

FACTS ABOUT

Informations sur l'amélioration des sols

UNE MISE À JOUR DES INFORMATIONS DE L'IADC - NUMÉRO 5 - 2008

QU'EST-CE QUE L'AMÉLIORATION DES SOLS ?

Dans le secteur du dragage l'amélioration des sols est généralement appliquée pour :

- empêcher le tassement excessif des terres renflouées quand elles sont utilisées pour la construction (routes, aéroports, ponts et autres fondations) ;
- augmenter la rigidité du sol afin d'empêcher la liquéfaction et les dommages consécutifs aux structures dans des régions sismiques ;
- augmenter la résistance au cisaillement du sol afin d'empêcher les glissements de terrain ;
- augmenter la portance du sol ; et/ou
- immobiliser ou stabiliser les contaminants dans le sol dragué afin d'éliminer des incidences sur l'environnement.

Les techniques d'amélioration changent selon les caractéristiques du sol. Certaines techniques sont appliquées pour consolider le sous-sol meuble existant et d'autres le sont spécifiquement pour compacter les terres nouvellement créées.

QUELLE EST LA DIFFÉRENCE ENTRE COMPACTER ET CONSOLIDER ?

Il convient de distinguer les techniques de compactage pour des terres nouvelles et les techniques de consolidation pour les sols meubles. Le compactage est utilisé pour les sols à gros grains (sable) et peut être réalisé avec des rouleaux lisses, HEIC, ou des compacteurs à impact dynamique ou à impact rapide ou par vibroflottation. Lorsque le sol est trop fin ou trop limoneux, des méthodes de remplacement sont utilisées. Il peut s'agir de colonnes ballastées avec du sable, avec du gravier et un mélange cimenté ou d'autres matériaux appropriés qui rendent le sol presque immédiatement opérationnel. D'autres techniques sont utilisées exclusivement pour accélérer la consolidation des sols meubles. Elles comprennent des drains verticaux, des drains de sable et un système connu notamment comme BeauDrain, IFCO ou PTD, ainsi que la consolidation par le vide, autant de méthodes pour lesquelles l'amélioration du sol demande plus de temps.

POURQUOI LA CONSOLIDATION POUR L'AMÉLIORATION DES SOLS EST-ELLE UTILISÉE PENDANT LE REFOULEMENT DE TERRES ?

Le refoulement de terres le long des côtes est l'une des activités les plus significatives de l'industrie du dragage. Dans la plupart des pays, les zones côtières sont déjà densément peuplées, mais néanmoins les terres proches des eaux continuent à attirer les personnes qui veulent s'y livrer à des loisirs ou y habiter. Par conséquent, compte tenu de la croissance de la population mondiale, les terres le long des côtes sont devenues rares, ce qui entraîne une hausse des prix du foncier.

Renflouer des terres sur la mer est souvent une solution moins onéreuse. Généralement, les sites potentiels choisis pour ce faire sont des zones côtières peu profondes ou des basses terres marécageuses. Le sol de ces régions se compose souvent d'épaisses couches d'argile molle ou de vases. Les travaux de renfoulement augmentent la charge sur ces couches meubles, causant un tassement étendu. Attendre un tassement naturel de ces sols est une option longue et donc coûteuse. Afin d'accélérer le processus, l'industrie du dragage a investi dans une recherche technologique élargie sur la consolidation de ces sols meubles. En outre, les terres nouvellement renflouées sont souvent très meubles et elles doivent être compactées.

COMMENT L'AMÉLIORATION DES SOLS EST-ELLE UTILISÉE POUR RÉDUIRE LES INCIDENCES SUR L'ENVIRONNEMENT ?

L'amélioration des sols est également appliquée pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sols meubles contaminés en immobilisant les métaux lourds et autres contaminants. Plusieurs techniques ont été développées afin de consolider les sédiments contaminés, notamment l'assèchement des sédiments pour réduire la quantité de terre, ou en combinant les sédiments avec des additifs, par exemple en mélangeant les sédiments avec du ciment, ce qui permet le recyclage des sédiments en tant que matériau de construction ou de récupération de terres sur les eaux.

QUEL EST L'AVANTAGE DE L'AMÉLIORATION DES SOLS POUR LES ZONES À RISQUE SISMIQUE ?

Dans certaines régions du monde comme le Japon et la Californie, la fréquence de l'activité sismique peut menacer les constructions maritimes. Cela peut être un problème sérieux lors de l'installation d'équipement en mer et d'autres structures marines telles que des tunnels, quais, ports, aéroports en mer, etc. Ici aussi, les technologies de pointe ont fait des progrès réguliers dans les contre-mesures qui permettent de faire face à la menace de l'instabilité sismique en limitant les risques de liquéfaction du sol.

QU'EST-CE QUE LA LIQUÉFACTION DES SOLS ?

La liquéfaction est un phénomène qui se produit dans les sols saturés, à savoir les sols où l'espace entre les différentes particules est complètement rempli d'eau. L'eau exerce une pression sur les particules du sol, ce qui influence la compacité des particules elles-mêmes. D'une manière générale, la pression de l'eau dans le sol est relativement basse. Toutefois, en cas de tremblement de terre, la secousse peut augmenter la pression de l'eau jusqu'à un point où les particules du sol commencent à bouger et à créer une situation instable. Une telle augmentation de pression d'eau peut également être provoquée par des activités de construction comme le dynamitage. La liquéfaction diminue la résistance du sol et réduit sa capacité à soutenir les fondations des bâtiments, des ponts et des autres structures. Le risque de liquéfaction peut se produire dans les sols meubles existants aussi bien que dans les terres renflouées.

L'AMÉLIORATION DES SOLS EST-ELLE TOUJOURS NÉCESSAIRE ?

Dans le cas de terres renflouées, une consolidation laissée à son cours naturel peut prendre une décennie ou plus. Compte tenu de l'urgence des besoins d'expansion, ce délai d'attente pour pouvoir construire est considéré comme trop long. En fait, si les nouvelles terres ne sont pas utilisables pour la construction dans un délai raisonnable, et si la construction des équipements prévus est retardée jusqu'à ce que la terre se soit assez tassée pour soutenir des bâtiments, un aéroport ou des maisons, le projet peut être compromis. Une période d'attente prolongée peut avoir ainsi des implications sociales et financières cruciales, puisque pour des raisons économiques et sociales les nouvelles terres sont habituellement nécessaires le plus tôt possible.

Les techniques d'amélioration des sols utilisées aujourd'hui ont sensiblement raccourci les délais de préparation des nouvelles terres pour l'utilisation, et ont donc assuré la viabilité économique de beaucoup de projets. La phase de consolidation est devenue une part essentielle de l'amélioration des sols, et plusieurs techniques ont été développées pour stabiliser les terres conquises. Parmi ces dernières, il y a les drains verticaux préfabriqués, le mélange de sol in-situ ou les méthodes de mélange profond de ciment. Le compactage par impact avec énergie élevée est employé pour compacter les 2 ou 3 mètres supérieurs des nouvelles terres.

QUE SONT LES DRAINS VERTICAUX ?

La stabilisation des sols recourt à des drains verticaux préfabriqués ou « mèche » pour les zones dont les sols sont meubles, compressibles et saturés en eau, notamment l'argile et l'argile limoneuse. Ces sols sont caractérisés par une structure très faible et une grande porosité, et sont donc habituellement remplis d'eau (eau interstitielle). Quand une charge comme celle d'un remblai de route, d'un remblai hydraulique ou d'une digue est placée sur des sols meubles compressibles, des tassements significatifs peuvent se produire. Ces tassements peuvent créer des problèmes sérieux. Toute augmentation de charge peut provoquer une augmentation de pression de l'eau interstitielle. Dans les sols imperméables, cette eau se dissipe très lentement, coulant graduellement de la zone soumise à la contrainte. Une pression interstitielle accrue peut également causer l'instabilité du sol et des glissements peuvent en résulter.

Un système de drains verticaux généralement placé selon un modèle carré ou triangulaire, avec des drains espacés d'environ 1 à 3 mètres, permet une évacuation accélérée de l'excès d'eau interstitielle, ce qui réduit le risque de glissements de terrain. La consolidation des sols cohésifs meubles avec des drains verticaux peut ramener le temps de tassement de quelques années à quelques mois, avec une garantie de portance adéquate, et la construction peut débuter rapidement.

QU'EST-CE QUE LA CONSOLIDATION PAR LE VIDE ?

La consolidation sous vide est un processus par lequel une pression sous vide est appliquée à un secteur déjà doté de drains verticaux préfabriqués pour augmenter potentiellement l'efficacité des drains. Cette technique exige généralement l'application d'une surcharge afin de chasser l'eau hors des sols argileux meubles. La surcharge en question doit être égale ou supérieure à la charge de service à laquelle les terres conquises seront soumises. Dans ce type



Le système de « drains verticaux » est une méthode employée pour accélérer l'assèchement du sol. Ici, des plaques d'ancrage sont utilisées pour marquer l'endroit de chaque drain avant la pose.

de consolidation, la pression appliquée contribue à la surcharge, et donc les niveaux de surcharge réels sont réduits. Un avantage important supplémentaire de cette technique est la nature isotrope de la pression de vide et l'amélioration corrélée de la stabilité sous précharge, ce qui réduit considérablement le risque de glissement de terrain consécutivement à la surcharge.

SYSTÈMES BEAUDRAIN, IFCO ET PTD : DE QUOI S'AGIT-IL ?

Récemment, plusieurs nouveaux systèmes ont été développés pour une consolidation forcée par pompage des eaux souterraines. Des variations de cette technique s'appellent IFCO, PTD et BeauDrain. Le concept BeauDrain-IFCO-PTD combine des méthodes existantes et éprouvées telles que le drainage vertical, le chargement atmosphérique (consolidation par le vide), et la possibilité d'appliquer une surcharge additionnelle pour accélérer le processus de consolidation de sols meubles et compressibles. Les IFCO et les PTD ont des fentes faites dans le sable à une faible distance entre eux, et à une profondeur d'environ 7 mètres, avec un drain au fond. Les eaux souterraines excédentaires s'écoulent de la terre environnante par ce drain à un rythme plus rapide. Le système BeauDrain fonctionne avec des rangées serrées de drains « mèche » verticaux, tous reliés à un drain collecteur horizontal. Ce drain collecteur horizontal est posé à une profondeur d'approximativement 1 à 2 mètres en dessous du sommet des strates compressibles, et relié à une pompe à vide qui enlève l'excès d'eau par pression.

Y A-T-IL D'AUTRES MÉTHODES POUR AMÉLIORER, RENFORCER OU STABILISER DES SOLS ?

Pour réduire le tassement et améliorer la résistance au cisaillement ainsi que la rigidité, et donc pour améliorer les sols, d'autres méthodes incluent les colonnes ballastées, les piliers, une variété de techniques de mélange de sol, ou le mélange in-situ des sols dans une grille. Quand on utilise une grille de colonnes, de piliers ou des colonnes mélangées in-situ, un matelas de transition peut être nécessaire sur le site pour transférer les charges de surface sur des supports discrets dans le sol. Ces techniques requièrent significativement moins de surcharge, voire aucune, et elles fournissent généralement une économie substantielle de temps. Ces traitements sont en général plus coûteux.

QU'EST-CE QUE LE COMPACTAGE PAR IMPACT À ÉNERGIE ÉLEVÉE ?

Le compactage par impact à énergie élevée, utilisé pour compacter les 2 ou 3 mètres supérieurs de la surface des terres remblayées, se compose d'un module non-circulaire et asymétrique de compactage remorqué par un tracteur. À chaque rotation, le module se lève vers le haut sur son point de contact avec le sol et s'abaisse pour créer une énergie d'impact qui fournit le tassement. Le mécanisme de compactage par impact permet à l'énergie de compactage d'atteindre des niveaux plus profonds que ceux atteints par des bulldozers statiques normaux ou des méthodes de compactage par vibration.

QU'EST-CE QUE LE MÉLANGE DE SOL IN-SITU OU SYSTÈME DE MÉLANGE-CIMENT ?

Dans de nombreuses régions du monde, un sous-sol meuble est un problème grave pour la construction maritime. Dans ces situations, le mélange de sol in-situ est souvent appliqué. Cette méthode est connue sous diverses appellations, comme la méthode de mélange profond par ciment, colonnes/piliers de ciment pour sol, mélange à la tarière, mélange sol-ciment, mélange rotatif ou simplement mélange de sol. La base de tous ces systèmes de mélange est que le durcisseur de ciment est d'abord mélangé avec de l'eau sous forme de boue pour être ensuite injecté dans le sol par des pompes de haute puissance.

Simultanément, pendant cette phase d'injection, le sol est remué complètement par des lames de mélange en rotation. Le ciment réagit avec l'eau interstitielle du sol, ce qui produit un durcissement in-situ. Le sol est donc amélioré en des endroits spécifiques selon les normes requises dans le temps le plus court et de manière économique.

Ces méthodes de mélange avec du ciment sont utilisées pour les éléments suivants : fondation des brise-lames, des revêtements et des quais ; renforts sismiques des structures marines existantes ; fondation des piliers de pont, des réservoirs, des chemins de fer, des routes, des digues de fleuve et des bâtiments ; murs de coupure et murs renforcés ; et contre-mesures pour la liquéfaction.

QU'EST-CE QUE LA VIBROFLOTTATION ?

Certaines vibrations permettent de transformer des sols meubles, sans cohésion, en les rendant extrêmement denses. Ce compactage est permanent et augmente la densité de portance du sol, réduisant les risques d'affaissement ou de liquéfaction suite aux secousses sismiques. La vibroflottation est particulièrement efficace dans les sols avec une teneur en limon allant jusqu'à 20 pour cent.

QU'EST-CE QUE LE SYSTÈME DE DRAIN DE SABLE ?

Le système de drain de sable permet le mélange d'améliorants de sol, tels que le ciment et des agents d'antiséparation, avec du sable qui est laissé dans un coffrage. Une fois séché, cela forme des cylindres de sable ou piliers qui fournissent une plus grande portance dans le sol sous-marin afin de répondre aux besoins du projet.

Un navire spécialement conçu pour ce type de drain et doté de coffrages est disponible pour la mise en œuvre de ce système. Le navire peut mélanger à bord les améliorants de sol avec le sable pour former des cylindres de sable aux endroits voulus. Ces coffrages sont enfoncés dans le fond de la mer à la profondeur requise. L'amélioration de sol est alors effectuée dans les coffrages qui forment des colonnes de sable de qualité sur le site.

COMMENT LES GÉOTEXTILES SONT-ILS UTILISÉS POUR AMÉLIORER LES SOLS ?

Les géotextiles ont beaucoup d'applications, notamment la filtration et le drainage. Des types spécifiques de géotextiles peuvent également être employés pour stabiliser des remblais et améliorer la portance des fondations de projets marins dans des sols meubles. Il convient d'être attentif à la composition du géotextile dans des situations spécifiques. Utiliser le géotextile approprié augmente la sécurité contre un affaissement souterrain et réduit le tassement des fondations en sous-sol.

QUELS SONT LES AUTRES AVANTAGES DE L'AMÉLIORATION DES SOLS ?

Quelques méthodes d'amélioration peuvent également fournir des moyens rentables pour réduire la contamination des sols. L'assèchement des sols contaminés a un double

effet. Une partie du sol amélioré peut être réutilisée pour des projets de construction, éliminant la nécessité d'extraire de nouveau du sable de mine.

Les quantités de sédiment inutilisable sont réduites, ce qui diminue l'espace requis pour le stockage, qui est toujours coûteux et problématique en termes d'environnement. En outre, quand des additifs tels que le ciment sont employés pendant l'amélioration du sol, les deux augmentent la portance des sols pour des travaux de construction et immobilisent également les sédiments marins contaminés.

L'AMÉLIORATION DES SOLS EN VAUT-ELLE LA PEINE ?

Dans les projets de remblai de terres, les coûts des opérations de dragage et de remplissage, y compris l'amélioration des sols et la construction de digues, sont encore moins élevés que les prix par mètre carré de terre existante en bord de mer. De récentes études ont comparé les propriétés existantes en bord de mer à Rotterdam, Singapour, Dubaï et Tokyo avec les terres reflouées sur la mer.

Dans tous les cas, les coûts de récupération et d'amélioration de sol rendaient les nouvelles terres financièrement attractives et viables par comparaison aux terres urbanisées côtières et leurs prix élevés. En outre, les avantages environnementaux inhérents à l'amélioration du sol peuvent être vus dans le cadre d'une atténuation de l'instabilité pendant des événements sismiques, avec par conséquent une limitation de l'effondrement catastrophique possible du sous-sol et des infrastructures construites sur ce sous-sol. En termes écologiques, l'utilisation d'un sol dragué, stabilisé et amélioré réduit la nécessité des extractions de sable.

Y A-T-IL UN SYSTÈME D'AMÉLIORATION DES SOLS PRÉFÉRABLE AUX AUTRES ?

Après avoir examiné de nombreux essais et tests, on doit en conclure qu'il existe de nombreuses options pouvant accélérer de manière fructueuse la consolidation des sols et des sédiments dragués pour développer de nouvelles terres, ou des méthodes de compactage permettant de stabiliser le sous-sol dans les zones sismiques sensibles. Chaque technique a ses propres avantages et inconvénients par rapport au temps, au coût et à la mise en œuvre. La meilleure méthode est toujours d'étudier les besoins spécifiques et d'entrer en contact avec des entrepreneurs spécialisés pour évaluer les besoins du projet. Bien que cette étape d'évaluation puisse apporter des coûts additionnels, une préparation appropriée, que ce soit par des essais, des tests de terrain ou en laboratoire, et avec un suivi intensif de la mise en œuvre, sera finalement amortie



International Association of Dredging Companies, PO Box 80521, 2508 GM The Hague, The Netherlands
tel. +31 (0)70 352 3334, fax +31 (0)70 351 2654, e-mail: info@iadc-dredging.com, www.iadc-dredging.com

dans l'efficacité plus grande avec laquelle la terre sera sécurisée. Un système d'amélioration de sol bien géré et approprié au site augmentera les perspectives d'une remise sûre du projet dans les délais impartis.

POUR EN SAVOIR DAVANTAGE SUR LE SUJET :

Jay Ameratunga, Cynthia De Bok, Peter Boyle, Bill Tranberg (2007). "Planning for the Future - Ground Improvement Trials at the Port of Brisbane", *Terra et Aqua*, Numéro 108, Septembre.

J. Ameratunga, P. Shaw et P. Boyle. (2003). *Challenging Geotechnical Conditions at the Seawall Project in Brisbane*, Coasts and Ports Conference (PIANC) 2003, Auckland, NZ.

M. Andrews, P. Boyle, J. Ameratunga et K. Jordan (2005). *Sophisticated and Interactive Design Process Delivers Success for Brisbane's Seawall Project*, Coasts and Ports Conference, Adelaide, Australia.

Sina Avsar, Mark Bakker, Gert Bartholomeeusen et Jan VanMechelen (2006). "Six Sigma Quality Improvement of Compaction at the New Doha International Airport Project", *Terra et Aqua*, Numéro 103 Juin.

Frederic Gladstone Bell (1993). *Engineering Treatment of Soils*. Taylor & Francis Publishers, UK.

C.J. Dykstra et A.H. Nooy van der Kolf (2003). "Recent Innovations in the Design and Construction of Railway Embankments", *Terra et Aqua*, Numéro 93, Décembre.

H.A. de Leeuw, E.P.T. Smits, F.A.J.M. Mathijssen et A.L.Ph. Estourgie (2002). "Reclamation on Soft Subsoil by Spraying Thin Layers of Sand : The "IJburg" Project near Amsterdam". *Terra et Aqua*, Numéro 89, Décembre, pp. 9-30.

J. Van Miegheem, F. Aerts, G. J.L. Thues, H. De Vlieger et S. Vandycke (1999). "Building on Soft Soils", *Terra et Aqua*, n° 75, Juin.

Raj Purushothama (2005). *Ground Improvement Techniques*. Firewall Media Publishing.

J. Spelt (2007). "TechNote: Vertical drainage installed from pontoons in Bremerhaven storage depot", *Terra et Aqua*, n° 106, Mars, pp. 26-28.

D'autres liens relatifs la littérature appropriée sur le dragage sont disponibles sur www.iadc-dredging.com, cliquez sur IADC Activities.

Cette brochure est présentée par l'International Association of Dredging Companies dont les membres proposent la plus haute qualité et le plus grand professionnalisme dans les projets de dragage et de construction maritime.

Les informations contenues dans la présente brochure sont présentées dans le cadre d'un effort continu pour aider les clients et d'autres tiers dans la compréhension des principes fondamentaux du dragage et de la construction maritime.