

Importance et applications des inclusions de grande inertie

Importance and practical examples of inertial soil improvement

Jeanty J.M., Mathieu F., Benhamou L.
Soletanche-Bachy, Rueil-Malmaison, France.

Berthelot P.
Bureau Veritas, Paris, France.

RÉSUMÉ : Les techniques traditionnelles d'amélioration des sols par inclusions visent le plus souvent à renforcer l'aptitude du massif à reprendre les charges verticales auxquelles il est soumis, moyennant des déformations acceptables par les ouvrages. Elles peuvent également avoir pour objectif d'améliorer la résistance aux efforts horizontaux, et plus généralement aux sollicitations à dominante déviatorique, dans le cadre de problématiques liées aux séismes (traitements anti-liquéfaction), à la stabilité générale (remblais sur sols compressibles), à la réduction des poussées sur des ouvrages de soutènement, au poinçonnement du sol sous de fortes surcharges (effets de bord), ... La réalisation d'inclusions à forte inertie, sous forme de tranchées parallèles ou de réseaux de tranchées, est une réponse particulièrement bien adaptée à ces problématiques d'amélioration des sols. Une manière élégante de construire ces inclusions sans perturber les structures existantes consiste à traiter le sol en place en y incorporant un liant hydraulique, par application des techniques de soil mixing les plus récentes. Après une présentation de ces méthodes, la communication proposée met en évidence le rôle fondamental joué par l'inertie des inclusions, par des considérations fonctionnelles et par divers exemples d'application.

ABSTRACT: Conventional soil reinforcement techniques as rigid inclusions mainly report vertical loadings to the substratum layer with an induced settlement. They can also improve soil resistance regarding lateral forces as those related to earthquakes (liquefaction hazard), or slope stability for embankments on soft soil foundation. They can reduce active pressure on retaining walls. The appropriate design answer to those issues is to create strong inertia inclusions based on a trench geometry with either a parallel or a crossed frame arrangement. Last but not least, an even better technique to build those inclusions with a reduced environment impact consists in treating in situ soil by adding cement. This article presents different soil mixing projects and explains how strong inertia trenches are relevant.

MOTS-CLÉS: amélioration de sols, sol-mixing, sol-ciment, inclusions rigides, inertie, liquéfaction, soutènement, poussée des terres, tassement, tranchées de sol-mixing.

KEYWORDS : soil reinforcement, soil mixing, rigid inclusions, slope stability, retaining wall, liquefaction, seismic, active pressure, Bouassida approach, settlement, soil mixing caissons, soil mixing trench, crosswalls.

1 INTRODUCTION

Le soil mixing profond est une technique développée dans les années 1970 en Europe du Nord et au Japon, initialement pour résoudre des problématiques liées au comportement des sols compressibles. Cette technique consiste à améliorer les caractéristiques d'un sol en le mélangeant en place avec un liant hydraulique.

La déstructuration des terrains et l'incorporation du liant s'effectue par des moyens mécaniques, en utilisant un outil dont la géométrie et le mouvement dans le terrain définissent les dimensions des éléments de sol traité.

La mise en œuvre de cette technique a longtemps fait appel à l'utilisation d'outillages simples ou multiples, rotatifs à axe vertical, munis de pales latérales de géométries très variées. Des outils de type tarière simple ou tarières multiples avec inversion des sens de rotation entre forage descendant et malaxage / compactage en remontant sont aussi utilisés. Des colonnes réalisées par jet-grouting peuvent aussi être apparentées au sol-mixing.

Plus récemment, durant la dernière décennie, de nouveaux procédés de soil mixing avec des outils à axe horizontal ont fait leur apparition : haveuses et trancheuses. Ces procédés ont permis de repousser les limites du soil mixing en élargissant la méthode au traitement d'une plus large gamme de sols et présentant des atouts en termes de caractéristiques et d'homogénéité.

Le soil mixing se distingue depuis l'origine des autres procédés d'améliorations des sols en ce sens qu'il permet de réaliser, à l'extrême, des réseaux d'inclusions isolées (pour l'exécution desquelles des outillages de type tarière peuvent être suffisants) ou des traitements dans la masse (utilisation d'outillages de type multitarière ou haveuse pour réaliser des "pavés" de sol traité), mais c'est dans la réalisation d'éléments linéaires de grande inertie, de type refend ou écran continu (susceptible à la fois de jouer un rôle porteur et d'assurer une fonction soutènement moyennant l'incorporation d'armatures métalliques), voire de réseaux orthogonaux, permettant de confiner le sol en place, que le soil mixing trouve sa véritable originalité et ses développements les plus prometteurs.

Généralement apparenté aux réseaux d'inclusions plutôt qu'aux traitements dans la masse, il s'en distingue pourtant de façon fondamentale, non seulement par les aspects géométriques précédemment évoqués, mais encore par ses propriétés mécaniques. Cela ne permet de le classer ni dans la catégorie des inclusions souples (colonnes ballastées, dont la résistance en compression est nulle en l'absence d'étreinte latérale de la part du sol avoisinant), ni dans la catégorie des inclusions rigides, dont la résistance en compression, qu'il s'agisse de métal, de béton ou de mortier, est au contraire indépendante de l'étreinte exercée par le sol et pour lesquelles la résistance en compression simple est par conséquent le paramètre déterminant pour le dimensionnement.

Au contraire, les propriétés du soil mixing sont bel et bien celles d'un sol amélioré, même s'il ne s'agit généralement pas d'un

traitement uniforme de l'ensemble du massif de fondation, dont le critère de rupture n'est autre que le critère de Coulomb, qui lui permet de bénéficier à la fois :

- .d'une résistance intrinsèque indépendante de l'étreinte (terme de cohésion) ;
- .d'une augmentation de résistance avec la profondeur en fonction de l'étreinte latérale du sol (terme de frottement).

En termes de déformations, ses propriétés sont également intermédiaires entre celles généralement attribuées aux inclusions rigides et souples ce qui conduit naturellement à le ranger dans la catégorie inédite des "inclusions semi-rigides".

Le tableau qui suit résume les ordres de grandeurs usuels de la résistance à la compression F_c et du module de déformation E_y .

Renforcement	Inclusion rigide	Inclusion semi-rigide	Inclusion souple
F_c (MPa)	5 à 500	0.5 à 5	0
E_y (GPa)	3 à 200	0.2 à 3	0.04 à 0.08

1.1 Mélange par haveuse

Le procédé met en œuvre un outillage appelé « Cutter Soil Mixing » (CSM), dérivé de la technologie utilisées sur des machines de type haveuse ou hydrofraise. Deux tambours spécialement conçus pour cette application et entraînés en rotation par des moteurs hydrauliques de fort couple, sont utilisés pour déstructurer et mélanger le sol en place. Une buse d'injection située entre ces moteurs permet l'incorporation d'un fluide. Le mélange ainsi réalisé est ensuite déplacé soit au dessus des tambours dans le sens descente ; soit au dessous dans le sens remontée.

Les inclusions construites avec cet outillage jusqu'à des profondeurs de quelques dizaines de mètres, sont de section rectangulaire (longueur courante 2,80 m ; épaisseurs 500 à 1000 mm). Elles peuvent être utilisées unitairement (on parle alors de barrettes) ou disposées de manière contiguës afin de constituer des parois continues (Figure 1).

Certains outillages plus perfectionnés sont munis d'un dispositif de mesure inclinométrique, permettant de mesurer et de corriger en temps réel la position de l'outil lors de la construction d'une inclusion.

Le fluide injecté peut être de différents types : il peut s'agir d'un fluide facilitant le forage, remplacé en phase remontée par un mélange eau-ciment (appelé aussi coulis de ciment). Il est également possible d'injecter directement un coulis pendant le forage, la phase de remontée étant alors utilisée pour parfaire le mélange.

Le type et la quantité de liant utilisée permettent d'atteindre une large gamme de caractéristiques (résistance, perméabilité, cohésion, module de déformation), en fonction de la nature des sols en place.

Pour les outillages les plus perfectionnés, les volumes injectés ainsi que les énergies de malaxage sont contrôlés et ajustés en temps réel grâce à un système informatique embarqué dans la cabine de la machine. Tous les paramètres opératoires sont enregistrés afin d'être restitués sous forme de rapports.

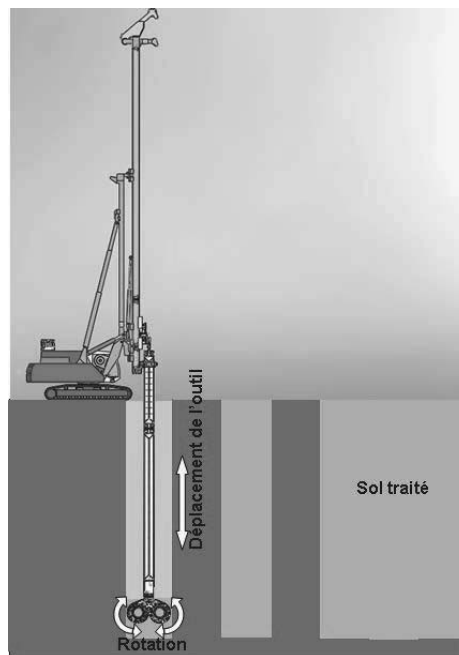


Figure 1 : Principe de construction de parois avec le procédé CSM.

Enfin, divers types d'armatures peuvent être mis en place dans le matériau encore frais, permettant ainsi de réaliser des ouvrages de soutènement provisoire ou à caractère permanent.

1.2 Mélange par trancheuse

Les machines de type trancheuse mettent en œuvre une chaîne avec outils de coupe et de malaxage. La chaîne est guidée par une lame travaillant dans un plan vertical dans le sol. L'ensemble de l'outillage présente une certaine similitude visuelle avec une tronçonneuse. L'action de cette lame, combinée à l'incorporation d'un fluide, permet de construire des tranchées de sol traité en place (Figure 2).

Suivant les cas, le liant hydraulique peut être injecté sous la forme d'un coulis ou incorporé au mélange sous forme pulvérulente, auquel cas une adjonction d'eau est généralement réalisée afin de faciliter l'action des outils.

Les tranchées construites de cette manière sont continues, et toutes les couches de sol sont uniformément mélangées. L'épaisseur de l'inclusion est de l'ordre de 0.3 à 0.5 m pour une profondeur maximale d'environ 10 mètres.

De manière analogue au procédé par havage, le procédé par trancheuse s'accompagne d'un dispositif de contrôle-qualité embarqué, permettant le pilotage de la machine, le respect des paramètres de traitement ainsi que les enregistrements nécessaires pour l'émission de rapports.

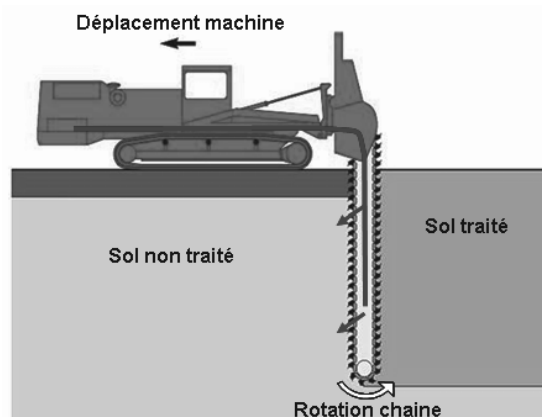


Figure 2. Principe de construction d'une tranchée.

2 DOMAINES D'APPLICATION

Les tranchées de sol traité en place peuvent être parallèles à une seule direction ou constituer une trame selon deux directions en général perpendiculaires. Le premier cas correspond à une problématique avec une direction privilégiée de sollicitation, le second avec deux directions de sollicitation d'égales probabilités.

Différents domaines d'application selon le type de renforcement recherché méritent d'être distingués.

.Domaine 1 : Reprise de charges surfaciques, permettant un traitement plus réparti qu'avec des inclusions rigides (ce qui permet de limiter fortement l'effet de "point dur" qui conditionne sinon le ferrailage du dallage ou du radier sus-jacent et l'épaisseur du matelas de répartition).

A noter que le caractère "2D" du procédé permet en outre de procéder à des calculs plus rigoureux que les approches traditionnelles, utilisant par exemple les coefficients de capacité portante de Bouassida (Bouassida, 2002) (qui permettent de traiter le cas d'une semelle de fondation sur sol renforcé par une tranchée), ainsi que des modèles de calcul numérique en déformation plane pour le calcul du tassement (ce qui ne serait pas acceptable pour un réseau d'inclusions isolées).

Un exemple d'application récent est donné par le chantier de Saint-Roch (06), consistant à renforcer le sol sous un remblai SNCF par un réseau de tranchées longitudinales.

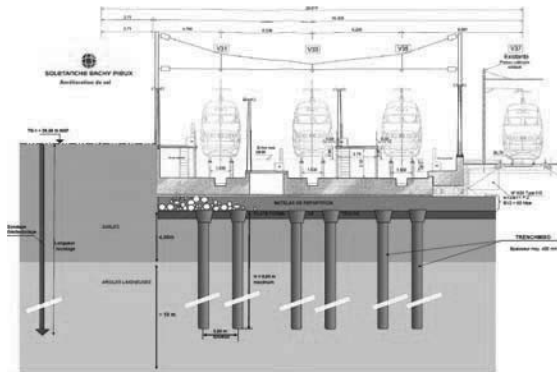


Figure 3. Coupe type SNCF St Roch (06).

.Domaine 2 : Renforcement du sol dans les zones où le champ de contraintes est à dominante déviatorique.

La justification des réseaux d'inclusions repose en général sur des justifications de portance effectuées en partie courante de la surface chargée, là où le risque de rupture du massif de sol est insignifiant dans la mesure où le champ de contraintes est généralement de type plutôt oedométrique. Le plus souvent, aucune justification particulière n'est demandée dans les zones soumises à de fortes contraintes déviatoires mobilisant de façon significative la résistance au cisaillement du sol (périphérie des zones de stockage par exemple), et corrélativement susceptibles de mobiliser les inclusions en flexion.

Un exemple de ce type est donné par les zones latérales des remblais de forte hauteur reposant sur des sols compressibles. Alors, une combinaison judicieuse d'inclusions isolées en partie centrale et de refends sous la partie latérale a pu être préconisée et mise en œuvre par différents auteurs (réf. Filz G. & Al, Kitazume M.).

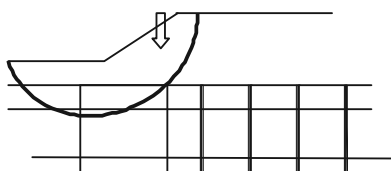


Figure 4. Diagramme de grand glissement.

.Domaine 3 : Réduction des poussées exercées sur les écrans de soutènement.

Les inclusions isolées agissent par limitation du tassement derrière le soutènement et allègement des contraintes verticales dans le massif de sol par transfert partiel sur les inclusions, tandis que les inclusions de forte inertie ajoutent à cet effet celui d'une diminution "directe" des contraintes de poussée par mobilisation du frottement sur les refends autostables.

Un exemple d'application significatif est celui du rempiètement du quai poste 7 du Transmanche (Calais), pour lequel le premier mode de comportement s'avérait inefficace en raison d'un contraste de rigidités verticales insuffisant entre le sol en place et les inclusions, et où seul l'effet inertiel permettait donc de réduire la poussée de façon significative (cf chapitre 3.1).

.Domaine 4 : Traitement anti-liquéfaction des sols sous sollicitation sismiques.

Il a été montré (réf. Seed) que certaines méthodes de justification des réseaux d'inclusions disjointes reposaient à tort sur un effet de transfert sur ces dernières des contraintes de cisaillement induites par le séisme.

Ces méthodes reliaient en effet l'efficacité des inclusions à leur module de cisaillement, en ignorant le fait que leur élancement induit en général un mode de déformation en flexion largement prépondérant par rapport au mode de déformation par cisaillement, à l'instar des poutres sur appuis élastiques de la résistance des matériaux.

C'est donc bien l'inertie et non la rigidité qui constitue le facteur clé dans l'efficacité de ce type de traitement, ce qui conduit là encore à privilégier les réseaux d'inclusions de forte inertie. Le traitement de type "quadrillage" est souvent qualifié à tort de "confinement", alors que c'est bien l'effet "inertiel" qui est recherché, le double réseau d'écrans orthogonaux permettant avant tout de réaliser un traitement isotrope dont l'efficacité est ainsi rendue indépendante de la direction des ondes sismiques.

Un exemple particulièrement représentatif est donné par le chantier de l'extension de la préfecture de Fort-de-France, pour lequel s'ajoutait, à la problématique du traitement de terrains fortement liquéfiables sur une grande hauteur, celle de l'écoulement post-liquéfaction induit par le pendage significatif du substratum, ce qui rendait nécessaire la mise en œuvre d'un réseau autostable (cf chapitre 3.2).

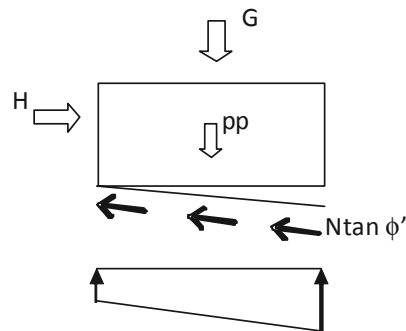


Figure 5. Stabilité. Principaux efforts dans le plan d'un refend.

3 EXEMPLES D'APPLICATION

3.1 Renforcement de sol derrière un soutènement

La mise en place de tranchées de soil-mixing de grande inertie à l'arrière d'un écran de soutènement permet la réduction des poussées du terrain sur l'écran lui-même.

Une optimisation de la reprise des efforts de poussée conduit à installer des éléments d'inertie maximale (concentration des efforts pour des déplacements limités). Des éléments isolés sont bien moins efficaces en terme d'inertie globale.

C'est ce principe qui a été proposé et retenu pour les travaux de reconstruction du poste transmanche n°7 à Calais.

La mise en place de refends de Geomix (Méthode par havage spécifique à l'entreprise) perpendiculairement à l'axe du quai (figure 6) a permis de réduire la section des palplanches à mettre en œuvre dans le cadre des travaux d'approfondissement du quai.

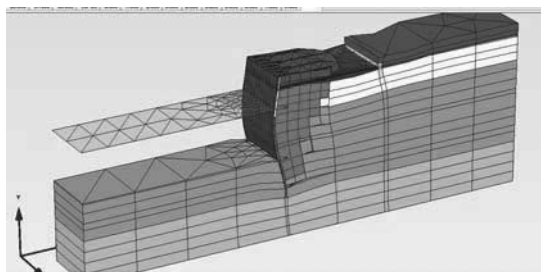


Figure 6. Vue 3D du renforcement derrière le rideau du quai existant.

Le massif de sol traité reprend la poussée des terres et les palplanches à l'avant ne reprennent plus que la poussée d'eau. La stabilité du massif renforcé par les éperons de soil mixing est vérifiée vis-à-vis du non-basculement, du non-glisement, et de la non extrusion entre tranchées.

L'autre partie des vérifications a consisté à établir la cohésion homogénéisée du massif de sol, variable de 45 à 85 kPa pour ce projet.

La solution de base en barrettes isolées apportait une cohésion homogénéisée moyenne de l'ordre de 24 kPa, attestant la bien moindre performance des renforcements disjoints par rapport à la disposition en refends de grande inertie.

3.2 Traitement anti-liquéfaction

Les dégâts engendrés par le dernier séisme significatif de novembre 2007 en Martinique ont nécessité la reconstruction de la préfecture de Fort de France (bâtiments type R+4).

Le contexte géotechnique du site montre un fort potentiel de liquéfaction des alluvions à dominante sablo-limoneuse de faible caractéristique ($PI^* \sim 0,3$ MPa, $Em \sim 2,2$ MPa), sur une épaisseur variable de 9 à 18 m correspondant à la pente du substratum.

En réponse à l'appel d'offres, l'entreprise a proposé une solution variante pour répondre à la fois aux problématiques de liquéfaction et d'écoulement post-liquéfaction des sols sur la pente du substratum.

Un nouveau type de fondations basé sur un quadrillage en sol mixing sous l'emprise totale des bâtiments (environ 36 m x 40 m) a été conçu (figure 7).

Les tranchées Geomix, d'épaisseur 0,50 m, sont espacées d'environ 4.5 m entre axes. Par leur forte inertie (par comparaison aux inclusions rigides) et à leur géométrie, les déformations des panneaux sont limitées pendant l'épisode sismique. Le cisaillement additionnel du sol et les efforts horizontaux provenant de la structure se concentrent sur les bandes Geomix. Le traitement de confinement permet ainsi de limiter le cisaillement et le développement de pressions interstitielles dans le sol confiné non traité. Le risque de liquéfaction est évité.

Les caissons anti-liquéfaction servent également en phase service de fondation aux bâtiments par l'intermédiaire d'une dalle de transfert. Ils ont donc aussi le rôle de réduction des tassements sous la structure en situation statique.

Le phénomène d'écoulement post-liquéfaction a provoqué de nombreux dégâts lors du séisme de Kobé au Japon en 1995. Sur le site de la préfecture de Fort-de-France, ce risque est accru par une pente importante du substratum (dénivelé de 9 m sur une

longueur de seulement 40 m). Les inclusions isolées de faible inertie ne peuvent résister à ce phénomène.

Cette première technique, mise en œuvre entre octobre 2010 et janvier 2011 représente un vrai pas en avant dans l'approche des fondations pour les Départements d'Outre Mer.

Plus largement, il s'agit d'une solution technique innovante, reposant sur un procédé propre à Solétanche Bachy et qui répond efficacement aux problématiques des clients en sites sismiques.

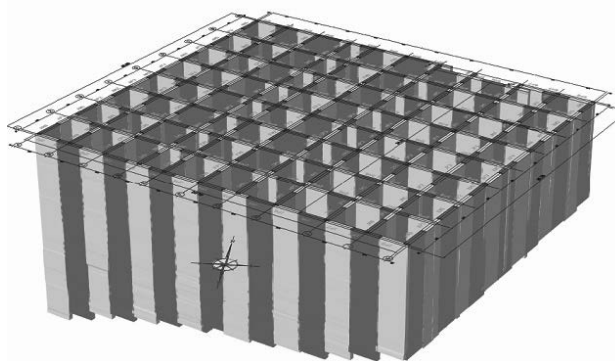


Figure 7. Vue en 3D des fondations en caisson.

4 CONCLUSION

Les quelques exemples présentés dans l'article, représentatifs de différents domaines d'application, ont permis de mettre en évidence la nécessité de privilégier non pas tant la rigidité que l'inertie des réseaux d'inclusions : la mise en œuvre de refends, de parois continues ou de caissons "semi-rigides", réalisés au moyen de techniques récemment développées pour étendre le domaine d'application du procédé "soil mixing", permet ainsi dans bien des cas d'apporter à des problèmes complexes une réponse particulièrement pertinente.

5 REFERENCES

- The deep mixing method. *Coastal Development Institute Tokyo, June 2002.*
- Lebon S.P.. New Methods in European Deep mixing – A contractor's perspective on the developing challenges of execution. *Deep Mixing 2005, Stockholm.*
- Benhamou L. and Mathieu F.. Geomix Caissons against liquefaction. *ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels, 2012.*
- Bouassida Mounir et Belgacem Jellali. Capacité portante ultime d'un sol renforcé par une tranchée. *Revue française de génie civil volume 6. No 7 – 8/2002.*
- Corneille S. and Ré A.. Trenchmix : une technique d'amélioration de sols qui contribut au développement durable. *Revue Travaux n°854, Juillet 2008.*
- Filz G and al.. Design of Deep Mixing for support of levees and floodwalls. *4th International Conference of Grouting and Deep Mixing, New Orleans, 2012.*
- Kitazume M. Application of physical modelling for investigating ground failure pattern. *Physical Modelling in Geotechnics 6th ICPMG 2006. London ISBN 0-415-41586-1.*
- Gueguin M and al. A homogenization approach for evaluating the longitudinal shear stiffness of reinforced soils: column vs. cross trench configuration. *International Journal of Solids and Structures, November 8th 2011.*
- R B Seed & Al. Recent advances in soil liquefaction engineering : A unified and consistent framework. *26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring seminar. Queen Mary presentation 2003.*
- Shinkawa N. and Bessho N. Application examples of Deep Mixing Method as Aseismic Measures. *International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, Okinawa 2009.*