

Partie I

Présentation du problème

Chapitre 1

Le renforcement des sols par inclusions rigides verticales

SOMMAIRE

1	LE RENFORCEMENT DES SOLS COMPRESSIBLES.....	29
2	PRESENTATION DE LA METHODE.....	30
2.1	PRINCIPE DU RENFORCEMENT	30
2.2	LES INCLUSIONS RIGIDES	32
2.3	LE MATELAS DE TRANSFERT DE CHARGE	34
2.4	LES NAPPES DE RENFORCEMENT	35
3	DOMAINES D'APPLICATION	36
4	CONTEXTE DE LA THESE ET OBJECTIFS	37

1 LE RENFORCEMENT DES SOLS COMPRESSIBLES

Les sols compressibles de mauvaise qualité ont toujours existé, mais la raréfaction des sols de bonne qualité pour développer les réseaux routiers, autoroutiers et ferroviaires ainsi que les zones industrielles entraîne la nécessité de mettre en œuvre des techniques de renforcement des sols compressibles (Dhouib *et al.*, 2004).

Il existe différentes méthodes de renforcement des sols compressibles, plus ou moins anciennes et plus ou moins développées. Magnan (1994) présente un bilan des méthodes permettant de réduire les tassements des remblais édifiés sur sols compressibles. Les diverses méthodes ainsi que les principales conclusions sont reportées dans le Tableau 1. Gue et Tan (2001) exposent les solutions géotechniques pour l'édification de remblais ferroviaires sur sols compressibles.

Parmi toutes ces méthodes, on observe depuis quelques années en France le développement du renforcement des sols par des inclusions rigides verticales, qui peut concerner des domaines d'application un peu différents des méthodes « traditionnelles ». Le principal avantage de cette méthode est sa mise en place rapide, en plus d'une importante réduction des tassements. Cette technique permet de conserver le sol compressible en place, ce qui constitue un avantage économique et environnemental non négligeable.

Il existe une grande diversité d'approches de dimensionnement pour l'application de cette technique, mais il subsiste un manque évident sur la compréhension du fonctionnement de l'ouvrage. Dans un contexte de développement rapide de cette méthode, il est apparu important de mener des travaux de recherche sur ce type d'ouvrage de renforcement.

Technique	Données nécessaires	Contrainte	Fiabilité	Commentaires
Préchargement	Compressibilité Perméabilité	Temps nécessaire	Peu fiable pour obtenir de faibles déplacements	Lent Peu cher
Préchargement avec drains verticaux	Compressibilité Perméabilités verticales et horizontales	Plus rapide	Plus flexible	Rapide Relativement cher
Remplacement du sol	Epaisseur de la couche	Mise en dépôt du sol Nouveau matériau	Bonne en cas de remplacement total	Rapide Cher
Colonnes ballastées, colonnes de sable compacté	Résistance et déformabilité du sol	Equipements Plot expérimental	Bonne après analyse de plots expérimentaux	Cher Rapide
Dalle sur pieux	Résistance du sol		Bonne	Très cher
Electro-osmose et injection	Propriétés chimico-physiques Compressibilité Perméabilité	Destruction des électrodes Alimentation électrique	Incertaine	Très cher
Remblai léger	Compressibilité Perméabilité	Protection du matériau léger	Peu fiable pour obtenir de faibles déplacements	Cher
Remblai sur inclusions rigides	Résistance et déformabilité du sol		Bonne	Cher Rapide
Colonnes de jet grouting	Résistance et déformabilité du sol		Bonne	Cher Rapide

Tableau 1 – Les principales méthodes de renforcement de sol de fondation pour l’édification des remblais d’après Magnan (1994)

2 PRESENTATION DE LA METHODE

2.1 Principe du renforcement

Le principe du renforcement est illustré par la Figure 1. La charge appliquée en surface est transmise à un substratum rigide par l’intermédiaire de la combinaison d’un réseau d’inclusions rigides et d’un matelas de transfert de charge.

- Les inclusions rigides sont mises en place à travers l’horizon compressible et permettent de transférer les charges vers le substratum par le développement d’un effort de pointe et de frottements le long de l’inclusion. Des dalles peuvent être mises en place au niveau des têtes d’inclusion afin d’augmenter la surface de reprise des charges.

- Le matelas de transfert de charge est disposé entre le sol compressible renforcé par les inclusions et l'ouvrage en surface. Sa fonction est de réduire et d'homogénéiser les tassements sous l'ouvrage en assurant le transfert des charges vers les têtes d'inclusion. Le matelas de transfert de charge est constitué de sol granulaire. Le tassement différentiel en base du matelas entre les inclusions rigides et le sol compressible induit du cisaillement dans le sol granulaire et donc la formation de voûtes qui assurent le transfert des charges vers les têtes d'inclusion, l'homogénéisation et la réduction des tassements en surface. La présence de ce matelas différencie cette technique de celle des pieux, car les inclusions sont désolidarisées de l'ouvrage en surface.
- Afin d'augmenter le report des charges vers les inclusions, une nappe de renforcement géosynthétique peut être disposée en base du matelas. Le tassement différentiel entre les têtes d'inclusion et le sol compressible induit la mise en tension de la nappe qui contribue au report de charge par effet membrane.

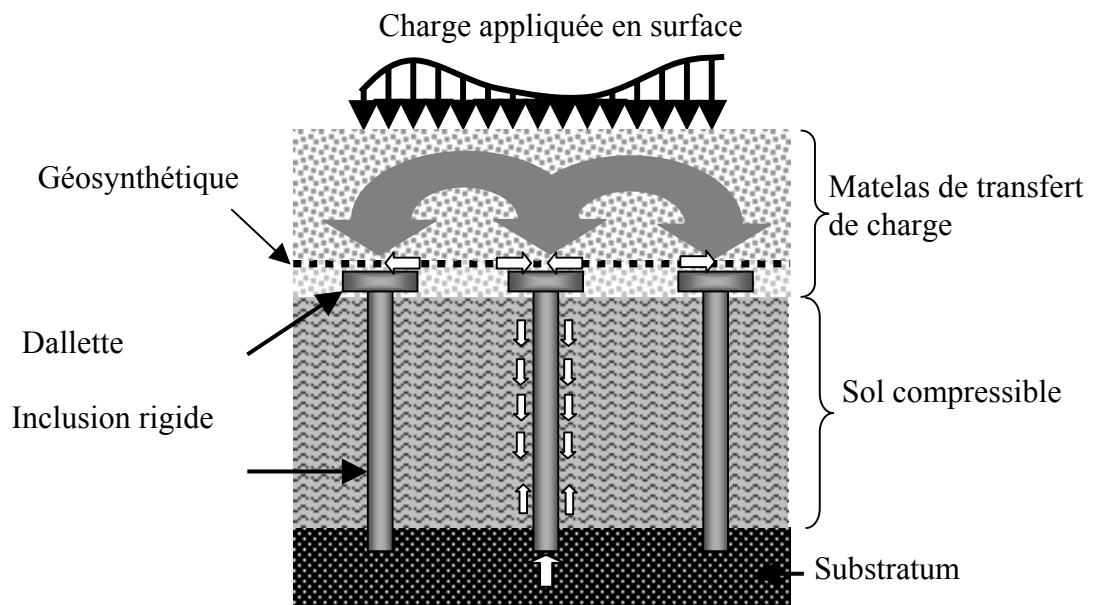


Figure 1 - Principe de la méthode

Le frottement le long des inclusions participe également aux mécanismes de transfert de charge. La Figure 2 présente le comportement d'un réseau d'inclusions soumis à un chargement. Au niveau de la partie supérieure des inclusions, le sol compressible tasse plus que les inclusions et entraîne du frottement négatif le long de l'inclusion, ce qui contribue au report de la charge sur les inclusions. Ainsi le sol de fondation participe aux mécanismes. Au niveau de la partie inférieure, les inclusions poinçonnent le substratum qui n'est jamais parfaitement rigide, ce qui entraîne du frottement positif. Au niveau de la base de l'inclusion se développe un effort de pointe.

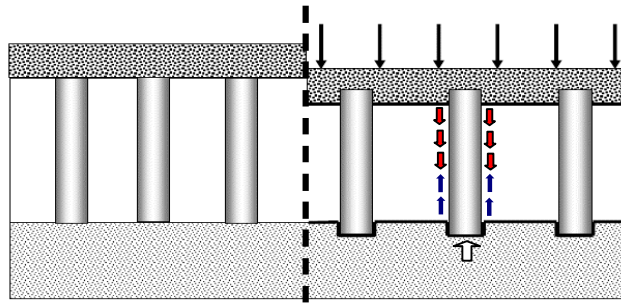


Figure 2 – Réseau d'inclusions soumis à un chargement d'après Berthelot *et al.* (2003)

La Figure 3 illustre le chargement d'une inclusion soumise à du frottement négatif et du frottement positif, comme cela est proposé par la méthode de dimensionnement de Combarieu (1988), complétée et développée par Simon (2001) et Berthelot *et al.* (2003).

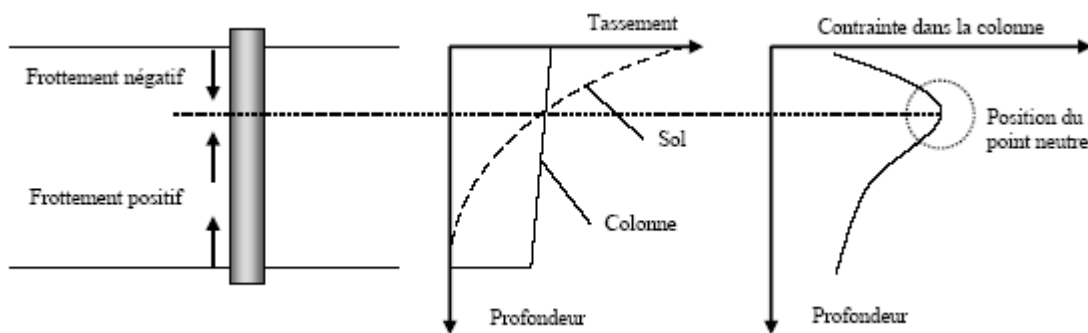


Figure 3 – Frottement le long des inclusions d'après Berthelot *et al.* (2003)

Les mécanismes qui se développent dans le matelas de transfert de charge et le long des inclusions sont en forte interaction. Les tassements au niveau de l'interface entre le sol compressible et le matelas conditionnent simultanément la formation des voûtes dans le sol granulaire, la mise en tension du géosynthétique éventuel et le frottement le long des inclusions.

2.2 Les inclusions rigides

De nombreux types d'inclusions rigides peuvent être envisagés suivant les propriétés mécaniques et la géométrie de la couche compressible. Les inclusions peuvent être préfabriquées ou construites *in situ*. Leur module de déformation varie entre 20 MPa (colonne de soil mixing) et 200 GPa (pieu métallique).

- Parmi les inclusions préfabriquées se retrouvent tous les types de pieux mis en place par battage ou fonçage (pieux bois, pieux métalliques, pieux en béton armé ou précontraint). L'avantage des pieux préfabriqués est qu'ils sont constitués d'un matériau manufacturé. Par contre leur mise en place peut être source de nuisances sonores ou vibratoires et dans certains cas le refoulement latéral du sol peut affecter les structures voisines.
- Parmi les inclusions construites *in situ* on distingue essentiellement les pieux forés, les pieux battus tubés (pieux en béton armé), les pieux de type « Vibro Concrete Column » (VCC), les colonnes à module contrôlé (CMC, Liausu et Pezot, 2001), les colonnes par mélange d'un liant avec le sol (jet grouting, Lime Cement Columns, etc.). Les techniques

de réalisation de ces inclusions sont décrites par Briançon (2002) et Kempfert (2003). La mise en œuvre des inclusions *in situ* est plus souple que les inclusions préfabriquées, avec peu de refoulement du sol adjacent et une longueur qui peut s'adapter aux horizons géologiques du site.

Les inclusions sont généralement réalisées jusqu'à un substratum plus rigide sur lequel elles reposent ou sont ancrées. Le réseau d'inclusions et le diamètre des inclusions sont dimensionnés en tenant compte d'un coefficient de sécurité. Nous pouvons énoncer deux approches de dimensionnement des inclusions :

1. Les inclusions sont supposées reprendre la totalité des charges appliquées par le matelas, le remblai et l'ouvrage en surface, plus particulièrement dans le cas de la mise en place d'une nappe de renforcement géosynthétique en base du remblai qui transfère aux inclusions toutes les charges qui n'ont pas été transférées par effet de voûte. Dans ce cas la contribution du sol de fondation est négligée (Collin *et al.*, 2005).
2. Le système peut être optimisé en tenant compte du support partiel apporté par le sol de fondation, même en présence d'un géosynthétique (Habib *et al.*, 2002 ; Russel et Pierpoint, 1997 ; Rogbeck *et al.*, 1998). Cependant les tassements de consolidation du sol compressible doivent être pris en compte.

Les dalles coiffant les inclusions peuvent être de section carrée ou circulaire. La Figure 4 présente le cas d'un chantier où les inclusions ont des têtes en béton de section carrée.



Figure 4 – Chantier de remblai ferroviaire, visualisation des têtes d'inclusion avant l'édification du remblai, d'après Zanziger et Gartung (2002)

Les inclusions sont mises en place suivant un maillage rectangulaire (Figure 5a) ou triangulaire (Figure 5b). En appelant A_p la section d'une tête d'inclusion et A_s la surface d'une maille élémentaire, le taux de recouvrement α est la proportion de la surface totale couverte par les inclusions et est défini par :

$$\alpha = \frac{A_p}{A_s} \qquad \text{Équation 1}$$

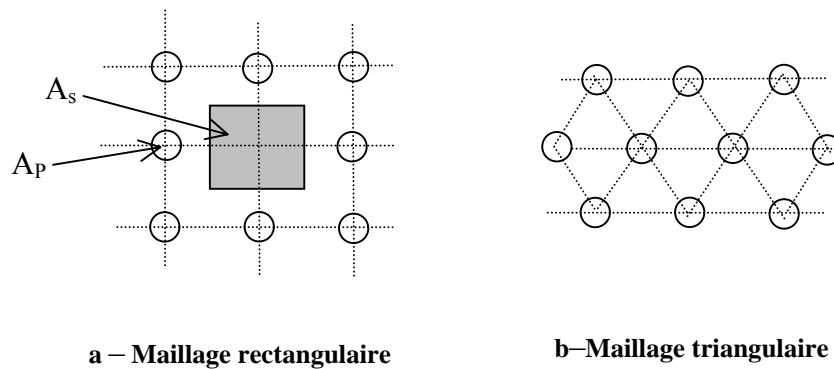


Figure 5 – Réseau d'inclusions

2.3 Le matelas de transfert de charge

Le matelas de transfert de charge assure la transition entre les charges appliquées en surface et les inclusions rigides. Il permet de concentrer les charges sur les inclusions, de réduire et homogénéiser les tassements en surface grâce à la formation de voûtes. Ainsi sa présence permet de diminuer les sollicitations sur l'ouvrage afin d'en assurer le bon fonctionnement et la pérennité.

Ce phénomène de voûte rencontré dans les sols granulaires a notamment été décrit par Terzaghi (1943) et peut également être connu sous la dénomination d'effet silo. Diverses méthodes de détermination de la charge transmise aux inclusions par effet voûte existent et sont présentées dans le chapitre 4. Le bilan des méthodes de dimensionnement effectué par Briançon *et al.* (2004) montre une grande diversité et la confrontation des méthodes met en évidence des écarts considérables.

Le développement des voûtes suppose que le matelas ait une résistance au cisaillement et une hauteur suffisante (Rathmayer, 1975). Les tassements sont susceptibles d'être également dépendants du module de déformation du sol ainsi que de sa dilatance.

Le matelas de transfert de charge est généralement constitué par un matériau noble comme des graves ou du ballast, par des matériaux traités à la chaux ou au ciment, afin d'en augmenter les propriétés mécaniques (Dano *et al.*, 2004) ou encore par un matériau grossier. Cette dernière option est certainement la moins onéreuse alors que l'utilisation d'un matériau noble peut s'avérer coûteuse. Cependant il n'existe aucune étude concernant le développement des mécanismes de report de charge en fonction de la nature du sol constituant le matelas (Briançon *et al.*, 2004). La bibliographie concernant les ouvrages renforcés par des inclusions rigides ne fournit quasiment pas d'informations ou de données caractérisant le matelas de transfert de charge. Glandy et Frossard (2002) précisent cependant que le matelas doit être mis en œuvre suivant les critères routiers.

La caractérisation du comportement mécanique des sols pouvant constituer le matelas a cependant fait l'objet de plusieurs études, dans le cadre de leur utilisation dans d'autres domaines.

- La caractérisation des graves et ballasts a fait l'objet de quelques expérimentations dans le cadre de son utilisation pour les voies ferrées et les chaussées souples notamment. Indraratna *et al.* (1998), par des essais sur des ballasts à l'appareil triaxial de diamètre 300 mm, montrent que les déformations et le comportement au cisaillement sont très différents selon la valeur de la contrainte de confinement.

- Le LCPC a entrepris une étude de caractérisation des graves non traitées (GNT) à l'appareil triaxial à chargements répétés, dans le cadre de l'utilisation pour la construction de chaussées. Paute *et al.* (1994) mettent en évidence un comportement mécanique complexe et notamment une élasticité non linéaire, dépendant des contraintes appliquées, et des déformations permanentes évoluant avec le nombre de cycles appliqués. Les résultats obtenus sur une grande variété de matériaux montrent l'influence sur les performances mécaniques des GNT de la minéralogie des granulats, de la teneur en eau, et à un à degré moindre, de la compacité. Bouassida (1988) présente des résultats obtenus à l'appareil triaxial sur une grave non traitée, utilisée en construction routière. Lors du cisaillement, le matériau est contractant puis dilatant. La cohésion de ce matériau est non négligeable ($c' = 30$ kPa) et l'angle de frottement est élevé ($\varphi' = 54^\circ$).
- Les sols grossiers posent un problème de caractérisation, plus complexe encore que pour les matériaux nobles, car chaque sol est propre au site et présente des caractéristiques différentes. La particularité des sols grossiers est de présenter des éléments de taille très variable, mais la définition d'un sol grossier varie selon les auteurs (Perrot, 1968 ; Lambe et Whitman, 1976 ; Craig et Susilo, 1986 ; Charles, 1989). Afin de pouvoir tester le matériau, les éléments de grande taille doivent être écrêtés et l'appareillage d'essai doit être de dimension suffisante. Des auteurs s'intéressent alors à la mise au point de procédures afin de pouvoir tester ce type de matériaux (Fragaszy, 1990 ; Donaghe et Torrey, 1994). Les résultats des essais de caractérisation dépendent de l'appareillage d'essai (taille de la boîte, type d'essai). De nombreux auteurs mettent en évidence l'augmentation de la résistance au cisaillement avec l'augmentation du diamètre maximal des grains (Gotteland *et al.*, 2000 ; Valle, 2001 ; Pedro *et al.*, 2004 ; Levacher *et al.*, 2004). Le paramètre ayant le plus d'influence sur le comportement semble être la densité initiale (Valle, 2001 ; Paul *et al.*, 1994). La synthèse bibliographique des résultats des essais effectués sur des sols grossiers montre que leur comportement est non linéaire, l'ordre de grandeur de l'angle de frottement est de 40° , mais il peut aussi être bien plus important : Kany et Becker (1967) déterminent un angle de frottement de $48,5^\circ$ pour un sol de remblai sans cohésion composé de gros morceaux de roche. La cohésion, quant à elle, se situe entre 0 et 60 kPa. Le comportement est généralement dilatant (Bourdeau, 1997).
- Les essais de caractérisation du comportement mécanique des sols traités montrent que la cimentation des échantillons permet d'augmenter la résistance au cisaillement, la rigidité et la dilatance du sol (Coop et Atkinson, 1993 ; Consoli *et al.*, 1998 ; Asghari *et al.*, 2003 ; Dano *et al.*, 2002).

2.4 Les nappes de renforcement

Le renforcement en base du matelas de transfert de charge par des nappes horizontales est peu courant en France mais assez répandu dans de nombreux autres pays (Briançon *et al.*, 2004). Les seules normes ou recommandations existantes dans le domaine préconisent son utilisation (BS8006, 1995 ; EGBEO, 2004). Lorsque qu'une seule nappe géosynthétique est disposée sur les têtes d'inclusion, elle contribue au renforcement par effet membrane. Lorsque plusieurs nappes sont mises en œuvre au sein du matelas granulaire, à l'effet membrane se rajoute un effet de rigidification du matelas (Guido *et al.*, 1987 ; Bell *et al.*, 1994 ; Collin, 2004). La Figure 6 présente les différentes dispositions de la nappe dans le matelas. Les nappes de renforcement sont généralement constituées soit de géotextiles, soit de géogrilles qui

permettent l'enchevêtrement du sol dans la nappe. Dans certains cas, le matelas est également renforcé par un treillis soudé (Combarieu *et al.*, 1994).

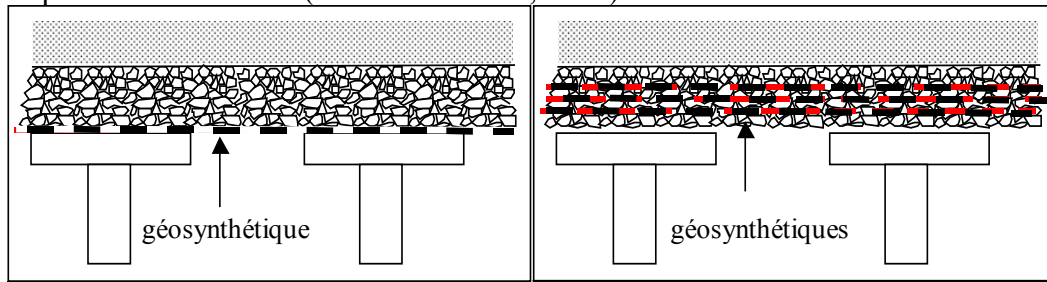


Figure 6 – Différentes dispositions du renforcement horizontal dans le matelas de transfert de charge, d'après Briançon *et al.* (2004)

3 DOMAINES D'APPLICATION

La technique du renforcement des sols compressibles par des inclusions rigides verticales a connu un grand essor depuis les années 70 mais son utilisation en France n'est courante que depuis une dizaine d'années.

La Figure 7 présente différents domaines d'application : les remblais routiers ou ferroviaires (a), les remblais d'accès à des ouvrages d'art (b), les fondations pour plates-formes industrielles (c), réservoirs de stockage ou stations d'épuration (d). Nous trouvons dans la littérature divers exemples d'application de cette technique en France et à l'étranger (Suède, Allemagne, Grande-Bretagne, Irlande, Pays-Bas, Portugal, Malaisie, USA). Des ouvrages de référence ont été répertoriés par Briançon (2002) qui fournit des précisions sur les caractéristiques du renforcement.

- Les remblais routiers ou autoroutiers peuvent être construits sur sols compressibles renforcés par inclusions rigides afin de contrôler les tassements en surface du remblai et de réduire la durée du chantier (Barry *et al.*, 1995 ; Card et Carter, 1995 ; Wood, 2003 ; Quigley *et al.*, 2003 ; Stewart *et al.*, 2004 ; Collin *et al.*, 2005).
- L'élargissement d'une route existante sur sol compressible peut entraîner du tassement différentiel entre la nouvelle et l'ancienne voie et donc des fissures au niveau de la chaussée. Le renforcement par inclusions rigides apporte une solution rapide à ce problème (Habib *et al.*, 2002 ; Lambrechts *et al.*, 2003 ; Wang et Huang, 2004).
- De nombreux remblais ferroviaires situés en Allemagne sont fondés sur sol renforcé par inclusions rigides (Alexiew et Vogel, 2002 ; Zanziger et Gartung, 2002 ; Brandl *et al.*, 1997). Cortlever et Gutter (2003) présentent un projet d'élargissement de remblai ferroviaire en Malaisie.
- Les remblais d'accès aux ouvrages d'art peuvent être édifiés sur sol compressible renforcé par inclusions rigides afin d'éviter les tassements différentiels entre la culée fondée sur pieux et la voie d'accès (Holtz et Massarsch, 1976 ; Holmberg, 1978 ; Reid et Buchanan, 1984 ; Combarieu *et al.*, 1994 ; Forsman *et al.*, 1999 ; Lin et Wong, 1999 ; Mankbadi *et al.*, 2004 ; Plomteux *et al.*, 2004). Combarieu et Frossard (2003) présentent un projet de remblai d'accès à un quai portuaire des berges de la Loire.
- Liausu et Pezot (2001) présentent le cas d'un dallage industriel de grande surface situé dans la Somme, édifié sur sol compressible renforcé par colonnes à module contrôlé. Pinto *et al.* (2005) présentent le cas d'un renforcement des berges du Tage pour la construction de bâtiments industriels légers.

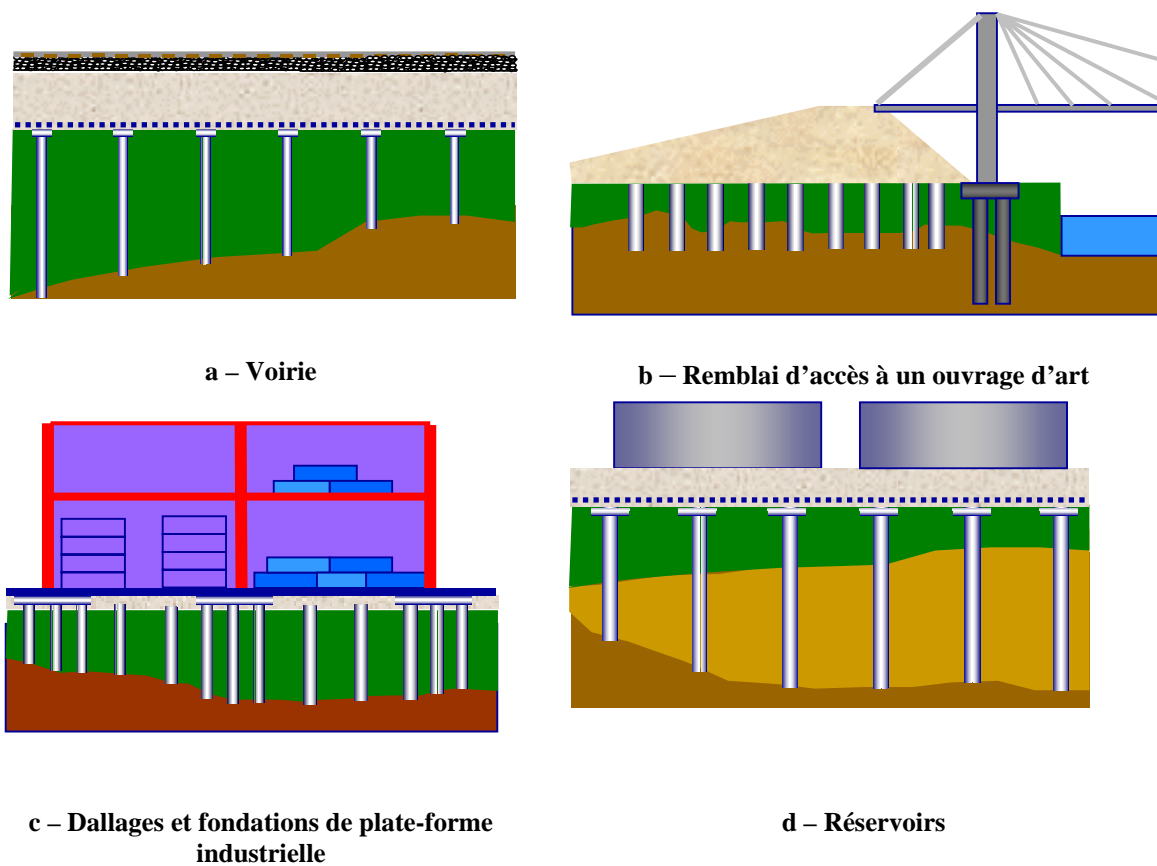


Figure 7 – Domaines d'application

4 CONTEXTE DE LA THESE ET OBJECTIFS

Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales met en œuvre des mécanismes identifiés mais complexes et en forte interaction. Des méthodes de dimensionnement existent, reposant sur divers concepts, mais elles peuvent aboutir à des résultats contradictoires. Cela confirme la nécessité de progresser dans la modélisation du comportement de ces ouvrages complexes.

Ce constat a conduit l'IREX, en liaison avec le Réseau Génie Civil et Urbain (ministères de la Recherche et de l'Équipement), à rassembler des entreprises, des bureaux d'études, des maîtres d'ouvrages et de centres de recherche au sein d'un Projet National qui a débuté en 2005. Ce projet, intitulé ASIRi pour « Amélioration des Sols compressibles par des Inclusions Rigides », vise à proposer des recommandations pour la conception, le dimensionnement et la réalisation du renforcement des massifs de fondation par inclusions rigides. Ce projet s'appuiera sur des expérimentations en vraie grandeur, des essais en laboratoire et en centrifugeuse, des modélisations numériques à divers niveaux de complexité, afin de développer des méthodologies de dimensionnement.

Ce travail de thèse entre dans le cadre du Projet National et s'inscrit dans les parties « Expérimentations en laboratoire » et « Modélisation numérique ». L'objectif de ce travail de recherche est plus particulièrement axé sur la compréhension et la modélisation des mécanismes qui se développent dans le matelas granulaire de transfert de charge.

