


RENFORCEMENT DU SOL SOUS RÉSERVOIRS GNL À ARZEW, EN ALGÉRIE

AUTEURS : BERTRAND HANAUER, DIRECTEUR EXPORT, KELLER - THIERRY HERMGES, RESPONSABLE TECHNICO-COMMERCIAL EXPORT, KELLER - GUILLAUME TENDERO, INGÉNIEUR TRAVAUX PRINCIPAL, KELLER - GÉRAUD D'AVEZAC, INGÉNIEUR TRAVAUX SUR SITE, KELLER

LA RÉALISATION DU RENFORCEMENT DE SOL SOUS QUATRE RÉSERVOIRS DE LA NOUVELLE LIGNE DU TERMINAL GAZIER GNL 3Z À ARZEW, EN ALGÉRIE, S'EST APPUYÉE SUR UNE CONCEPTION INNOVANTE DANS LE PAYS. EN EFFET, UN RENFORCEMENT PAR COLONNES DE JET GROUTING SOILCRETE ASSOCIÉ À UN MATELAS DE RÉPARTITION A ÉTÉ PRÉFÉRÉ À UN DISPOSITIF DE FONDATIONS TRADITIONNEL PAR PIEUX, QUI AURAIT FORTEMENT PÉNALISÉ LA STRUCTURE DES RÉSERVOIRS EN PHASE SISMIQUE. S'AGISSANT D'UNE PREMIÈRE EN ALGÉRIE, CETTE OPÉRATION À FORTE CONNOTATION TECHNIQUE A DEMANDÉ D'IMPORTANTES MOYENS DE CONTRÔLE ET DE JUSTIFICATION. LA GAGEURE FUT ÉGALEMENT DE MENER À BIEN L'OPÉRATION DANS UN ENVIRONNEMENT LOGISTIQUE RENDU EXTRÊMEMENT COMPLEXE DU FAIT DES MODIFICATIONS PROFONDES DES RÈGLES D'IMPORTATION ET DES PROBLÈMES DE PÉNURIE DE CIMENT QUI ONT TOUCHÉ LE PAYS DURANT LA PHASE D'EXÉCUTION.



1- Vue des travaux
sur le réservoir GNL 2.

1- View of works
on LNG tank 2.

© KELLER

- 2- Localisation de l'opération.
- 3- Coupe géologique au droit du réservoir GNL 1.
- 4- Coupe type des inclusions Soilcrete-D.
- 5- Principe du Soilcrete-D.
- 6- Phasage type du procédé Soilcrete.

- 2- Project location.
- 3- Geological cross section at the level of LNG tank 1.
- 4- Typical cross section of Soilcrete-D inclusions.
- 5- Schematic of Soilcrete-D.
- 6- Typical scheduling of the Soilcrete process.

CONSTRUCTION DE QUATRE RÉSERVOIRS

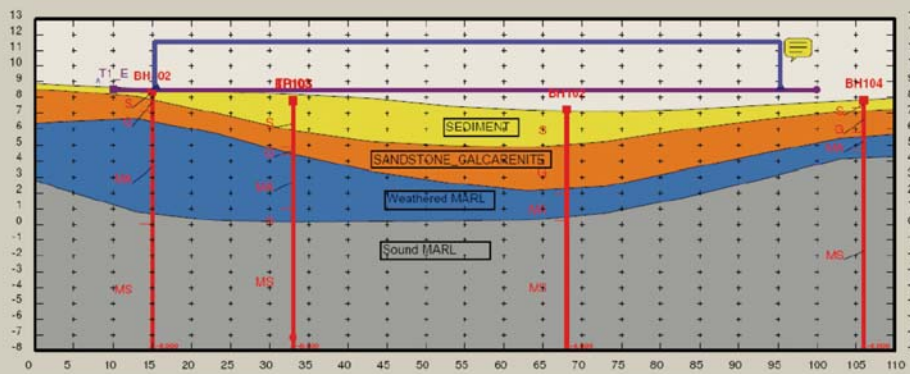
Dans le cadre de la construction du nouveau terminal de liquéfaction de gaz GNL 3Z à Arzew (figure 2), la Sonatrach, première entreprise d'hydrocarbures d'Afrique, a confié à la joint-venture Saipem-Snamprogetti-Chiyoda

la réalisation des infrastructures et du process de l'opération. Celle-ci représente un investissement d'environ trois milliards de dollars. La construction des réservoirs de stockage de gaz (deux réservoirs GNL et deux réservoirs GPL) constitue l'une des gageures techniques de l'opération.

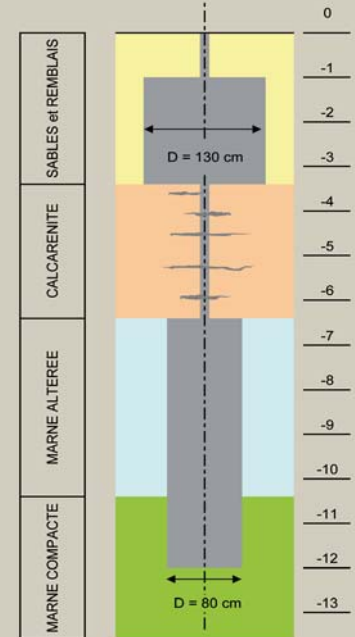
Ces ouvrages de grandes dimensions (82 m de diamètre et 35 m de haut pour les réservoirs GNL) sont positionnés sur une couche de remblais et sable sédimentaire de 0 à 4,5 m d'épaisseur, reposant sur un horizon de calcaire fracturé (1 à 6,5 m d'épaisseur) pouvant présenter des vides karstiques, sous lequel nous trouvons 2 à 7 m de marnes altérées avant de rencontrer le toit de marnes compactes (figure 3). La zone est classée en zone sismique II-a, et les ouvrages intégrés à un centre de production et de distribution d'énergie d'importance nationale sont de classe I-A. Cela conduit à considérer des accélérations nominales maximales de 2,49 m/s² et une magnitude de 7. Les contraintes apportées par les réservoirs sont importantes, notamment en phase d'hydrotest, où elles varient entre 200 et 300 kPa.



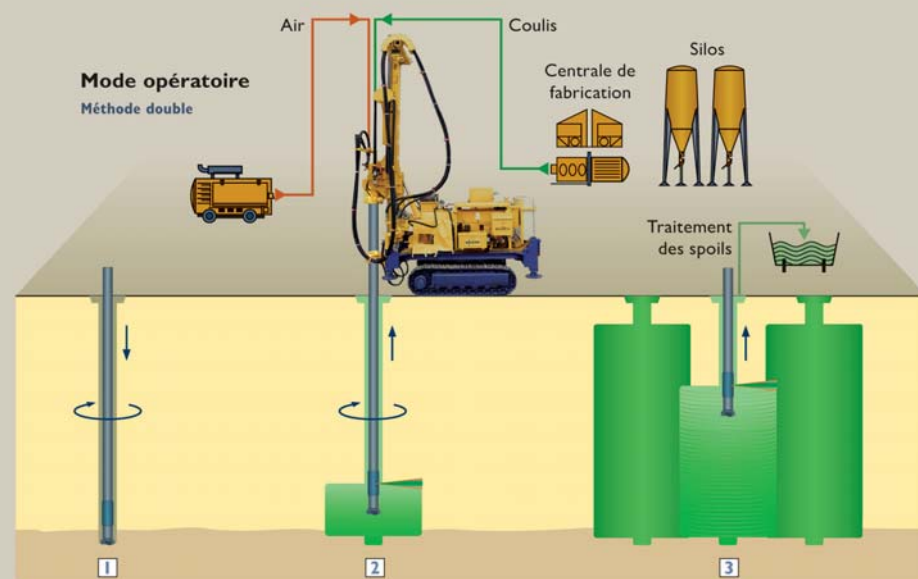
COUPE GÉOLOGIQUE AU DROIT DU RÉSERVOIR GNL 1



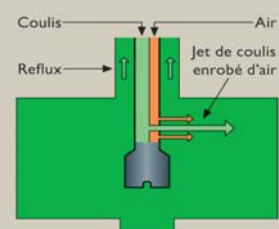
COUPE TYPE DES INCLUSIONS SOILCRETE-D



PHASAGE TYPE DU PROCÉDÉ SOILCRETE



PRINCIPE DU SOILCRETE-D



C'est le «jet double haute énergie» ou Soilcrete® D



7 © KELLER



8



9

De plus, les conditions d'utilisation des réservoirs imposent une stricte maîtrise des tassements (tassements absolus inférieurs à 100 mm et tassements différentiels inférieurs à 1/500).

Le dispositif d'assise des réservoirs devait donc permettre de répondre aux spécifications techniques de tassement et de portance tout en intégrant un risque sismique important, en traitant le risque de vide karstique et en tenant compte de la spécificité d'un horizon dur (grès) au-dessus de terrains associés à de très médiocres caractéristiques géotechniques (marnes altérées). Ces contraintes techniques ne constituaient toutefois qu'une facette de la

problématique du lot fondations, puisque les travaux devaient être réalisés dans des délais extrêmement tendus afin de ne pas engager le chemin critique de l'opération.

UNE SOLUTION TECHNIQUE PERTINENTE

Les travaux de fondation des réservoirs ont été réalisés par l'entreprise Keller Fondations Spéciales, représentée en Algérie par son établissement stable et sa filiale de droit algérien.

L'entreprise a proposé une solution de renforcement de sol permettant de garantir les performances recherchées tout en résolvant le risque de vide kars-

tique, en s'affranchissant de la difficulté de forage induite par la couche de grès et en répondant de façon économique au risque de sollicitation sismique.

La solution géotechnique retenue consistait à exécuter, selon un maillage de 3,5 x 3,5 m, des inclusions de 12 m de profondeur et de diamètre minimal variant entre 0,8 et 1,3 m suivant la nature des terrains rencontrés (figure 4). Ce dispositif est ensuite recouvert d'un matelas de répartition qui assure un rôle amortisseur en cas de séisme.

Les inclusions étaient réalisées selon le procédé Soilcrete-D, développé par Keller dans le cadre de l'optimisa-

7- Arrivée du matériel sur site.

8- Centrale de fabrication de coulis et stockage d'eau.

9- Un personnel algérien à l'écoute des nouvelles technologies du sol.

7- Arrival of equipment on site.

8- Grout mixing plant and water storage.

9- Algerian personnel attentive to the new soil technologies.

10- Mise en place du poste de nuit.

11- Planche d'essai et dispositif de collecte des spoils permettant de garantir la propreté de la plate-forme de travail.

12- Bac de gestion des spoils et vue des pompes d'injection HP.

10- Setting up the night shift.

11- Test section and spoil collection system capable of ensuring the cleanliness of the work platform.

12- Spoil management container and view of the HP injection pumps.

tion des techniques de jet grouting. Cette technologie combine injection de coulis de ciment (C/E compris entre 0,2 et 1) à très haute pression (350 à 500 bars) et fort débit (250 à 350 l/min) à un flux d'air permettant une meilleure conservation de l'énergie de lancement (figure 5). La mise en œuvre de ce concept de renforcement de sol en Algérie constituait une première.

PHASAGE D'EXÉCUTION EN TROIS TEMPS

Le dispositif de renforcement de sol se décline en trois temps, dont les deux premiers sont représentés sur la figure 6.

La phase 1 consiste à forer jusqu'à une profondeur de 12 m, à l'aide d'outils permettant de traverser l'horizon raide de calcarénite. Un coulis de ciment léger a été utilisé comme fluide de perforation.

Afin de bénéficier de bon rendements de perforation, les foreuses étaient équipées de tables de rotation traversantes et de fléchettes de prolongation de mât permettant de réaliser la descente en s'affranchissant de toute opération de raboutage de tige.

Une fois arrivé au niveau de la base des inclusions, la phase 2 est entamée en déstructurant le sol à l'aide d'un puissant jet de coulis enrobé par un flux d'air.

La remontée de l'outil est gérée par ordinateur en fonction des paramètres de travail qui sont déterminés lors de la planche d'essai (vitesse de remontée, vitesse de rotation, débit et pression de coulis, débit et pression d'air).

Les paramètres de production sont enregistrés en continu. L'excédent de mélange coulis de ciment et sol est évacué à la surface par le vide annulaire existant entre la tige de forage et la paroi perforée. La colonne de Soilcrete est réalisée au-dessus de la cote finale de l'inclusion.

La phase 3 consiste à recéper les inclusions et à mettre en œuvre le matelas de répartition. ▷





UNE PRÉPARATION MÉTICULEUSE POUR UN CONTEXTE D'EXÉCUTION DIFFICILE

Keller travaille depuis onze ans en Algérie et commence à avoir une très bonne expérience du pays. C'est bien le moins pour préparer une opération d'une telle envergure. Le matériel nécessaire à l'opération n'existant pas dans le pays, il a dû être importé en quasi-totalité. Ainsi, quatre foreuses EGT de 18 t accompagnées de trois lignes complètes de fabrication de coulis et de pompes HP Techniwell, le tout représentant plus de 20 containers, ont été importées temporairement à Arzew (photos 7 et 8). Un lot de pièces détachées permettant de répondre aux opérations de maintenance et de réparations courantes a également été envoyé pour mise à la consommation sur le marché local. Cette préparation a requis une étroite collaboration entre personnel administratif, ingénieurs, mécaniciens et logisticiens.

DES RESSOURCES HUMAINES SPÉCIALISÉES

L'identification des compétences nécessaires pour cette opération à forte spécialisation technique a aussi requis une planification précise. Les 22 expatriés spécialisés en Soilcrete ont été identifiés au sein des filiales du groupe Keller en Europe. Ainsi, ce sont des Français, des Allemands, des Anglais et des Écossais (attention à ne pas faire un amalgame entre les différentes identités de nos amis du Royaume-Uni, faute de quoi nous nous exposons à une explosion de susceptibilités culturelles fort préjudiciable à la cohésion du groupe !) qui ont travaillé aux côtés de la quarantaine de salariés de Keller Algérie. La collaboration entre ces différentes nationalités a, au cours des travaux, donné lieu à de véritables échanges technologiques, et le transfert de savoir-faire a bénéficié à tous, notamment aux salariés algériens qui découvraient le jet grouting et se sont fortement investis

pour en maîtriser le process (photo 9). Notons que l'échange entre les différentes nationalités a été renforcé du fait des conditions de sécurité communes imposées par l'entreprise (transport sous escorte, logement encadré...). Au vu de l'importance des travaux à réaliser (près de 3 000 inclusions de jet grouting Soilcrete-D), l'entreprise a mis en place une organisation permettant de produire 24 h/24 et 6 j/7 (photo 10).

LES ALÉAS DES TRAVAUX

La planche d'essai a démarré début août 2009 (photos 11 et 12). Elle a permis de déterminer les paramètres d'exécution (méthode de perforation, nature et composition du fluide de perforation, pression et débit du jet, vitesse de remontée, vitesse de rotation, nombre et dimensions des buses de jet) permettant de garantir le respect des diamètres minimaux imposés. Le second objectif de la planche d'essai consistait à démontrer que les inclusions réalisées présentaient bien une

13- Des cocottes de ciment parcourent plus de 450 km pour faire face à la pénurie frappant l'Ouest algérien.

14- Préparation de l'essai de chargement sur maille carrée 3,5 x 3,5 m.

15- Essais de chargement à 500 t sur 48 h.

16- Modélisation Plaxis 3D.

17- Modélisation sol-structure 3D (logiciel Flac 3D).

13- Cement tanks travel more than 450 km to cope with the shortage in western Algeria.

14- Preparation of the loading test on a 3.5 x 3.5 m square mesh.

15- 500-tonne loading tests over 48 h.

16- Plaxis 3D modelling.

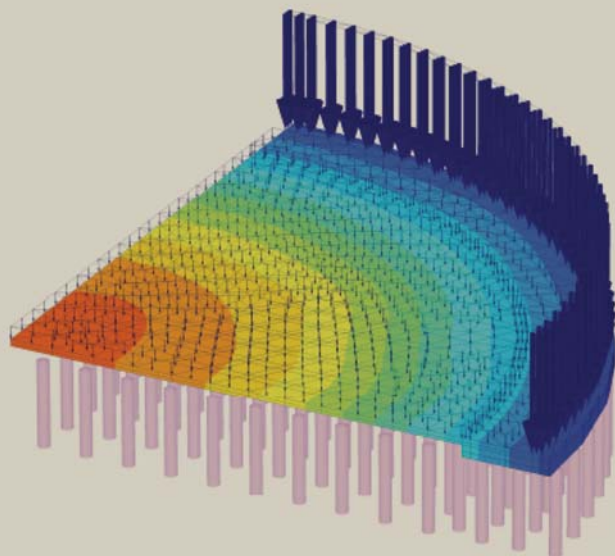
17- 3D soil-structure modelling (Flac 3D software).

© KELLER

15

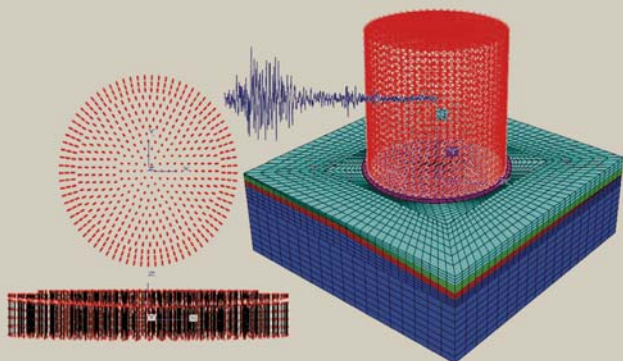


MODÉLISATION PLAXIS 3D



16

MODÉLISATION SOL-STRUCTURE 3D (LOGICIEL FLAC 3D)



17

valeur de résistance à la compression supérieure à 5 MPa.

L'opération de renforcement de sol nécessitait une importante quantité de ciment CRS (25 000 t) se traduisant par des cadences quotidiennes de livraison de l'ordre de 250 t. Or la pression de l'industrie du BTP dans l'ouest de l'Algérie était telle que les usines de ciment d'Oran se trouvaient largement sous-dimensionnées pour pourvoir à la totalité de la demande.

Ce déséquilibre entre offre et demande a été encore accentué du fait des pannes et entretiens annuels inopinés mettant hors-service les cimenteries locales. Afin de limiter le risque de rupture d'approvisionnement, l'entreprise a multiplié le nombre de fournisseurs jusqu'à 450 km d'Arzew (photo 13) et a augmenté la capacité de stockage en pulvérulent. Ces efforts n'auront pas toujours permis d'éviter les interruptions de chantier.

QUAND LE MIEUX EST L'ENNEMI DU BIEN

Les carottes prélevées au sein de colonnes de Soilcrete permettant de démontrer que les inclusions présentaient bien une résistance intrinsèque supérieure à 5 MPa ont été exportées à destination d'un laboratoire français agréé et expérimenté dans l'écrasement de ce type de matériaux (résistance intrinsèque sensiblement plus basse que celle du béton, prélèvements carottés sensibles, présence d'hétérogénéités). Toutefois, afin de s'affranchir des délais d'exportation et de transport

et pour disposer au plus tôt d'informations sur les résistances colonnes, Keller a confié à un laboratoire algérien un lot de carottes. Les résultats obtenus montraient certaines insuffisances de résistance qui, après audit du laboratoire par un expert français, ont été expliquées par le fait que la procédure d'écrasement dérogeait aux spécifications de la norme européenne relative aux travaux de jet grouting et que le matériel employé n'était pas adapté à ce type de contrôle.

En dépit de cette explication et du fait que la totalité des résultats obtenus en France se soient révélés conformes aux spécifications requises, le contrôleur technique a exigé que soient réalisés de très nombreux essais, calculs et rapports complémentaires, qui ont tous confirmé que le dispositif de fondation était conforme aux compétences requises. Ainsi, le nombre de carottages et d'essais d'écrasement a été multiplié par plus de dix, un essai de chargement sur maille à 500 t a été réalisé (opération sensible confiée à Michel Bustamante, expert géotechnicien, voir photos 14 et 15), des calculs inverses aux éléments finis (Plaxis 3D et Flac 3D, voir figures 16 et 17) ont été menés à bien, et une mission d'expertise et de validation a été confiée à Jean-Pierre Magnan, directeur technique géotechnique du LCPC et référence mondiale en géotechnique.

ACCROISSEMENT DES CONTRAINTES D'IMPORTATION

La loi de finances complémentaire du 26 juillet 2009 est tombée comme un couperet sur l'organisation du support logistique et mécanique de l'opération. Ce document modifiait brutalement les conditions d'importation définitives, imposant, pour l'achat de biens en provenance de l'étranger, la mise en place d'un crédit documentaire. Les banques, jusque-là peu habituées à ce mode de garantie, se sont du jour au lendemain retrouvées submergées de demandes de crédits documentaires émanant de l'ensemble des acteurs économiques du pays, dont l'activité dépend des importations.

Pour le chantier, cela signifiait qu'il était désormais impossible de se procurer rapidement les pièces de rechange nécessaires à la réparation des pannes. Sur une opération mécaniquement aussi sensible, cela représentait un véritable risque d'immobilisation, que le matériel et les pièces de secours approvisionnés en début de chantier ne permettaient pas de couvrir. ▻





Aussi, Keller a très vite décidé de mobiliser cinq containers de matériel de secours complémentaire et de pièces détachées, qui permettaient de faire face de manière autonome à toutes les situations de pannes alors envisageables.

La mise en place du dossier de crédit documentaire a été une épreuve, mais le matériel a été livré sur le chantier en un peu moins de huit semaines, ce qui représente un petit tour de force au vu des difficultés bancaires et douanières exposées, mais constitue un véritable retard au regard des quatre mois de production initialement planifiés.

**HYGIÈNE ET SÉCURITÉ :
LE NIVEAU D'EXCELLENCE
DU DOMAINE « OIL AND GAS »**

Les pétroliers possèdent un niveau d'exigence en termes d'organisation des procédures d'hygiène et de sécurité sensiblement supérieur à celui des travaux publics. Ainsi, le niveau de formation commun à l'ensemble des intervenants sur site est largement plus complet, et de nombreuses formations renforcées conditionnent l'exécution de tâches à risques.

**18- Opération
de dégarnissage
des colonnes
de Soilcrete-D.**

**18- Soilcrete-D
column stripping
operation.**

De plus, chaque prise de poste est précédée d'une réunion sécurité.

Par ailleurs, la totalité du matériel entrant sur le site fait l'objet d'un examen de conformité qui interdit l'accès à toute machine obsolète au regard de la réglementation HSE.

Enfin, Keller devait assurer la présence continue sur site d'une ambulance accompagnée d'infirmiers d'astreinte prêts à prodiguer les soins de premier secours et à assurer l'évacuation d'éventuels blessés vers les hôpitaux à proximité.

Fort heureusement, l'opération s'est déroulée sans qu'aucune blessure n'ait été à déplorer, et l'objectif « zéro accident » a été atteint !

En conclusion, la forte collaboration entre les intervenants a permis de mener à bien le projet (photo 18) tout en surmontant au mieux les difficultés rencontrées. L'opération, qui constituait une première en Algérie, a ouvert de nou-

velles perspectives au développement du Soilcrete dans le pays, et le transfert de technologie qui s'est opéré a permis au personnel local de réaliser avec une forte autonomie un soutènement en jet grouting sur un autre site algérien. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Sonatrach

CONTRÔLE TECHNIQUE : CTC Est

ENTREPRISE : Joint-venture Saipem-Snamprogetti-Chiyoda

SOUS-TRAITANT RENFORCEMENT DE SOL : Keller Fondations Spéciales

GÉOTECHNICIENS EXPERTS : MB Fondations et LCPC

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 2 910 inclusions de Soilcrete-D
- 19 200 ml de colonnes de jet grouting Soilcrete-D
- 25 000 t de ciment
- 380 ml de carottage
- 154 essais d'écrasement dont 24 pour mesure de module de Young
- 450 mesures de densité et d'écrasement sur prélèvements de spoil
- 3 000 fiches d'enregistrement de paramètres
- 1 essai de chargement à 500 t

ABSTRACT

**SOIL REINFORCEMENT UNDER LNG TANKS
AT ARZEW, IN ALGERIA**

KELLER: BERTRAND HANAUER - THIERRY HERMGES - GUILLAUME TENDERO - GÉRAUD D'AVEZAC

The execution of soil reinforcement under four tanks of the new LNG 3Z gas terminal line at Arzew, Algeria, was based on a concept that is innovative in this country. Reinforcement by Soilcrete jet grouting columns combined with a load distributing mattress was preferred to a conventional pile foundation system, which would have very adversely affected the tanks' structure in seismic periods. Since this was a first in Algeria, this highly technical project required major inspection and substantiation resources. The challenge was also to carry out the project in a logistic environment made extremely complex as a result of the profound changes in import rules and the cement shortage problems that affected the country during the execution phase. □

**REFUERZO DEL SUELO BAJO LOS DEPÓSITOS
DE GNL EN ARZEW, ARGELIA**

KELLER: BERTRAND HANAUER - THIERRY HERMGES - GUILLAUME TENDERO - GÉRAUD D'AVEZAC

La realización del refuerzo de suelo debajo de cuatro depósitos de la nueva línea de la terminal gasística GNL 3Z en Arzew (Argelia) se basó en un diseño innovador en el país: se decidió aplicar un refuerzo por columnas de jet grouting Soilcrete asociado a una capa de distribución en lugar de un dispositivo de cimientos tradicional por pilotes, que habría penalizado notablemente la estructura de los depósitos en fase sísmica. Al tratarse de una primicia en Argelia, esta operación de alto componente técnico exigió importantes medios de control y justificación. Asimismo, el proyecto planteaba el reto de llevar a cabo la operación en un contexto logístico extremadamente complejo debido a las profundas modificaciones en la normativa sobre importaciones y los problemas de escasez de cemento que afectaron al país durante la fase de ejecución. □