MESURES	75
SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS	37
SUDIMAT - FOURMIFOR	15
TEC SYSTEM	3 <sup>e</sup> de couv.
TERRASOL	81
URETEK	4



## Recevez gratuitement la revue **Solscope Mag** !

Je désire recevoir gratuitement les 3 numéros annuels de la revue **Solscope Mag**

Ma préférence  par voie postale  par courriel

NOM ..... PRÉNOM .....

FONCTION ..... SOCIÉTÉ .....

ACTIVITÉ :  Maître d'ouvrage  Entreprise TP, génie civil, terrassement, fondations  Bureaux d'études, Ingénierie  
 Fournisseurs de matériels et services  Syndicats, écoles, administrations  Entreprises forage, forage d'eau, géothermie  
 Expert, assurance  Dépollution de site  Reconnaissance de sols pollués

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



© solscope



**tec system**

Qualité, Respect des délais

**Comment fait-on ?**



**Tec System**

14 Rue Émile Zola, 86530 Naintré



[www.linkedin.com/company/tec-system/](https://www.linkedin.com/company/tec-system/)



[www.tecsystem.fr](http://www.tecsystem.fr)

# L'Hydrofraise® par Soletanche Bachy

Plus compacte, plus performante,  
plus respectueuse de l'environnement, plus digitale :  
Depuis 50 ans, Soletanche Bachy fait évoluer sans cesse  
son Hydrofraise® pour répondre toujours mieux aux besoins  
des chantiers de fondations spéciales d'aujourd'hui et demain.



# CINQUANTE

## ans d'innovation

- |   |  |   |   |   |
|---|--|---|---|---|
| <b>1972</b><br>Dépôt du premier brevet de l'Hydrofraise®                      | <b>1989</b><br>Record de profondeur à 125m sur le barrage de Mud Mountain (Etats-Unis)         | <b>2016</b><br>Première Hydrofraise® à gripeurs sur l'extension de la ligne 14 du métro parisien        | <b>2017</b><br>Première Hydrofraise® avec power pack déporté sur un projet ferroviaire en Nouvelle-Zélande  | <b>2023</b><br>Lancement de la nouvelle Hydrofraise® HF6 avec porteur à emprise réduite |
| <b>1973</b><br>Premier chantier pour l'Hydrofraise® à la Gare de Lyon (Paris) | <b>2008</b><br>Brevet de l'Hydrofraise® compacte conteneurisable et démontable en moins de 72h | <b>2017</b><br>Première Hydrofraise® à power pack électrique sur un chantier d'assainissement à Londres | <b>2021</b><br>Intégration de l'Hydrofraise® dans Zetta-Lyze, la plateforme de big data de Soletanche Bachy |   |



SOLETANCHE BACHY

Retrouvez plus d'innovations de Soletanche Bachy

