



## Objectifs

La technique d'amélioration des sols par inclusions rigides verticales associe plusieurs éléments pour constituer un système composite de fondation lorsque les terrains d'assise sont de faible portance :

- les inclusions rigides proprement dites implantées selon un réseau régulier généralement à maille carrée comprise entre 2 et 3 m. Lorsqu'elles sont réalisées en béton ou en mortier elles ont de manière courante un diamètre compris entre 30 et 50 cm. Leur tête est parfois élargie par une dalle.

- un matelas granulaire dont l'épaisseur varie entre 50 cm et 1 m dans lequel on place parfois une nappe de renforcement (treillis métallique ou géotextile).

Ce système de fondation permet de transférer les charges d'un ouvrage à un horizon porteur profond et peut s'appliquer à des ouvrages variés : fondations de remblai, dallages de locaux industriels et commerciaux, fondations de bassins d'épuration et réservoirs pétroliers, terre-pleins portuaires... ainsi qu'à des ouvrages exceptionnels comme la fondation des piles du pont de Rion-Antirion sur le détroit de Corinthe dans un environnement sismique particulièrement sévère.

# Projet National ASIRI

## Amélioration des Sols par Inclusions verticales Rigides

### ... suite Objectifs

Or, bien que cette technique soit utilisée depuis plus de 20 ans :

- certains aspects du comportement du système composite sont encore mal connus,
- les méthodes de dimensionnement varient largement selon les intervenants,
- les pratiques observées à l'étranger sont fort diverses,
- les reconnaissances des sols sont souvent peu adaptées à la conception et la mise en œuvre de cette technique.

C'est sur la base de ce constat que le Projet National ASIRI est né en 2003, à l'initiative du Pôle de Compétence Sols de l'IREX, avec comme objectifs principaux :

- améliorer la connaissance des mécanismes complexes d'interaction mis en jeu dans cette technique de renforcement,
- évaluer les méthodes de dimensionnement existantes à la lumière des acquis expérimentaux,
- mettre au point et qualifier des méthodes de dimensionnement à divers niveaux de complexité.

Les travaux du Projet National ASIRI ont pour finalité la rédaction de « Recommandations concernant la mise en œuvre et le dimensionnement des remblais et dallages sur sol renforcé par inclusions rigides ».

### Programme réalisé

*La méthodologie repose sur des études expérimentales in situ ou en laboratoire, sur modèles physiques ou en centrifugeuse, et sur le développement de modèles numériques visant à simuler le comportement des sols et des éléments de renforcement ainsi que leurs interactions.*

*Ces modèles, validés par les divers résultats expérimentaux, doivent ensuite permettre de conduire des études paramétriques en vue d'explorer des cas non couverts par l'expérimentation et de proposer des méthodes de dimensionnement pratiques.*

*Le Projet National ASIRI se développe en cinq thèmes.*

# 1

## Plots d'essais en vraie grandeur

Thème animé par Laurent BRIANÇON (Cnam)

Deux chantiers expérimentaux ont été réalisés :

- **Chantier expérimental de Saint-Ouen-l'Aumône (95).** Quatre plots instrumentés ont été réalisés sur un site compressible en bordure de l'Oise mis à disposition par le Port autonome de Paris :
  - un dallage non renforcé pour servir de référence,
  - deux dallages renforcés par inclusions rigides,
  - un plot renforcé par inclusions rigides mais sans dallage.

Les mesures de tassement et de contrainte ont mis en évidence une réduction significative du tassement pour les plots renforcés par inclusions rigides et ont permis d'améliorer la compréhension des mécanismes de transfert de charge sous dallage.

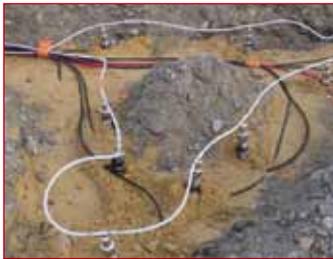
- **Chantier expérimental de Chelles (77)** Quatre plots instrumentés ont été réalisés sur un site compressible mis à disposition par le conseil général de Seine et Marne :

- un remblai non renforcé pour servir de référence,
- un remblai renforcé par inclusions rigides,
- deux remblais renforcés par inclusions rigides disposant en plus, à leur base, d'une plate-forme granulaire renforcée par des nappes géosynthétiques.

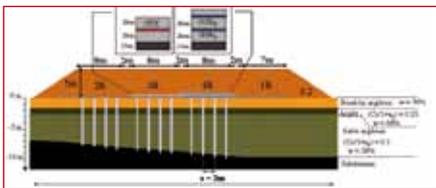
Les mesures de tassement, de contraintes, de déplacements latéraux et de déformations des nappes géosynthétiques ont mis en évidence une réduction significative du tassement dans les plots renforcés par inclusions rigides et un meilleur report de charge vers les inclusions dans le cas des plots disposant d'une plate-forme granulaire renforcée. Les mécanismes de transfert de charge développés à l'intérieur de la plate-forme granulaire ont pu être identifiés.



Chantier expérimental de Saint-Ouen l'Aumône. Pose d'un capteur de pression totale.



Chantier expérimental de Chelles. Pose des capteurs de tassement.



Expérimentation Chelles (2007).

# 2

## Expérimentation sur chantier réel

Thème animé par Élisabeth HAZA-ROZIER (CER Rouen)

Les chantiers expérimentaux sont complétés par des chantiers réels afin d'y collecter des données supplémentaires susceptibles d'éclairer le comportement d'ouvrages variés dans des conditions géotechniques diverses.

Plusieurs chantiers ont été suivis ou sont encore en cours : mail à Carrières sous Poissy (78), déviation de Chelles (77), remblai à Rouen (76), Boulevard périphérique à Tours (37), cadre béton armé enterré à Reims (51), massif d'éolienne à Ronchois (76), réservoir d'une STEP à Pont Audemer (27), dallage à Clermont-Ferrand (63), radier ICEDA-EDF au Bugey (01), remblai sous voirie à Bourgoin Jallieu (38).

# 3

## Essais sur modèles physiques

Thème animé par Luc THOREL (LCPC Nantes)

- **Essais de caractérisation :**

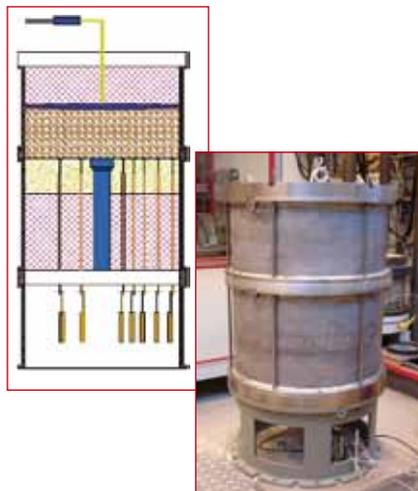
Ces essais sont destinés à caractériser les sols constituant les modèles physiques et les matelas de répartition utilisés lors des chantiers expérimentaux.

Des essais triaxiaux de très gros diamètre (300 mm) ont permis de tester le matériau granulaire mis en œuvre sur les sites de Saint-Ouen et de Chelles. Ils ont montré que le module du matelas granulaire pouvait atteindre des valeurs assurément plus élevées (600 MPa) que celles adoptées pour le dimensionnement lorsqu'on ne dispose pas de tels essais.

- **Chambre d'étalonnage :**

Ces essais à l'échelle 1/5 sont destinés à reproduire le comportement du matelas autour des têtes d'inclusion. L'ensemble est noyé dans un mélange de sable et de billes de polystyrène représentant le sol compressible, recouvert par un matériau granulaire représentant le matelas de répartition.

Deux types de chargement sont appliqués : avec une baudruche (simulation d'un remblai) ou avec un piston (simulation d'un dallage peu déformable).



Chambre d'étalonnage (échelle 1/5). CERMES



Centrifugeuse 1 (Echelle 1/28).  
Comportement maille élémentaire.  
LCPC Nantes.

#### • Centrifugeuse

Des prototypes d'inclusions à l'échelle 1/28 équipés de trois niveaux de capteurs de force, noyés dans un mélange de kaolin et de sable simulant le sol compressible et recouvert par un matériau granulaire représentant le matelas de répartition, sont testés à 28g. Un pénétromètre statique embarqué permet de contrôler les propriétés du sol compressible. Le comportement simulé de deux groupes d'inclusion de 50 cm de diamètre, de 10 m de longueur et espacés de 2 ou 2,5 m et chargés par l'équivalent de 10 m de remblai est observé en centrifugeuse.

## 4

### Modélisation numérique

Thème animé par Daniel DIAS (INSA Lyon)

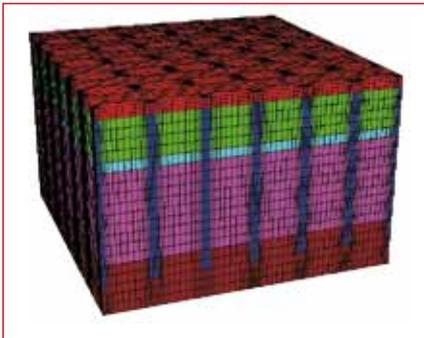
Il s'agit de disposer d'outils de simulation pour étendre la portée des résultats expérimentaux.

Cette modélisation mobilise plusieurs laboratoires de recherche avec des outils numériques différents :

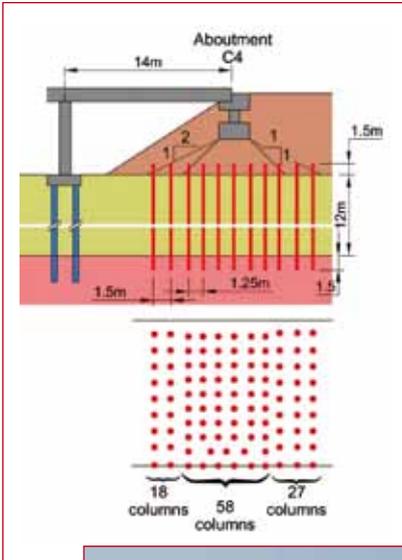
- méthode par différences finies appliquée à un modèle 3D avec utilisation d'un logiciel FLAC 3D,
- modèle 3D discret développé à l'Université de Grenoble,
- modèle biphasique développé au laboratoire Navier (Paritech, LCPC)

Pour juger de la capacité des modèles numériques utilisés à ce jour à prédire le comportement et les tassements des ouvrages sur sol renforcé par inclusions rigides un concours de prévision à l'aveugle "benchmark" a été organisé entre les partenaires du projet sur les chantiers expérimentaux de Saint-Ouen-l'Aumône et de Chelles. Il a reçu 18 réponses provenant de 8 organismes.

Les éléments recueillis lors de ces concours constituent une référence particulièrement utile pour juger de la validité des différentes approches et également identifier les facteurs clés qui contrôlent le comportement de ce type d'ouvrages.



Modèle 3D avec utilisation d'un logiciel FLAC 3D.



## 5

### Rédaction des recommandations et diffusion des résultats

Thème animé par Olivier COMBARIEU

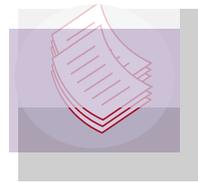
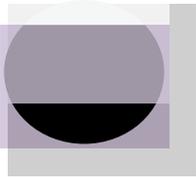
Ces recommandations constitueront la synthèse des points dégagés par les actions. Elles seront destinées à promouvoir l'utilisation des techniques de renforcement par inclusions rigides verticales auprès de tous les prescripteurs en apportant le cadre commun de référence, validé par les observations expérimentales, qui fait défaut à l'heure actuelle et nuit au développement de ces techniques. Le champ d'application couvert s'étendra des remblais aux fondations et dallages sur sol compressible.

Le sommaire du Guide comprendra 6 chapitres :

- description de la technologie et son développement,
- mécanismes de fonctionnement d'un groupe d'inclusions rigides,
- conception et dimensionnement,
- reconnaissances et essais préalables,
- modalités d'exécution,
- contrôles.



Colonnes Colmix.



## Publications

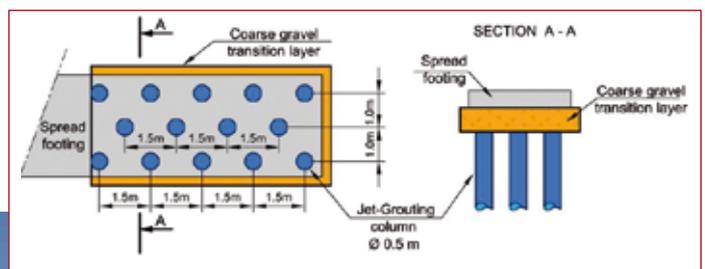
- **La synthèse des travaux du Projet National ASIRI permettra la rédaction d'un guide pratique à paraître en 2011.**
- Neuf thèses ont été engagées, dont quatre sous forme de contrat CIFRE associant un financement Etat à un financement par l'entreprise d'accueil.
- Les travaux du Projet National ont fait l'objet de rapports internes et ont été présentés à l'occasion de conférences nationales et internationales : Mexico (mai 2006), Bordeaux (mai 2007), Guimaraes (Portugal avril 2007), Venezuela (2007), Grenoble (2007), Londres (décembre 2007), Dundee (UK juin 2008), Nantes (juin 2008), Edinburg (UK septembre 2008), La Nouvelle Orléans (mars 2008), Arlington (USA mars 2008), Skikda (Algérie octobre 2008), Coimbra (Portugal mai 2008), Casablanca (Maroc novembre 2009), Alexandrie (Egypte octobre 2009), Nantes (avril 2009), Londres (UK 2009), Guaruja (Brésil 2010), West Palm Beach (USA, 2010) et publiés dans des revues scientifiques spécialisées en géotechnique : Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Travaux, Journal of Geomechanics, Revue Française de Géotechnique, Engineering Geology.



## Durée Budget

Le Projet National ASIRI a démarré en 2005 pour une durée prévisionnelle de 4 ans.

Le budget s'élève à 2 389 280 € HT, dont une subvention de la DRAST de 478 000 € HT et le solde par les apports en nature et cotisations des Partenaires.



Colonnes Jet Grouting.  
Palais de Justice de Grasse.

# Applications et retombées du Projet National

**Le Projet National a mis en lumière comment un matelas granulaire coiffant un réseau d'inclusions rigides opère un report de charge significatif et pérenne sur les têtes d'inclusion. Il est ainsi possible de constituer la fondation d'ouvrages étendus sollicitant de manière maîtrisée les dallages ou radiers sur lesquels ils reposent ou d'assurer la stabilité de remblais en maîtrisant également leurs tassements.**

■ L'efficacité accrue obtenue en combinant dans un **système composite de fondation** un dallage, un matelas granulaire et des inclusions a été confirmée par tous les modèles numériques ou physiques, et vérifiée par tous les ouvrages expérimentaux instrumentés suivis dans le cadre du projet.

Ce constat a conforté l'intérêt pour cette solution de fondation, déjà identifiée comme une spécificité nationale, dans l'état de l'art en France et à l'étranger qui avait été établi au démarrage du projet.

Ceci justifie le développement conséquent, depuis 2005, du champ d'application de cette technique s'exprimant par une augmentation substantielle du volume des travaux spéciaux de fondation par inclusions notamment dans le marché des entrepôts logistiques et des surfaces commerciales où la solution dallage sur inclusions rigides apparaît souvent la mieux économique.

■ Cette **application à des dallages** constitue une spécificité au plan international, où les applications de la technique se limitent le plus généralement à des remblais. Cette spécificité, confortée par les actions du Projet National, est désormais reconnue comme un savoir-faire des entreprises françaises, grâce auquel elles développent des **marchés à l'international**.

■ Les procédés de mise en œuvre des inclusions ont également fait l'objet de **développements technologiques** significatifs quant à la puissance et au rendement des équipements. La capacité de réaliser de manière contrôlée des inclusions d'un diamètre donné, ancrées de la profondeur requise dans un niveau porteur rend possible de fonder les ouvrages les plus divers sans extraire de déblais. La technique des inclusions rigides apparaît ainsi particulièrement adaptée à des projets associant un plus grand nombre d'éléments de fondation mais de diamètre réduit.

La meilleure compréhension des mécanismes par lesquels les charges peuvent être transférées sur un réseau resserré d'éléments plus faciles à réaliser a clairement contribué à cette évolution.

■ Le renforcement par inclusions rigides est ainsi propice à des **solutions de développement durable** limitant les déblais à évacuer et à mettre en décharge. Il favorise aussi le développement des zones « brunes » comme des sites d'anciennes décharges ou de remblais divers.

■ Le crédit acquis par la technique et les méthodes de dimensionnement a également favorisé leur extension à des **ouvrages sensibles**. Il faut citer le projet ICEDA d'entreposage de déchets actifs, soumis aux exigences des installations nucléaires, qui a pu émerger et être concrétisé, après aval des autorités de sûreté, en partie grâce au capital d'expérience accumulé sur ce type d'ouvrages par le Projet National. Il faut également citer le recours très fréquent des inclusions rigides pour les **fondations d'éoliennes**, dont chacun mesure le développement actuel.

©ASCO TP



■ En ce qui concerne les méthodes de calcul, le Projet National ASIRI a permis d'étendre le champ d'application des modèles **numériques discrets** à d'autres ouvrages que ceux pour lesquels ils avaient été développés à l'origine, et de reconnaître leur capacité à mieux simuler le comportement d'un matelas granulaire que les modèles numériques continus. Ceci leur confère désormais le statut de modèle de référence pour simuler le comportement des milieux granulaires. Ceci ouvre la voie à de nouvelles applications dans le domaine des fondations, les modèles discrets permettant d'évaluer leur efficacité avant de recourir à des expérimentations sur ouvrages réels.

■ Le projet a également vu le développement d'outils **numériques simples**, adaptés au projet des ouvrages courants que sont les entrepôts logistiques ou les bâtiments commerciaux ; ces outils simples qui intègrent néanmoins les facteurs clés du comportement mis en lumière par les expérimentations, pallient de manière tout à fait satisfaisante les difficultés qu'il y aurait à traiter le dimensionnement des mêmes ouvrages par des modèles numériques aux éléments finis 3D. Ceci constitue également une retombée positive du point de vue de l'ingénierie de ces projets particuliers.

■ **Les essais en centrifugeuse** ont apporté un éclairage décisif dans la compréhension des mécanismes à considérer autour des têtes d'inclusion, selon que la charge est appliquée d'une manière « souple » ou « rigide ». La cohérence des résultats expérimentaux avec ceux des modèles numériques a confirmé tout le potentiel des modèles en centrifugeuse pour l'appréhension de phénomènes physiques mal identifiés. Cette reconnaissance étend celle qui leur avait été reconnue à l'occasion des études spécifiques du projet exceptionnel sur inclusions rigides qu'était le pont de Rion-Antirion. On peut affirmer que les modèles en centrifugeuse ont gagné une reconnaissance accrue comme outil pour la vérification d'ouvrages géotechniques mobilisant des phénomènes d'interaction complexes et potentiellement encore mal connus.

■ La reconnaissance de l'efficacité du système composite de fondations obtenu en combinant des éléments d'ouvrages mis en œuvre par des entreprises distinctes (inclusions, matelas, dallage) montre en même temps la **nécessité d'une conception globale**. L'ouvrage optimal n'est pas la réunion des éléments optimisés par chacune des entreprises. C'est le rôle du maître d'œuvre accompagné du spécialiste géotechnicien, d'identifier et élaborer la configuration optimale du point de vue du maître d'ouvrage, puis d'assurer la coordination des intervenants nécessaire à sa réalisation.

Le Projet National ASIRI éclaire le **rôle indispensable de l'ingénierie générale** dans la conduite de ces projets pour le bénéfice final du maître d'ouvrage. L'ingénierie est bien l'agent indispensable par lequel des objets divers peuvent être assemblés pour un gain global décisif. Le Projet National aura contribué ainsi à rappeler le rôle de chef d'orchestre que doit tenir l'ingénierie générale dans tout projet de construction.



Pont de Rion Antirion.

