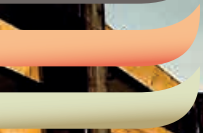


g é o t e c h n i q u e , f o r a g e e t f o n d a t i o n s

SOLSCOPE



CHANTIERS À CREUSER

EUROMÉDITERRANÉE VOIT GRAND POUR SON
BASSIN DE RÉTENTION

page 86

PROJET D'AGRANDISSEMENT SUR LE PORT
VAUBAN D'ANTIBES

page 90

DOSSIER

TRAVAUX SOUTERRAINS

L'ART CACHÉ DE L'INGÉNIEUR :
LE MONDE SOUTERRAIN

PAGE 38

ACTUALITÉS

Il était une fois... Solscope

page 22

Les référentiels évoluent :
quelles sont les nouveautés ?

Page 32



Dossier spécial

L'art caché de l'ingénieur : le monde souterrain

Lorsque l'on évoque l'ingénierie et l'architecture, on a souvent en tête des images de gratte-ciel vertigineux, de monuments emblématiques et de ponts majestueux. Pourtant, il existe un univers tout aussi fascinant mais peu visible du grand public : celui de l'ingénierie souterraine.

Chaque projet souterrain, quelles que soient sa taille et sa destination, représente un ensemble de défis à surmonter à chaque étape de sa réalisation. Géologues, hydrogéologues, ingénieurs, géotechniciens, géomètres, constructeurs et bien d'autres spécialistes collaborent dans ce monde souterrain pour concevoir et construire des infrastructures qui améliorent notre quotidien.

Sous nos pieds, les ouvrages souterrains ont un impact considérable sur nos vies. Ils ne se contentent pas de relier deux points, mais créent des liens, des flux et

des continuités en repoussant les limites de ce qui est possible.

Dans cette rubrique dédiée aux projets souterrains, nous vous invitons à découvrir les défis de conception et de réalisation de quelques projets emblématiques en cours de construction. Chacun de ces projets vous plongera dans un univers unique : vous traverserez des dizaines de kilomètres sous les Alpes ; vous assisterez à la rénovation d'une galerie pare-blocs vieillie sous le poids de la terre ; vous ferez face aux contraintes liées à la réalisation de tunnels en milieu urbain et aux défis environnementaux qui en découlent ; enfin, vous plongerez dans l'eau pour comprendre la réalisation de tunnels face aux contraintes géologiques et hydrauliques.

Bienvenue dans ce monde souterrain et bonne lecture !



© Groupe Legende

Deux projets de microtunnelage en cours sous les eaux de la Seine et de la Durance

Cet article présente des défis liés à la lubrification pour deux projets de microtunnelage, actuellement en cours et distants de plus de 600 kilomètres et ayant une problématique commune : la traversée sous rivière. Ces projets se déroulant dans des contextes géologiques et hydrogéologiques particuliers qui nécessitent une analyse des enjeux liés à la lubrification pour atteindre les objectifs de manière efficace et sécurisée.

PRÉSENTATION DES PROJETS

Le premier projet vise à construire le collecteur VL8 pour relier la station de pompage et d'épuration de Valenton à la vanne de décharge d'orage V10 à Athis-Mons, dans la région parisienne. L'objectif principal de cette opération est de renforcer et de sécuriser le réseau d'assainissement pour éviter les déversements dans l'environnement naturel, en vue de rendre la Seine baignable pour les Jeux olympiques de Paris en 2024.

Pour la construction du collecteur, 2 types de tunneliers sont utilisés : un microtunnelier de diamètre utile de 2,5 m pour une partie du tronçon, et un tunnelier de diamètre utile de 3 m pour l'autre partie. Les sections du collecteur

réalisées avec un microtunnelier sont situées entre le puits de Vigneux 10 et le puits d'Athis-Mons, ainsi qu'entre le puits de Vigneux 10 et le puits Vigneux 15.

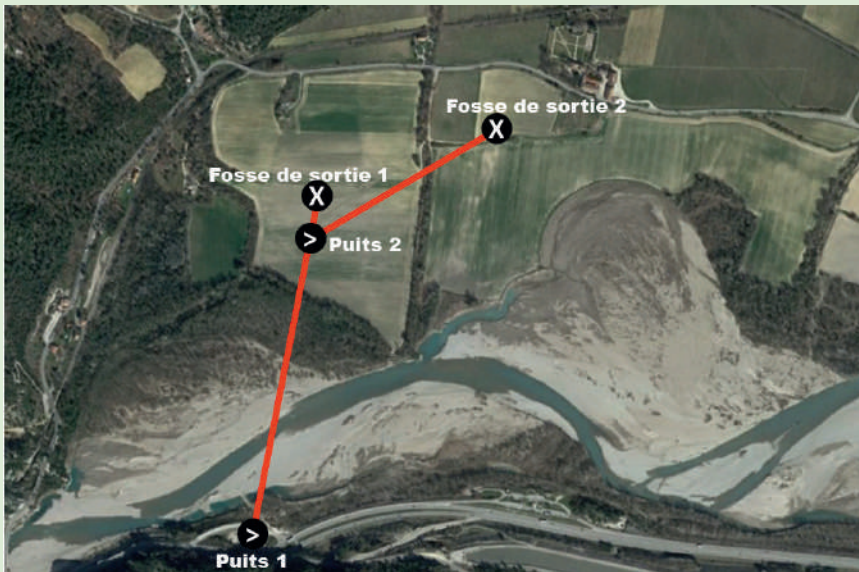
Dans la zone étudiée du projet, nous identifions une succession habituelle des formations géologiques du Bassin parisien avec des alluvions modernes et anciennes de la Seine, des masses et marnes du gypse, des marnes et sables infra-gypseux, des calcaires de Saint-Ouen, des sables de Beauchamp, ainsi que des marnes et caillasses. L'environnement aquatique des travaux implique l'interception de deux nappes phréatiques : la première est alimentée par les eaux de surface, la Seine et les eaux souterraines, tandis que la seconde est maintenue par une couche argileuse intermédiaire.

Les travaux de microtunnelage se dérouleront principalement dans le calcaire de Saint-Ouen ayant une épaisseur moyenne de 10 m. Cette formation est caractérisée par une alternance de bancs calcaires et de marnes à passées argileuses. Dans sa partie inférieure, on trouve des niveaux de gypse de faible épaisseur ainsi que des zones de dissolution. En raison de l'état de fissuration et de la présence des niveaux gypseux et sableux, la perméabilité moyenne peut remonter jusqu'à et 5.10-3 m/s, par endroits. Dans ce contexte sensible, la traversée sous la Seine présente des difficultés majeures, notamment en raison des risques de communication entre les nappes phréatiques et le microtunnelier.

Le 2^e projet concerne la construction d'une galerie souterraine par



Travaux de réalisation du projet VL8 (Mission G2 Pro Infraneo).



© Infraneo

Implantation de la galerie du GRTgaz sous la Durance (Mission G3 Infraneo).

microtunnelage sous la Durance, entre les communes de Jouques (Bouches-du-Rhône) et de Mirabeau (Vaucluse), pour GRTgaz. Une canalisation en béton armé de 1,8m sera installée par fonçage en deux tirs à partir de deux puits de poussée. Le premier tir de 739m passera sous la Durance et le second tir de 475m passera sous le torrent de Saint-Blaise.

Le projet se situe dans le lit majeur de la Durance, où la couche d'alluvions varie entre quelques mètres et une trentaine de mètres d'épaisseur. La couche sous-jacente est constituée des formations molassiques du Miocène et des niveaux de poudingues. Le tracé du projet est caractérisé par la présence d'alluvions graveleuses d'une épaisseur d'environ 10m, principalement composées de graviers, de sables et avec une faible proportion de limons.

Une nappe phréatique est présente dans les alluvions et s'écoule globalement parallèlement à la rivière, qui l'évacue. La perméabilité moyenne de l'aquifère est comprise entre 2.10^{-2} et 5.10^{-3} m/s permettant la circulation facile des eaux souterraines dans cette couche non cohésive. Les risques géotechniques identifiés pour cette couche sont principalement associés à l'instabilité des sols traversés, qui nécessitent un maintien, à la forte perméabilité du milieu qui peut entraîner une perte de fluide, et à la présence potentielle de blocs, qui impose le choix d'un matériel adapté pour la réalisation du creusement.

Ces deux projets de microtunnelage présentés, situés sous la Seine et la Durance, sont confrontés à des défis en matière de gestion des eaux et de maîtrise des efforts de poussée. Étant donné que la construction de puits

intermédiaires n'est pas envisageable dans ces cours d'eau, il est essentiel de prévoir une lubrification adaptée au contexte et de réduire les efforts de poussée nécessaires à l'avancement de ces deux microtunneliers.

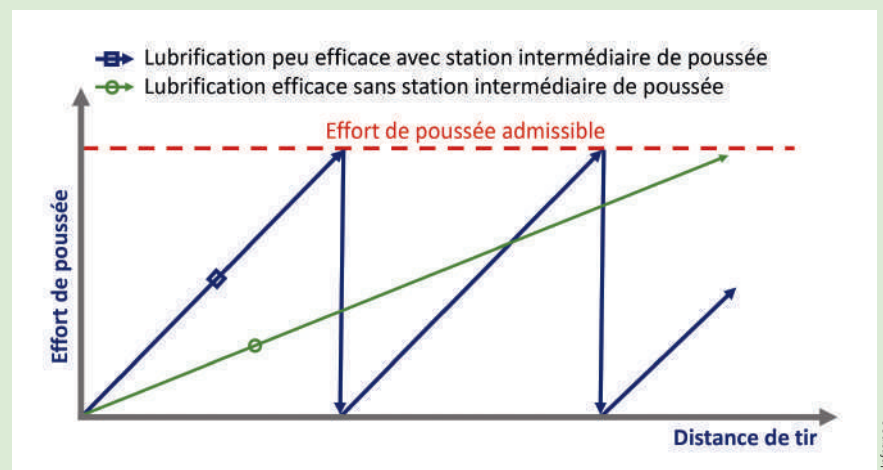
ADAPTATION DE LA LUBRIFICATION SUIVANT LA NATURE DES SOLS

La réussite d'un projet de microtunnelage repose en grande partie sur la gestion efficace de l'effort de poussée, qui exige une maîtrise précise des frottements entre les tuyaux et le sol environnant. Pour y parvenir, l'utilisation d'un système de lubrification appropriée est nécessaire afin de réduire les frottements entre la conduite et le sol. Généralement, une suspension de bentonite est utilisée comme lubrifiant principal. Sa résistance et sa viscosité sont ajustées en fonction des conditions géologiques locales pour garantir des

performances optimales. Les suspensions de bentonite utilisées sont composées d'eau, de bentonite et d'additifs en polymère. Ces suspensions sont des fluides thixotropes, grâce à leur structure en feuillets, qui leur confère une résistance. Cette résistance correspond à une très faible contrainte de cisaillement au-dessus de laquelle la suspension se comporte comme un fluide. Les suspensions de bentonite sont donc considérées comme des fluides de viscosité élevée qui ont la capacité de créer un film imperméable appelé « cake », leur permettant ainsi de colmater les vides du terrain. Les additifs en polymère sont ajoutés dans les suspensions de bentonite pour modifier leur rhéologie en augmentant leur viscosité et leur résistance, ce qui améliore leur capacité d'infiltration et leur stabilité. Il est important de noter que la stabilité des suspensions de bentonite dépend de leurs propriétés physiques et chimiques, et une dégradation de ces propriétés peut entraîner une perte de stabilité.

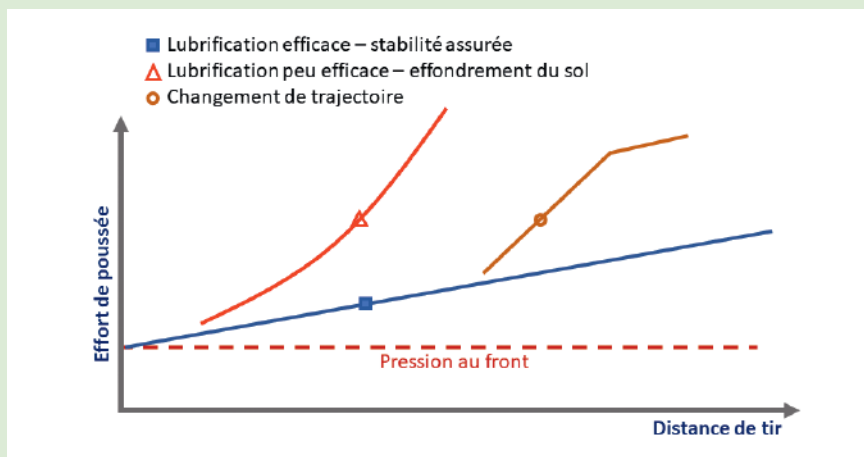
La figure suivante illustre l'influence de la lubrification sur les efforts de poussée avec et sans utilisation d'une station intermédiaire de poussée. Une lubrification efficace permet d'assurer des longueurs de poussée plus importantes sans avoir recours à une station intermédiaire. Toutefois, s'il y a un doute quant à l'efficacité de la lubrification, il est préférable de prévoir des stations intermédiaires de poussée pour continuer le travail.

Dans le calcaire de Saint-Ouen et les alluvions graveleuses de la Durance, il est essentiel d'avoir une viscosité élevée afin de garantir l'efficacité des lubrifiants. L'ajout des additifs en polymère permet d'obtenir une formulation adaptée à chacun de ces contextes géologiques. De plus, en raison de la longueur ...



© Infraneo

Influence de la lubrification sur les efforts de poussée avec et sans station intermédiaire de poussée (Source : Herrenknecht AG).



© Infiraneo

Schématisme des variations d'effort qui peuvent se produire pendant la réalisation de forages en microtunnelier.

... importante des tirs, le système de lubrification doit être capable de fournir continuellement une quantité adéquate de lubrifiant dans l'espace annulaire. La quantité de lubrifiant à injecter varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que la taille du microtunnelier, le type de tuyau utilisé et les propriétés mécaniques du sol, comme la granulométrie, la compacité et la perméabilité.

Le calcaire de Saint-Ouen est considéré comme stable, la suspension de bentonite injectée dans l'espace annulaire est donc utilisée comme lubrifiant afin de réduire efficacement la valeur de frottement entre la conduite et le sol intact et de réduire les efforts de poussée. Afin de pouvoir former un film, le lubrifiant doit remplir l'espace annulaire et sans pénétrer dans le sol environnant. Les paramètres qui influencent la formulation du lubrifiant sont principalement liés à la perméabilité du sol ainsi qu'à la

capacité du lubrifiant à limiter la pénétration en profondeur dans le milieu. La présence de fissures dans un milieu rocheux a également un impact majeur sur la capacité de remplissage et la stabilité de la suspension de bentonite dans le temps. Notamment lorsque les fissures sont larges et ouvertes, l'ajout des additifs devient indispensable afin d'assurer une viscosité adéquate permettant à la suspension de rester stable.

Les alluvions graveleuses de la Durance sont considérées comme des sols instables, nécessitant l'utilisation d'une suspension de bentonite pour stabiliser le sol intact et maintenir l'espace annulaire ouvert. Le lubrifiant permet de transférer la différence de pression entre le lubrifiant et le sol environnant dans la structure granulaire du sol intact. Dans les sols granulaires, la perméabilité est particulièrement importante, car elle peut avoir un impact significatif sur la

quantité de lubrifiant nécessaire à injecter dans l'espace annulaire pour garantir la stabilité des sols avoisinants.

Pour maintenir les fonctions de support et de lubrification dans ces deux configurations, il est crucial d'injecter une quantité suffisante de suspension de bentonite dans l'espace annulaire. Cependant, il est important de noter que le volume de bentonite qui pénètre dans le sol peut être plusieurs fois supérieur au volume théorique de l'espace annulaire en raison de la perméabilité du sol. Par conséquent, il est essentiel de surveiller attentivement le volume de bentonite injecté pour éviter toute surconsommation et pour maintenir un équilibre entre la pression de la boue et la pression du sol environnant.

GESTIONS DES EAUX EN ÉCOULEMENT

La suspension de bentonite a la capacité de créer une zone dans le sol qui présente une perméabilité à l'eau inférieure à celle du sol environnant, ce qui permet de gérer les écoulements d'eau souterrains. La formation d'une zone à perméabilité réduite dans le sol peut se produire de deux manières différentes : par application de pression de soutien ou par pénétration du lubrifiant dans le sol environnant. Dans le premier cas, la résistance thixotropique du lubrifiant est déterminante, tandis que dans le second cas, la viscosité joue un rôle crucial.

Les sols avec une perméabilité élevée et les roches avec de grandes ouvertures de fissures génèrent généralement une consommation supplémentaire de suspension de bentonite. En particulier dans les sols très perméables, mais également dans les fissures de marne ou de roche, des flux d'eau souterraine importants peuvent se produire à proximité de l'espace annulaire. Dans une roche fissurée, il y a un danger particulier pour le microtunnelier que l'espace annulaire entre en connexion hydraulique avec des aquifères isolés, ce qui peut entraîner le lavage de la bentonite. Dans ce cas, des mesures appropriées seraient le maintien continu de la pression d'injection dans l'espace annulaire et l'utilisation d'une suspension de bentonite très visqueuse afin de contrer la perte du film lubrifiant. Les sols granulaires très perméables, en présence d'écoulements d'eau, posent une problématique similaire. Pour déterminer la quantité et la consistance du lubrifiant à injecter dans les vides du sol, la perméabilité du sol et la vitesse d'écoulement sont étudiées. Si la formulation du lubrifiant n'est pas adaptée au contexte géologique et hydrogéologique, il



© Infiraneo

Puits de travail à l'abri des parois moulées (Projet VL8).



© Infraneo

Démarrage des travaux pour la réalisation des puits en pieux sécants dans le lit majeur de la Durance.

pourrait être entraîné par les écoulements souterrains.

CONCLUSION

La présence d'eau souterraine peut engendrer des difficultés d'exécution majeures pendant la réalisation des travaux de microtunnelage. Ainsi, l'utilisation d'un lubrifiant adapté au contexte permet de surmonter ces difficultés.

Les roches fracturées et les sols granulaires très perméables sous nappe présentent des défis supplémentaires qui nécessitent une maîtrise parfaite des propriétés géotechniques et hydrogéologiques du milieu pour déterminer la quantité et la consistance du lubrifiant à injecter.

La stabilité à long terme du lubrifiant est fortement influencée par ses propriétés

physiques et chimiques. En cas de dégradation, il est important de procéder aux ajustements nécessaires afin de prévenir toute incidence sur l'opération. Un suivi régulier des propriétés telles que la dureté, l'acidité, la densité, la viscosité, le filtrat et la teneur en sables permet de détecter les signes de détérioration et de traiter le lubrifiant en conséquence.

Un projet souterrain est un projet en constante évolution et nécessite un suivi continu de tous les paramètres, ainsi qu'une capacité décisionnelle rapide et efficace pour surmonter les difficultés et les imprévus qui peuvent survenir. L'efficacité de ce processus décisionnel dépend de la coordination et de la collaboration efficaces entre les différentes parties impliquées. ■

Umur Salih Okayay

Directeur technique adjoint
et conseiller scientifique
Infraneo

N. B. Les informations présentées dans cet article sont purement indicatives et ne peuvent garantir aucun engagement contractuel ou résultat pour les parties impliquées dans la réalisation de ces 2 projets de microtunnelage.

DYWIDAG

DYWI® DRILL

For more information, please contact +334 78 79 27 82

dywidag.com

La galerie pare-blocs de Saint-May se pare d'un anneau indéformable

Construite en 1912, la galerie pare-blocs de Saint-May dans la Drôme protège la RD94 des éboulements rocheux sur 250 mètres. Mais avec le temps et sous l'effet de la poussée de la montagne, la structure de l'ouvrage montrait des signes de faiblesse qu'il était temps de renforcer. En charge des travaux, le groupement Legendre Génie Civil - EPC France a ainsi réalisé une coque de 4 000 m² en béton projeté, liaisonnée à la maçonnerie grâce à 25 000 ancrages, et butée par un radier en béton.

De mai à novembre 2022, le Département de la Drôme a fait appel à l'expertise de l'agence de Chambéry du groupe Legendre spécialisée en génie civil, pour la réalisation des travaux de réfection de la galerie pare-blocs de Saint-May. Avec le temps, les éboulements de la falaise au-dessus et la poussée des terres avaient conduit à d'importantes déformations de celle-ci jusqu'à l'apparition de fissures. « La galerie, construite en 1912, est maçonnée et conçue sans radier en partie basse », explique Pedro Bandera, directeur de l'agence génie civil de Chambéry. L'objectif du chantier était donc de la conforter.

PARTIE BASSE : RÉPARER ET CONFORTER

Dans un premier temps, les réparations ont consisté en l'injection des fissures de la structure. Legendre a adapté la méthodologie de réalisation du terrassement pour la réalisation du radier. « Nous avons décaissé par plots de 10 m alternés, pour éviter la convergence des piédroits existants pendant la phase de terrassement », explique le directeur d'agence. La construction du radier de 30 cm d'épaisseur a suivi la même méthode : la réalisation des plots de radier par alternance tous les 10 m sur

250 m de longueur, de manière à toujours maintenir une butée des piédroits. Ces derniers ont été scellés à la maçonnerie existante par l'intermédiaire de 5 000 ancrages.

PARTIE HAUTE : UNE COQUE POUR RENFORCER

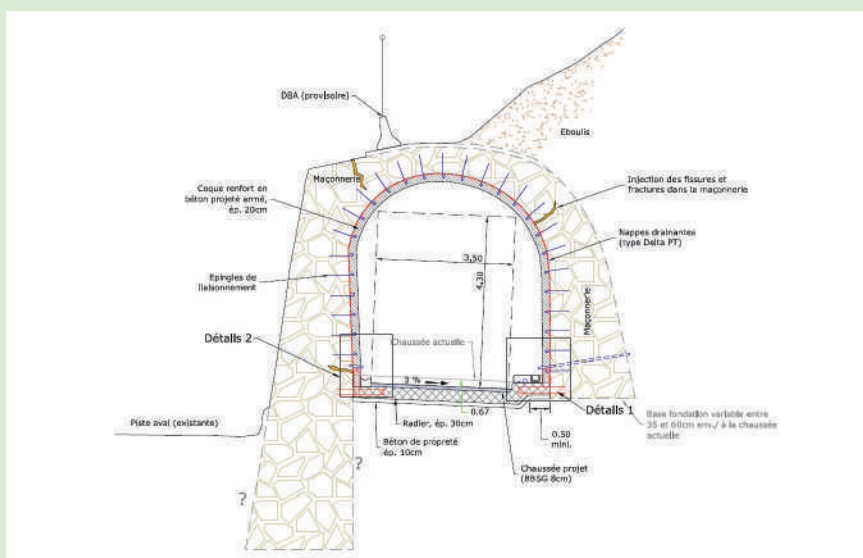
La deuxième étape a concerné la création d'une voûte de 4 000 m² en béton projeté de 20 cm d'épaisseur. « Pour cette étape, nous étions en groupement avec le groupe EPC France qui nous a accompagnés sur la partie béton projeté », reprend Pedro Bandera. La voûte en béton a été liaisonnée à la maçonnerie existante grâce à 25 000 ancrages. Les forages ont été réalisés mécaniquement avec un mini-pantofore. Les équipes ont également réalisé sur les piédroits des barbacanes et des drains forés dans la maçonnerie (voir schéma), afin de déléster l'ouvrage de la poussée hydrostatique à l'arrière. À l'aval de la galerie, les barbacanes non traversantes récupèrent les eaux de ruissellement afin d'éviter qu'elles ne s'infiltrent à l'arrière du béton projeté et ne créent des surpressions. Sur le radier, des réseaux multitubulaires ont été réalisés dans les trottoirs.

LOGISTIQUE ET AUTRES ADAPTATIONS

Pendant la durée des travaux, la circulation de la RD94 qui relie Nyons à Serres a été coupée dans la galerie de Saint-May et déviée sur la voie de sécurité qui se trouve en aval de l'ouvrage et longe la rivière l'Eygues, dans un environnement naturel protégé. Sachant que la circulation devait être rétablie avant la période de viabilité hivernale afin d'éviter les risques pour la circulation routière non protégée, le respect des délais impartis aux travaux était impératif. À l'intérieur du tunnel large de 3,50 m, l'espace restreint ne facilitait pas les déplacements des différents engins et encore moins les demi-tours. « La logistique de ce chantier a été cruciale puisqu'on ne pouvait pas attendre la fin de la réalisation du radier pour démarrer les forages », reprend le responsable. « La phase de terrassement s'est révélée particulièrement complexe étant donné qu'on terrassait à l'avancement en faisant des plots tous les 10 m créant ainsi des obstacles au sol où seuls les chenillards pouvaient circuler. » Il était donc impératif de respecter le séquençage des travaux pour respecter les délais. Pour cela, le groupe Legendre a consacré plusieurs mois aux études d'exécution et à la préparation de chantier de manière à définir les méthodes les plus adaptées.

« Un bon agencement des tâches, de bonnes équipes, et bien sûr, un dialogue constructif avec le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage, c'est ce qui conditionne la livraison de l'ouvrage dans les temps tout en assurant la qualité de réalisation et la sécurité des opérateurs », conclut le directeur. ■

Veronica Velez



LES INTERVENANTS

- MOA : Département de la Drôme
- MOE : Géolithe
- Travaux : Legendre Génie Civil, EPC France



INFRANEO

“

**PROTÉGEONS L'EXISTANT,
PRÉPARONS LE FUTUR.**



**INGÉNIERIE
DES SOLS**



**CYCLE
DE L'EAU**



**CONTRÔLES
ET ESSAIS**



**INGÉNIERIE
DES STRUCTURES**

www.infraneo.com