



© GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

## PORT MILITAIRE DE BREST : TRAITEMENT DE L'ALÉA LIQUÉFACTION PAR COLONNES BALLASTÉES À L'ARRIÈRE D'UN MUR DE QUAI

AUTEURS : LAURENT SAUSSAC, INGÉNIEUR PRINCIPAL, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - ERWAN MOAL, INGÉNIEUR, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - ANNE GANDIHON, INGÉNIEUR TRAVAUX PRINCIPAL, KELLER

DANS LE CADRE DES TRAVAUX DE RÉAMÉNAGEMENT DU QUAI D'ARMEMENT DROIT EST DE LA BASE NAVALE DE BREST SOUS MAÎTRISE D'OUVRAGE DE L'ÉTABLISSEMENT DU SERVICE D'INFRASTRUCTURE DE LA DÉFENSE (ESID), UN SECTEUR PRÉSENTANT UN RISQUE IMPORTANT DE LIQUÉFACTION DES SOLS SOUS SOLlicitATIONS SISMIQUES A ÉTÉ IDENTIFIÉ LORS DE LA CAMPAGNE DE RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE PRÉLIMINAIRE. LA SOLUTION CHOISIE A CONSISTÉ À RÉALISER EN ARRIÈRE DU QUAI DES COLONNES BALLASTÉES GARANTISSANT LA PÉRENNITÉ DU QUAI TOUT EN LIMITANT LES IMPACTS EN PHASE TRAVAUX SUR LES CONDITIONS D'EXPLOITATION IMPOSÉES PAR LE FONCTIONNEMENT DE LA BASE NAVALE.

### PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Le site est caractérisé par de fortes épaisseurs (jusqu'à 20 m) de remblais hétérogènes mis en œuvre dans les années 1950 directement sur le subs-

stratum schisteux du Dévonien, souvent altéré sur une faible épaisseur en tête. Les reconnaissances géotechniques, qui comportaient des sondages pressiométriques et SPT (Standard Penetration Test), ont permis de mettre en

**1- Réalisation  
d'une colonne  
ballastée.**

**1- Execution  
of a ballasted  
column.**

évidence plusieurs lentilles de sables lâches au sein des remblais, susceptibles de se liquéfier sous sollicitations sismiques. Etant donné la nature stratégique du site, le Service d'Infrastructure de la

Défense a souhaité que les nouveaux aménagements du quai soient dimensionnés en tenant compte des nouvelles directives parasismiques relatives aux ouvrages sensibles.

Le phénomène de liquéfaction des sols peut se produire lorsque les ondes sismiques de cisaillement conduisent à une forte augmentation de la pression interstitielle «  $u$  » au sein d'un sol granulaire lâche saturé. Cette augmentation de pression interstitielle a pour effet de diminuer la contrainte intergranulaire effective  $\sigma'$  jusqu'à ce qu'elle s'annule : le sol alors se liquéfie.

Ce phénomène, qui conduit à une diminution de volume du squelette granulaire du fait des sollicitations cycliques, peut potentiellement générer d'énormes dégâts sur les structures associées au sol concerné, par une perte totale de capacité portante. Lors du séisme de Kobé (Japon) de 1995, d'importants dommages ont ainsi été causés aux structures portuaires suite à la liquéfaction des sols (figure 2).

## DIAGNOSTIC ET CARACTÉRISATION DE L'ALÉA LIQUÉFACTION SOUS SOLLICITATIONS SISMQUES

Selon le zonage sismique de la France en vigueur (décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010), la commune de Brest est classée en Zone de sismicité 2 (aléa faible). L'application des règles parasismiques est obligatoire et il y a lieu de se reporter à l'Eurocode 8 (Norme NF EN 1998 - Calcul des structures pour leur résistance au séisme). Le SMS (Séisme Maximum de Sécurité) du site de Brest est caractérisé par un séisme de magnitude  $M_{SMS} = 6,3$  prenant origine à 20 km du site. L'accélération maximale en surface qui en résulte est de  $a_{max} = 0,165$  g. Suite aux réévaluations « post Fukushima » concernant la méthode de prise en compte du Séisme Maximum de Sécurité valant référence dans le dimensionnement des ouvrages sensibles, l'analyse de l'aléa de liquéfaction a été menée par Geos Ingénieurs Conseils en considérant plusieurs niveaux de risque. Le Maître d'Ouvrage a finalement retenu la prise en compte du SMS du site de Brest avec une magnitude  $M_{SMS}$  majorée de 0,5, soit un séisme de magnitude 6,8 sur l'échelle ouverte de Richter dont l'épicentre serait situé à 20 km du site. Le potentiel de liquéfaction des remblais sous séisme a été évalué selon 3 méthodes différentes :

→ Les méthodes définies en 2001 par Youd et Idriss et en 2010 par Idriss et Boulanger, qui permettent d'estimer le potentiel de liquéfaction d'un sol à partir des résultats d'essais de type SPT ;

→ La méthode définie par Youd et Idriss qui permet d'estimer le poten-

tiel de liquéfaction d'un sol à partir des mesures géophysiques (vitesse des ondes de cisaillement Vs) ;

→ La méthode d'évaluation simplifiée définie à l'ancien règlement de construction parasismique PS92, qui permet d'évaluer le potentiel de liquéfaction d'un sol au moyen de ses caractéristiques granulométriques.

Ces trois méthodes ont permis de confirmer le risque.

Dans la méthode d'analyse de liquéfaction des sols de Youd et Idriss (2001), l'évaluation du niveau de risque est faite en prenant en compte comme donnée d'entrée le nombre de coups  $N_{SPT}$  auquel sont appliquées plusieurs corrections permettant de tenir compte de plusieurs variables, comme la longueur du train de tige, le calibrage de la chambre SPT, la teneur du sol en particules fines, la dissipation de l'énergie de frappe, etc. L'application de ces facteurs permet d'obtenir un paramètre noté  $N1_{(60)CS}$  nécessaire à l'évaluation de l'aléa.

En partant de la méthode développée par Youd et Idriss, Geos Ingénieurs

Conseils a ensuite défini un objectif de réduction du risque via une augmentation de la compacité des terrains et du paramètre  $N1_{(60)CS}$ , et donc du nombre de coups  $N_{SPT}$  à l'essai SPT.

La figure 3 montre les  $N1_{(60)CS}$  issus des essais réalisés avant traitement, avec en pointillés la valeur à atteindre pour écarter le risque de liquéfaction sous séisme.

## SOLUTIONS ENVISAGÉES

Plusieurs solutions de traitement ont été envisagées afin de réduire l'aléa de liquéfaction, tout en respectant les impératifs en termes de délais et de contraintes d'exploitation du quai. Les principales contraintes figurant au cahier des charges étaient de garantir l'efficacité du traitement anti-liquéfaction sous un séisme de niveau SMS + 0,5 tout en minimisant l'impact sur le fonctionnement de la Base Navale de Brest (préservation du mur de quai et de la voie de grue portuaire) et en limitant les incidences pour les aménagements futurs.

De nombreuses techniques de travaux existent pour réduire le risque de liquéfaction, leur faisabilité dépendant de la nature des sols et des conditions de mise en œuvre (figure 4).

Les solutions d'amélioration du sol « dans la masse » n'ont pas été retenues : la technique du compactage dynamique a été écartée en raison de l'épaisseur de l'horizon à traiter et des impacts qu'elle aurait pu avoir sur la structure du quai existant et sur la voie de grue portuaire. De plus, pour garantir une efficacité de ce type de traitement sur les sols en profondeur, l'énergie de compactage aurait dû être importante. La technique du vibrocompactage a été écartée en raison de la trop grande proportion de fines dans les terrains superficiels. Quant à la technique de compactage par injection solide, elle a été écartée en raison de son coût élevé et de l'impact potentiel qu'elle aurait pu avoir sur le mur de quai et la voie de grue.

Les solutions de traitement par mise en œuvre d'inclusions rigides ont également été écartées en raison de leur faible efficacité pour ce type de problématique, de leur coût élevé et des contraintes qu'elles pouvaient induire pour les aménagements futurs.

Seules les solutions de renforcement par inclusions souples sont donc apparues comme pertinentes. Elles ont un coût modéré et génèrent de faibles contraintes pour les aménagements futurs du quai.

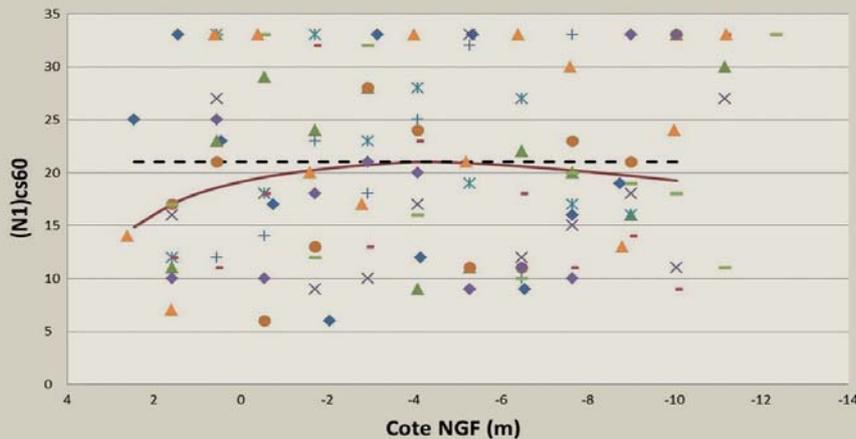
**2- Sinistre consécutif à la liquéfaction des terrains dans le port de Kobe - séisme de Hyogoken-Nambu (Kobe, Japon), 1995.**

**2- Disaster following liquefaction of the ground in Kobe port - Hyogoken-Nambu earthquake (Kobe, Japan), 1995.**

© KOBE GEOTECHNICAL COLLECTION, EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY



## VALEURS $N_{1(60)CS}$ MESURÉES ET OBJECTIF À ATTEINDRE AU NIVEAU SMS+0,5



3

© GEOS INGENIEURS CONSEILS

**3- Valeurs  $N_{1(60)CS}$  mesurées et objectif à atteindre au niveau SMS+0,5.**  
**4- Procédés d'amélioration et de renforcement des sols.**

**3-  $N_{1(60)CS}$  values measured and objective to be achieved at level SMS+0.5.**  
**4- Soil amendment and reinforcement processes.**

Ces techniques sont également les plus efficaces pour traiter le risque de liquéfaction des sols : la réalisation de pieux de sable ou de colonnes ballastées permet d'une part de densifier les sols encaissants par incorporation de matériau, et d'autre part d'assurer la dissipation rapide des surpressions interstitielles générées par les ondes de cisaillement d'un séisme (effet drainant).

Finalement, la solution d'un traitement par colonnes ballastées a été retenue, car c'est une technique mieux maîtrisée en France que celle des picots de sables, pour des coûts et des résultats relativement comparables. Son efficacité est reconnue et elle permet, par son mode de mise en œuvre, de limiter l'impact du traitement sur les murs caissons du quai et sur la voie de grue.

### PRINCIPE DE LA SOLUTION RETENUE

La technique des colonnes ballastées consiste à incorporer dans le terrain un matériau granulaire homogène et compacté de manière à créer dans le sol une inclusion souple, plus ou moins expansée en fonction de l'étreinte latérale des horizons traversés (figure 5). Pour atteindre le coefficient de sécurité recherché et donc l'objectif de

nombre de coups à l'essai SPT défini précédemment, une maille triangulaire de 2,2 m de côté a été définie dans l'étude de projet géotechnique G2-PRO réalisée par Geos Ingénieurs Conseils. Des colonnes ballastées, mises en œuvre selon cette maille jusqu'au substratum schisteux, permettent de traiter l'aléa de liquéfaction selon les critères fixés par le Maître d'Ouvrage.

## PROCÉDÉS D'AMÉLIORATION ET DE RENFORCEMENT DES SOLS

Méthode	Types de sols					
	Matériaux évolutifs tourbe	Argiles très molles	Argiles et limons compressibles	Remblais fins	Sables graveiers	Cailloux remblais à blocs
Amélioration de sol dans la masse	PRECHARGEMENT - DRAINAGE					
				VIBROCOMPACTAGE		
				COMPACTAGE DYNAMIQUE		
				INJECTION SOLIDE		
Renforcement des sols par inclusions souples	COLONNES BALASTEES					
	PLOTS BALASTEES PILONNES (épaisseur < 5 m)					
Renforcement des sols par inclusions et éléments rigides	DE TYPE PIEUX A REFOULEMENT / SANS REFOULEMENT ET JET GROUTING					
	DE TYPE COLONNES DEEP SOIL MIXING					

4

© FONDATIONS ET PROCÉDÉS D'AMÉLIORATION DES SOLS, GUIDE D'APPLICATION DE L'EUPROCODE 8, V. DAVIDOVICI ET S. LAMBERT, EYROLLES, 2013

## MÉTHODOLOGIE DE RÉALISATION D'UNE COLONNE BALLASTÉE

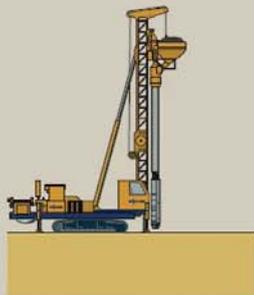
### 1 Préparation

La machine est mise en station au-dessus du point de fonçage, et stabilisée sur ses vérins. Un chargeur à godet assure l'approvisionnement en agrégats.



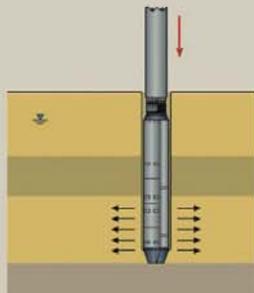
### 2 Remplissage

Le contenu de la benne est vidé dans le sas. Après sa fermeture, l'air comprimé permet de maintenir un flux continu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie.



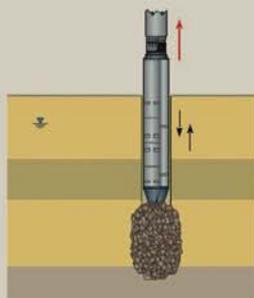
### 3 Fonçage

Le vibreur descend, en refoulant latéralement le sol, jusqu'à la profondeur prévue, grâce à l'insufflation d'air comprimé et à la poussée sur l'outil.



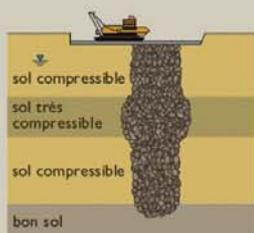
### 4 Compactage

Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est légèrement remonté et le matériau d'apport se met en place dans l'espace ainsi formé. Puis le vibreur est redescendu pour expander le matériau latéralement dans le sol et le compacter.



### 5 Finition

La colonne est exécutée ainsi, par passes successives, jusqu'au niveau prévu. Les semelles de fondations sont alors réalisées de manière traditionnelle.



### 5- Méthodologie de réalisation d'une colonne ballastée.

### 5- Methodology for execution of a ballasted column.

Ce traitement présente plusieurs avantages car il permet :

- De densifier considérablement les terrains par l'incorporation du ballast ;
- De dissiper rapidement les surpressions interstitielles générées par les ondes sismiques en agissant comme des drains ;
- D'augmenter la capacité portante du sol et donc de réduire le coût des fondations des aménagements futurs du quai ;
- La réalisation de terrassements éventuels pour les aménagements futurs du quai.

### PLANCHE D'ESSAI

Préalablement aux travaux de renforcement de sol, une planche d'essai a été exécutée.

Quatre sondages SPT ont été réalisés avant l'exécution des colonnes dans l'emprise de la planche d'essai. 27 colonnes ballastées ont ensuite été mises en œuvre jusqu'au substratum schisteux selon la maille prédéfinie. Après réalisation des colonnes, quatre sondages SPT et six CPT ont été réalisés au centre des mailles.

Les résultats des essais SPT ont atteint l'objectif du nombre de coups défini lors de la mission G2 PRO et ont donc permis de vérifier l'efficacité du traitement et de valider la maille retenue pour la réalisation des colonnes ballastées.

Des essais de dégarnissage de colonnes ont également eu lieu sur la planche d'essai. Une pelle mécanique a dégarni la tête de plusieurs colonnes à plusieurs profondeurs (1 m, 1,5 m et 2 m), afin de pouvoir en mesurer le diamètre effectif et ainsi vérifier que le diamètre défini au cahier des charges était bien obtenu.

L'entreprise Keller a proposé une variante portant sur les modalités de contrôle du traitement à l'avancement. Cette variante prévoyait de remplacer plusieurs sondages SPT par des CPT, dans un souci d'optimisation des coûts et surtout des délais. Le sondage de type CPT, par sa simplicité de mise

en œuvre et sa rapidité d'exécution, permet de multiplier les points de contrôle et ainsi d'obtenir une meilleure appréciation de l'efficacité du traitement sur l'ensemble de l'emprise du chantier. La réalisation de la planche d'essai a permis l'étalonnage et la validation de cette variante, et également la définition des objectifs de résistance de pointe  $q_c$  à atteindre au CPT comparativement à l'objectif  $N_{SPT}$ .

Lors de la réalisation de la planche d'essai, un effet inattendu du traitement a été constaté. En effet, lors du fonçage du vibreur pour la réalisation d'une colonne, les terrains superficiels granulaires les plus lâches ont eu tendance à tasser par réagencement des grains sous l'effet des vibrations et des cuvettes de tassements sont apparues au droit des colonnes (figure 6). Là où d'éventuels soulèvements de la plate-forme étaient attendus en raison de l'incorporation d'un volume important de matériaux (ballast), des problématiques de tassement des terrains sous l'effet du traitement ont finalement dû être prises en compte et il a fallu adapter la méthodologie de réalisation des colonnes.

L'adaptation du traitement a consisté à apporter des matériaux granulaires « propres » (sables déclassés) en surface, au fur et à mesure de la réalisation des colonnes. Cette modification avait un but double : garantir une étreinte latérale autour du vibreur (et donc la bonne exécution du forage) et permettre de compenser en temps réel les tassements générés par le réagencement des remblais granulaires par effet de vibrocompactage (figure 7).

### DÉROULEMENT DES TRAVAUX

La réalisation des travaux d'amélioration du sol a été confiée à l'entreprise Keller Fondations Spéciales. Le programme initial du chantier était donc de réaliser près de 1 300 colonnes ballastées jusqu'aux schistes compacts, soit une hauteur moyenne estimée de 15 m.

Les colonnes ballastées ont été réalisées avec une foreuse Keller type 4 (figure 8).

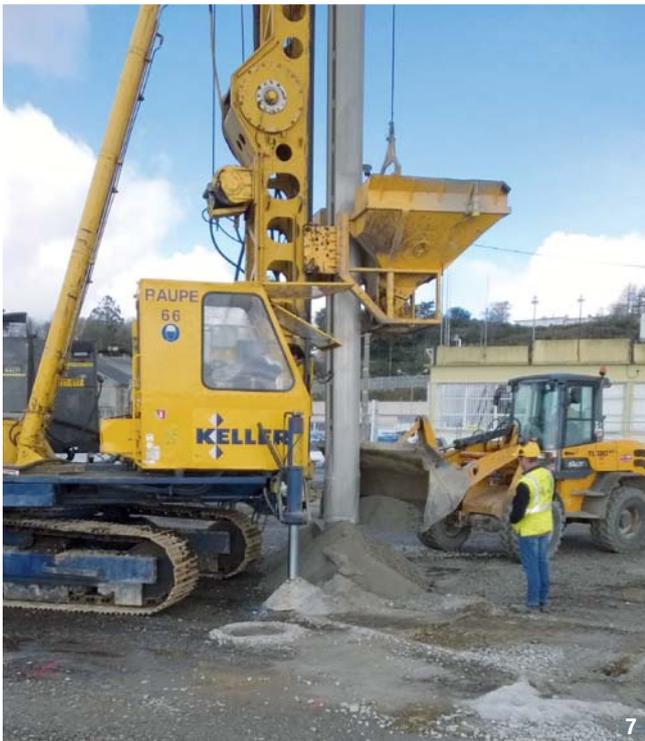
### CONTRÔLE HEBDOMADAIRE DE LA PRODUCTION

Durant toute la durée du chantier, Geos Ingénieurs Conseils a réalisé un contrôle continu des quantités de matériau incorporées au terrain.

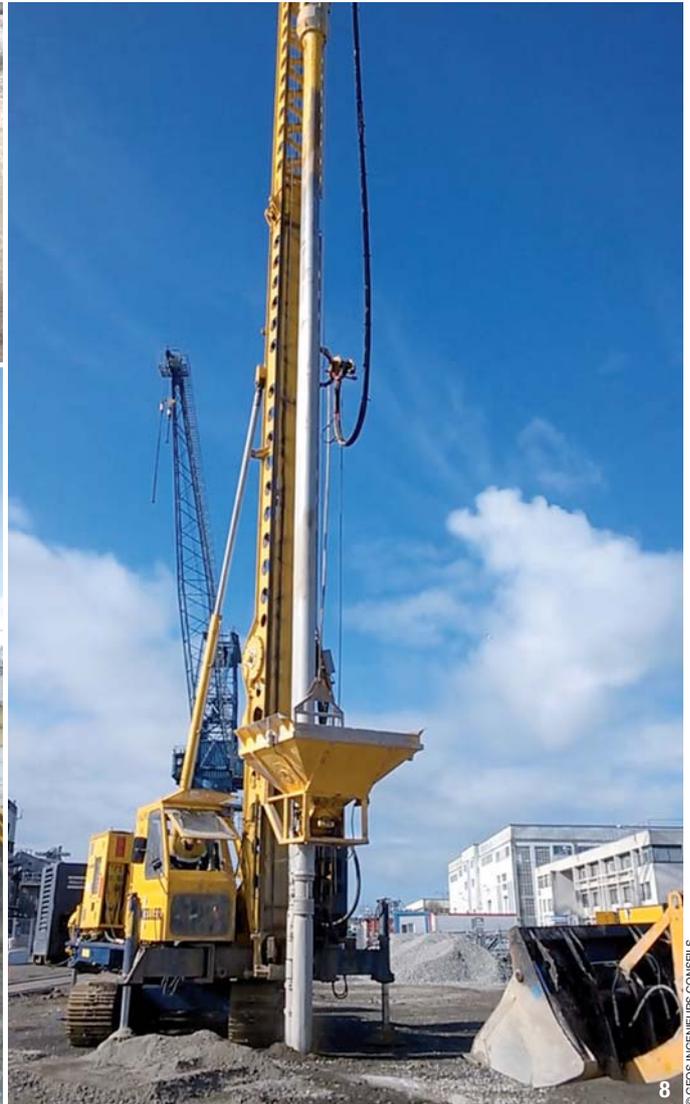
Chaque colonne a fait l'objet de deux fiches spécifiques.



6



7



8  
© GEOS INGENIEURS CONSEILS

La première détaille les paramètres de forage, à savoir la profondeur du vibreur, la force d'activation (poussée verticale), l'intensité électrique du vibreur et sa température, en fonction du temps. Une seconde fiche fait état du volume incorporé en fonction de la profondeur et du diamètre théorique de la colonne (figure 9). Ces fiches de production ont été transmises à une fréquence hebdomadaire à Geos Ingénieurs Conseils. Ce suivi régulier et précis du déroulement du chantier a permis d'une part une maîtrise des volumes de ballast incorporés (et donc des coûts), et d'autre part une bonne réactivité en cas d'évènement inattendu.

#### CONTRÔLE DU TRAITEMENT À L'AVANCEMENT

Des contrôles de l'efficacité du traitement ont été réalisés à l'avancement par sondages SPT et CPT.

10 essais SPT et 28 essais CPT ont été répartis sur l'ensemble de la zone d'implantation des colonnes ballastées (figure 10). Ils ont permis de vérifier l'atteinte des objectifs de compacité garantissant l'efficacité du traitement.

#### DES TASSEMENTS EXCESSIFS ET INCOMPATIBLES

Outre les contrôles de l'efficacité du traitement réalisés par plusieurs essais SPT et CPT durant la mise en œuvre des colonnes ballastées, un suivi continu des déplacements a été assuré sur 18 cibles placées sur les voies de grues, en bordure du quai.

Des tolérances de déplacement strictes avaient été fixées au cahier des charges afin d'éviter les soulèvements/tassements intempestifs. Elles devaient permettre de garantir le maintien de la voie de grue en fonctionnement dès la fin du traitement.

**6- Cuvettes de tassement durant l'exécution des colonnes de la planche d'essai.**

**7- Apport de matériau granulaire en surface.**

**8- Forage d'une colonne ballastée.**

**6- Subsidence basins during execution of columns for the test section.**

**7- Surface filling with granular material.**

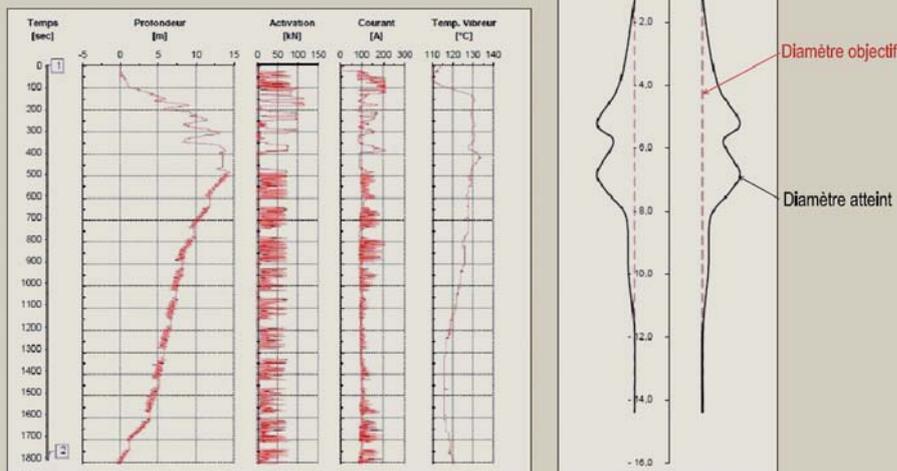
**8- Ballasted column drilling.**

Une méthodologie spécifique avait été définie pour les colonnes implantées au plus près de la bordure du quai et des voies de grue. Des avant-trous étaient réalisés à la tarière jusqu'à 4 m de profondeur avant la descente du vibreur, puis le compactage était arrêté à 3 m de la plateforme, sous le niveau d'assise de la longrine de la voie de grue, ceci afin d'éviter des mouvements trop importants.

Cependant, les tassements des sols constatés sur la planche d'essai ont également été observés sur les premières zones traitées, avec des déplacements verticaux de plusieurs dizaines de centimètres. Deux facteurs ont été avancés pour expliquer ces tassements excessifs :

→ Les sols très hétérogènes comportaient des teneurs en fines très variables en fonction des horizons rencontrés. La présence de lentilles

## EXTRAITS DES FICHES DE PRODUCTION SPÉCIFIQUES À CHAQUE COLONNE BALLASTÉE



© KELLER FONDATIONS SPÉCIALES

9

sableuses très lâches, comportant moins de 10% de fines et donc sensibles au vibrocompactage, a généré des affaissements importants de la plateforme sous l'effet du vibreur, par réagencement des grains et densification de ces horizons ;

→ Sous l'effet des variations du niveau piézométrique, corrélées aux marées, il a pu se produire un phénomène de reprise des migrations des particules fines contenues dans les sols vers les vides interstitiels des colonnes.

De nouvelles dispositions spécifiques ont donc dû être étudiées afin de garantir l'efficacité du traitement sur l'ensemble de la zone et de préserver le quai ainsi que la voie de grue portuaire. L'effet de vibrocompactage observé ayant généré des tassements de plusieurs dizaines de centimètres, la Maîtrise d'Œuvre a proposé au Maître d'Ouvrage plusieurs solutions confortatives :

→ Réaliser une reprise en sous-œuvre de la voie de grue par micropieux forés au travers de la longrine avant la reprise du traitement, avec comme difficulté principale le recalage nécessaire du rail de la voie ayant déjà tassé au-delà des seuils admissibles ;

→ Procéder à la dépose de la longrine et du rail arrière existants, puis à la reconstruction du linéaire impacté en fin de traitement, en fondant la nouvelle longrine sur pieux afin de garantir par la même occasion la stabilité sous séisme de la nouvelle voie de grue.

Le Maître d'Ouvrage a opté pour la seconde solution, qui permettait de ne pas impacter les délais de réalisation des colonnes ballastées et de s'affranchir d'une reprise des déformations ayant déjà affecté la voie. ▷

**9- Extraits des fiches de production spécifiques à chaque colonne ballastée.**

**10- Ateliers de sondages de contrôle SPT (10b) et CPT (10a).**

**9- Excerpts from specific production sheets for each ballasted column.**

**10- SPT (10b) and CPT (10a) test boring equipment.**



10a

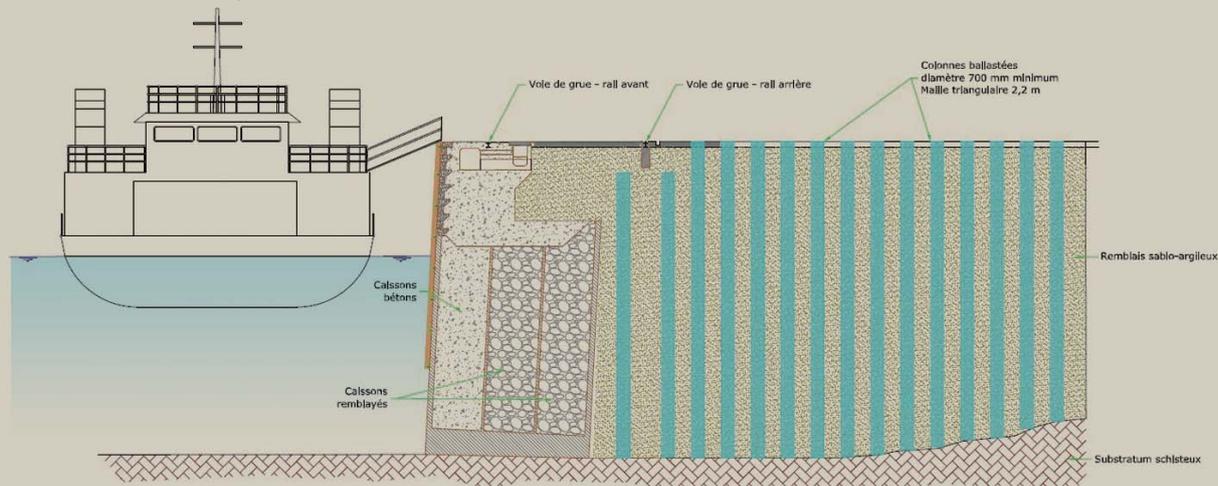
© GEOS INGENIEURS CONSEILS

© GEOS INGENIEURS CONSEILS



10b

## VUE EN COUPE DU QUAÏ



11

© GEOS INGÉNIEURS CONSEILS

### BILAN DES TRAVAUX

À l'issue du traitement de la plateforme, les contrôles SPT et CPT ont montré l'efficacité du traitement, avec plus de 90% des valeurs permettant de vérifier un coefficient de sécurité supérieur à 1,25. Certains sondages de contrôle CPT n'ont d'ailleurs pu être menés

11- Vue en coupe du quai.

11- Cross-section view of the dock.

jusqu'au substratum schisteux tant la densification du terrain était importante entre les colonnes. Sur les 5 250 m<sup>2</sup> traité, un volume total de ballast de près de 8 500 m<sup>3</sup> a été incorporé, soit 1,60 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Les tassements observés sur la plateforme ont localement atteint une amplitude de 50 cm, pour

les zones où les terrains les plus lâches ont été rencontrés. Les opérations de contrôle ont montré que la technique des colonnes ballastées pour pallier le risque de liquéfaction s'est révélée très bien adaptée au contexte géologique et aux contraintes techniques imposées au cahier des charges (figure 11). □

### PRINCIPALES QUANTITÉS

**SURFACE DE QUAÏ TRAITÉE** : environ 25 m x 210 m soit 5 250 m<sup>2</sup>  
**COLONNES BALLASTÉES RÉALISÉES** : 1231 unités d'une hauteur moyenne de 13,6 m, soit 16 680 m au total  
**QUANTITÉ TOTALE DE BALLAST INCORPORÉ** : 12 624 t soit 8 457 m<sup>3</sup>  
**VOLUME MOYEN / MIN / MAX PAR COLONNE** : 6,9 m<sup>3</sup> / 2 m<sup>3</sup> / 15 m<sup>3</sup>  
**TAUX D'INCORPORATION MOYEN** : 1,60 m<sup>3</sup> de ballast par m<sup>2</sup> de plateforme traitée  
**DURÉE DES TRAVAUX** : 20 semaines environ

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE** : ESID Brest - Service d'Infrastructure de la Défense  
**MAÎTRE D'ŒUVRE GÉNÉRAL** : Ingerop  
**MAÎTRE D'ŒUVRE GÉOTECHNIQUE** : Geos Ingénieurs Conseils  
**ENTREPRISE** : Keller Fondations Spéciales  
**CONTRÔLES SPT** : Ginger Cebtp  
**CONTRÔLES CPT** : Geosoltis

### ABSTRACT

#### BREST MILITARY HARBOUR: TREATMENT OF LIQUEFACTION RISK BY BALLASTED COLUMNS BEHIND A DOCK WALL

LAURENT SAUSSAC, GEOS - ERWAN MOAL, GEOS - ANNE GANDIHON, KELLER

The Defence Infrastructure Department (ESID) wanted to renovate a dock in the Brest Naval Base. A preliminary geotechnical reconnaissance campaign was carried out, involving pressure measurement tests and SPT boring. These investigations identified an area with a high risk of soil liquefaction under seismic loading. Geos Ingénieurs Conseils defined a ballasted-column anti-liquefaction treatment solution. The works were performed by contractor Keller Fondations Spéciales, with Geos Ingénieurs Conseils providing comprehensive project management services. The ballasted column technique proved very appropriate for the ground and was able to reduce the risk of soil liquefaction while meeting the requirements of the Brest Naval Base in terms of efficiency and constraints of dock operation during the work phase. □

#### PUERTO MILITAR DE BREST: TRATAMIENTO DEL RIESGO DE LICUEFACCIÓN CON COLUMNAS BALASTADAS EN LA PARTE POSTERIOR DE UN MURO DE MUELLE

LAURENT SAUSSAC, GEOS - ERWAN MOAL, GEOS - ANNE GANDIHON, KELLER

Para realizar una rehabilitación del Quai d'Armement Droit Est de la Base naval de Brest decidido por el Establecimiento del Servicio de Infraestructura de Defensa (ESID), se ha llevado a cabo una campaña preliminar de reconocimientos geotécnicos que incluía ensayos presiométricos y sondeos SPT. Estos estudios permitieron identificar una zona que presentaba un importante riesgo de licuefacción de los suelos sometidos a cargas sísmicas. Geos Ingénieurs Conseils determinó una solución de tratamiento antilicuefacción con columnas balastadas. La empresa Keller Fondations Spéciales se ha encargado de las obras y Geos Ingénieurs Conseils de toda la dirección de obra. La técnica de las columnas balastadas demostró estar bien adaptada a los terrenos y permitió reducir el riesgo de licuefacción de los suelos respetando las exigencias de la Base Naval de Brest en términos de eficacia y exigencias de explotación de los muelles durante las obras. □