

ASIRI+

Programme de recherche

Auteurs : Briançon L., Cuira F., Dias D., Grange S., Racinais J., Simon B., Thorel L., Villard P.

17/01/2019

Table des matières

.....	1
Introduction.....	4
Tâche 1 : Etude des mécanismes développés dans la plateforme de transfert de charge – Approche expérimentale.	5
Plot 1. Etude du type de renforcement géosynthétique dans la plateforme granulaire.....	6
Plot 2. Etude des recouvrements.....	7
Essais en vraie grandeur.....	7
Essais à la centrifugeuse.....	8
Plot 3. Etude du comportement sous le talus.....	9
Essais en vraie grandeur.....	9
Essais à la centrifugeuse.....	10
Plot 4 : étude du comportement d’une plateforme en sol traité.....	10
Essais en vraie grandeur.....	10
Conditions de faisabilité et résultats attendus.....	11
Tâche 2 : Instrumentation d’ouvrages réels.....	12
Ouvrage 1 - Remblai sur inclusions rigides pour étudier l’influence du recépage.....	13
Ouvrage 2 – Etude des déplacements horizontaux sous les talus d’un remblai sur inclusions rigides.....	14
Tâche 3 : Essais en laboratoire pour étudier la position des renforcements sous les remblais de faible épaisseur avec prise en compte du trafic.....	15
Essais en laboratoire à échelle réelle.....	15
Essais en laboratoire à petite échelle.....	16
Essais à la centrifugeuse.....	17
Tâche 4 : Semelles sur inclusions rigides.....	18
Expérimentations en vraie grandeur.....	18
Essais à la centrifugeuse.....	19
Tâche 5 : Eolienne sur inclusions rigides.....	20
Contexte.....	20
Expérimentations.....	20
Modélisation numérique.....	21
Tâche 6 : Comportement du massif de sol renforcé par inclusions rigides sous sollicitations dynamiques.....	22
Tâche 7 : Comportement du massif de sol renforcé par inclusions rigides sous sollicitations sismiques.....	23
Tâche 8 : Modélisation numérique.....	24
Sous-tâche 8.1 : Benchmarks.....	24

Sous-tâche 8.2 : Modélisation des mécanismes développés dans la PTC.....	24
Sous-tâche 8.3 : Modélisation d'un ouvrage soumis à des sollicitations dynamiques	25
Sous-tâche 8.4 : Modélisation d'un ouvrage soumis à un séisme	25
8.4.1 Comportement du matelas	25
8.4.2 Interaction d'origine inertielle	26
8.4.3 Transmission des efforts d'origine « cinématique »	26
Sous-tâche 8.5 : Modélisation du comportement d'une semelle sur inclusions rigides	26
Synthèse	27
Tâche 9 : Valorisation et transfert vers la pratique.....	27
Sous-tâche 9.1 : Logiciels de bureau d'études (BE).....	27
Sous-tâche 9.2 : Rédaction des recommandations.....	27
Sous-tâche 9.3 : Publications et communications.....	27
Sous-tâche 9.4 : Site internet	28
Sous-tâche 9.5 : Journées de restitution.....	28
Tâche 10 : Etude de l'impact environnemental	28
Tâche 11 : Pilotage et gestion du projet.....	29
11.1 : Comité Directeur	29
11.2 : Comité de pilotage	30
11.3 : Organisation du travail	31
11.4 : Doctorants et Post-Doctorants.....	31
11.5 : Planning.....	32
11.6 : Livrables.....	32
11.7 : Budget et plan de financement.....	33
11.8 : Partenaires pressentis	34
Annexe : liste des partenaires pressentis.....	35

Introduction

L'état de l'art rédigé dans le cadre de l'étude de faisabilité du PN ASIRI+ a mis en évidence un besoin de mener des actions de recherche pour différentes applications du renforcement des sols par inclusions rigides. A partir de ce constat, le programme de recherche du PN ASIRI+ a été élaboré autour de trois principaux axes :

- Axe 1 : l'étude des plateformes de transfert de charge,
- Axe 2 : le comportement des ouvrages sous sollicitations quasi-statiques et/ou inclinées,
- Axe 3 : le comportement des ouvrages sous sollicitations dynamique et sismiques.

Plusieurs thèmes seront abordés au travers de 9 tâches (Tableau 1) :

- Tâche 1 : Etude des mécanismes développés dans la plateforme de transfert de charge – Approche expérimentale,
- Tâche 2 : Instrumentation d'ouvrages réels,
- Tâche 3 : Essais en laboratoire pour étudier la position des renforcements sous les remblais de faible épaisseur avec prise en compte du trafic,
- Tâche 4 : Semelles sur inclusions rigides,
- Tâche 5 : Eolienne sur inclusions rigides,
- Tâche 6 : Comportement du massif de sol renforcé par inclusions rigides sous sollicitations dynamiques,
- Tâche 7 : Comportement du massif de sol renforcé par inclusions rigides sous sollicitations sismiques,
- Tâche 8 : Modélisation numérique,
- Tâche 9 : Valorisation et transfert vers la pratique.

Une tâche transversale (tâche 10) concernant l'étude de l'impact environnemental de la technique de renforcement de sol par inclusions rigides sera développée. Enfin la dernière tâche (Tâche 11) concernera le pilotage de ce projet.

Tableau 1. Découpage du PN ASIRI +

Axe	Thème	Tâches
1	Plateformes granulaires renforcées	1 – 2 – 3 – 8 – 9 – 10
	Plateformes en sol traité	1 - 8 - 9 – 10
	Semelle sur inclusions rigides	4 - 8 - 9 – 10
2	Eoliennes	5 - 10
	Inclusions rigides sous talus de remblai	1 - 8 - 9
	Sollicitations de circulation	3 - 8 - 9
3	Sollicitations dynamiques	6 - 8 - 9
	Séismes	7 - 8 - 9

Les objectifs généraux du projet ASIRI+ sont les suivants :

- Une meilleure compréhension du comportement du renforcement de sol par inclusions rigides, pour les géométries et sollicitations complexes envisagées, induisant une optimisation de leur dimensionnement,

- un positionnement avancé de l'ingénierie géotechnique française sur les sujets évoqués, matérialisé par un ouvrage de recommandations (traduit en anglais) et de nombreux rapports de recherche partenariale (entre praticiens et académiques),
- la poursuite d'une dynamique scientifique et technique à dominante mécanique (initiée lors du PN ASIRI) incluant une approche nouvelle de performance environnementale,
- l'ouverture de nouveaux marchés pour les partenaires du PN ASIRI+ tels que ceux du renforcement des sols en zone sismique, sous éolienne ou combiné au renforcement par géosynthétique.

Tâche 1 : Etude des mécanismes développés dans la plateforme de transfert de charge – Approche expérimentale.

Cette expérimentation en vraie grandeur doit permettre d'étudier les mécanismes de report de charge dans la plateforme disposée sur les inclusions rigides en maîtrisant le tassement du sol sous-jacent. Afin de multiplier les configurations testées, la possibilité de réaliser des essais sur un site naturel comportant une couche de sol compressible n'a pas été retenue. L'expérience du projet national ASIRI nous a enseigné qu'il est très difficile de trouver ce type de site, le sol compressible n'est pas forcément homogène sur toute la zone d'essai, le coût des essais reste élevé et le nombre de plots d'essais est limité. Plusieurs pistes sont à l'étude dont une déjà mise en œuvre par Sloan (2011) et qui consiste à :

- implanter dans une fosse les cylindres en béton de 30 cm de diamètre et 50 cm de longueur afin de simuler les inclusions rigides,
- installer dans la fosse entre les inclusions rigides des blocs de polystyrène.

Après mise en place du remblai, les blocs de polystyrène sont dissous par de l'acide citrique. Cet essai simulera un fort tassement du sol compressible jusqu'à l'absence de réaction entre le sol compressible et la plateforme de transfert de charge. Une variante pourra être envisagée en remplaçant les blocs de polystyrène à dissoudre par une mousse compressible qui permettra, ayant caractérisé finement sa compressibilité, de simuler le tassement du sol compressible avec présence d'une réaction. Avec la présence des blocs de polystyrène, il est possible de compacter le remblai et ainsi s'approcher des conditions réelles de mise en œuvre. Bien que cet essai ne reproduise pas fidèlement le comportement réel du sol compressible qui tasse pendant la mise en place du remblai, il permet de tester différentes configurations de plateforme de transfert de charge. Des essais de faisabilité seront préalablement effectués pour fixer le protocole de dissolution. On testera notamment la dissolution de couches de polystyrène d'épaisseur variable mises en place sur une couche de sable pour simuler différents cas de tassement. Concernant les problèmes de gestion des résidus, nous nous rapprocherons du chercheur américain (Sloan) qui a utilisé ce même système pour étudier un remblai sur inclusions rigides en 2011. La dissolution (disparition de la réaction mécanique verticale du « sol compressible ») des blocs de polystyrène génèrera des conditions très défavorables vis-à-vis du tassement de la PTC. Les résultats seront ensuite adaptés à des cas réels. Notons cependant que la plupart des normes actuelles ne tiennent pas compte de la réaction du sol compressible dans le dimensionnement des plateformes de transfert de charge renforcées par géosynthétiques. Dans les cas réels, l'optimisation des solutions proposées tiendra compte du frottement du sol sur les inclusions rigides.

D'autres sols compressibles analogiques telles que des mousses pourront être testés pour essayer de modéliser le plus fidèlement possible le comportement du sol compressible.

Pour réaliser des essais grandeur nature, les dimensions de la fosse seront de 16 m de long sur 8 m de large, permettant d'implanter 32 inclusions selon un maillage carré de 2 m de côté.

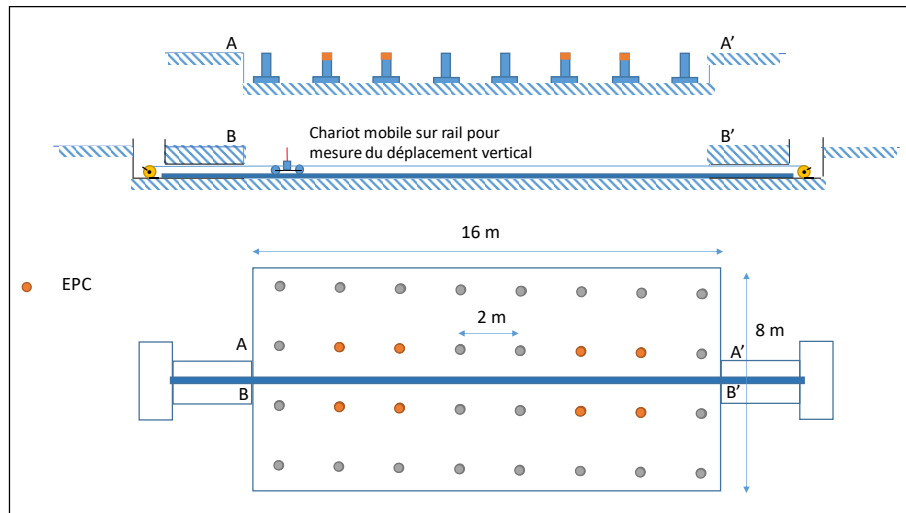


Figure 1. Configuration de la cuve expérimentale

Différentes configurations de plateforme sont envisagées :

- Plot 1 : étude du type de renforcement géosynthétique dans la plateforme granulaire
- Plot 2 : étude des recouvrements des géosynthétiques
- Plot 3 : étude du comportement sous talus
- Plot 4 : étude du comportement d'une plateforme en sol traité

Un cinquième plot de référence sera mis en place sans géosynthétique.

Bien que la mise en place de ces plots expérimentaux requière des moyens de chantier, leur temps de réalisation est relativement court puisqu'il n'est pas nécessaire de réaliser au préalable des investigations géotechniques, ni de réaliser les inclusions.

L'instrumentation consiste à mesurer le transfert de charge, la déflexion et la déformation des GSY, le tassement en surface, la position du plan d'égal tassement. L'essai doit aussi mettre en évidence les mécanismes de mise en tension des nappes GSY pendant la phase de compactage du matelas granulaire. Des capteurs de pression totale (EPC) seront disposés sur les têtes des inclusions rigides et au droit de celles-ci à différentes hauteurs pour estimer le transfert de charge. La déflexion des GSY sera mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement laser se déplaçant sur un rail situé en fond de fouille (au niveau des assises des inclusions rigides) dans le cas des essais avec dissolution des blocs en polystyrène. Deux buses d'accès situées de part et d'autre du plot permettront d'effectuer cette mesure. Des capteurs à fibre optique directement insérés dans les nappes GSY mesureront leur déformation avec une résolution spatiale millimétrique. La technologie utilisée se fait par mesure de la rétrodiffusion Rayleigh grâce à un montage optique fondé sur la réflectométrie fréquentielle OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry). Le tassement en surface sera obtenu par des levés topométriques et la position du plan d'égal tassement par des capteurs de pression hydraulique.

Plot 1. Etude du type de renforcement géosynthétique dans la plateforme granulaire

L'état de l'art portant sur les plateformes de transfert de charge a mis en évidence une absence de consensus sur le type de géosynthétiques à utiliser, leur nombre et leur position. Seule la comparaison du type de géosynthétique sera menée dans la tâche 1 (Figure 2). Les autres configurations permettant d'analyser l'influence du nombre et de la position des géosynthétiques dans la plateforme granulaire requièrent la réalisation de nombreux essais et seront réalisés dans l'expérimentation de la tâche 3. L'expérimentation du remblai sur inclusions rigides du PN ASIRI avait mis en avant des mécanismes de mobilisation des nappes GSY et du transfert de charge différents selon que l'on utilisait un GTX ou un

GGR. Ces deux types de GSY seront testés : un GTX de renforcement biaxial et deux GGR monoaxiales croisées. En plus de l'instrumentation de base présentée précédemment, des capteurs de pression totale et des capteurs de tassement seront rajoutés sur la PTC pour analyser finement la répartition de la contrainte sur la PTC et l'apport du confinement par les GGR sur le tassement différentiel. Un plot de référence sans géosynthétique sera réalisé au préalable.

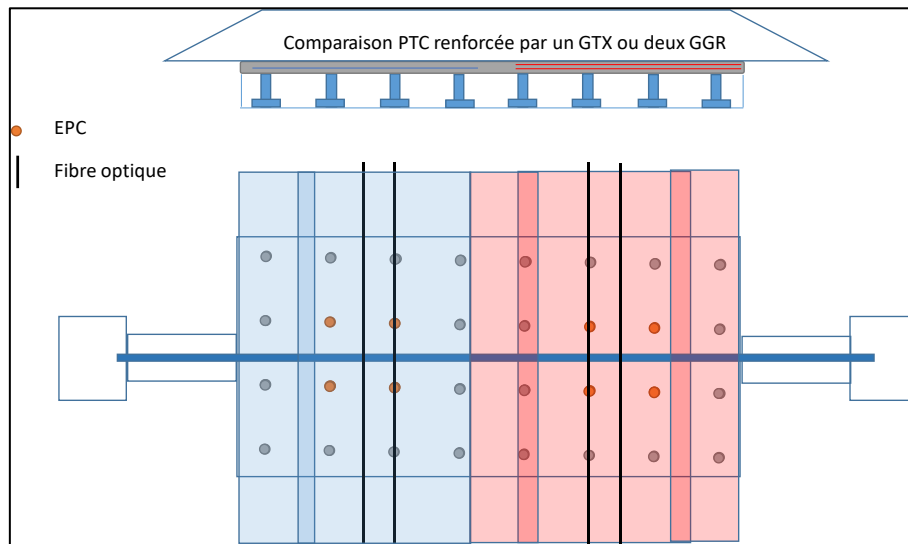


Figure 2. Schéma de principe de l'essai permettant de comparer l'efficacité du renforcement GSY

Plot 2. Etude des recouvrements

Essais en vraie grandeur

Les zones de recouvrements des nappes géosynthétiques doivent être étudiées avec soin car elles présentent des caractéristiques mécaniques différentes des zones courantes. Il a été démontré que la traction des nappes géosynthétique était maximale au voisinage des têtes d'inclusions et donc la position des recouvrements vis-à-vis des files d'inclusions doit être prise en compte dans le dimensionnement, comme dans les règles de mise en œuvre, en implantant les zones de recouvrement afin qu'elles n'interfèrent pas sur le fonctionnement des nappes géosynthétiques. Deux configurations seront testées : un recouvrement au droit d'une file d'inclusions et un recouvrement entre deux files (Figure 3). Par ailleurs, les mesures sur les parties courantes de cet essai pourront être comparées aux résultats des essais du plot 1.

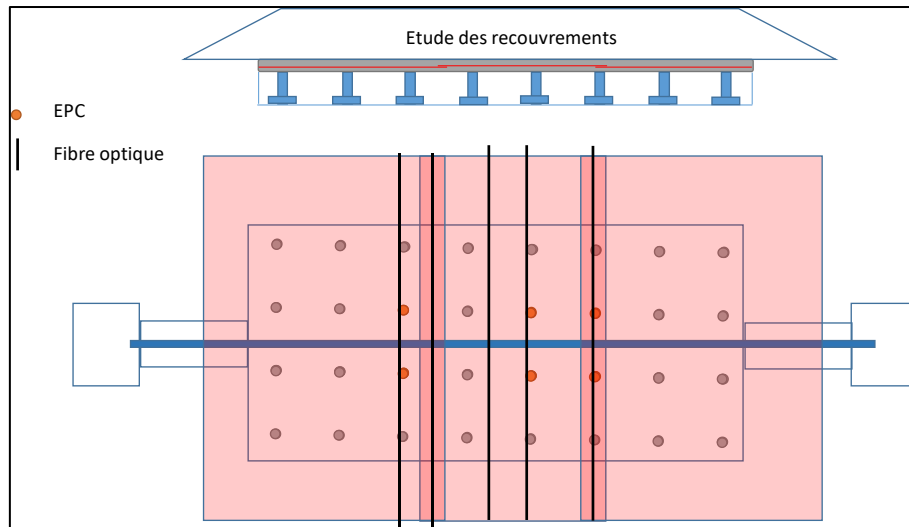


Figure 3. Schéma de principe de l'étude des recouvrements GSY

Essais à la centrifugeuse

En utilisant le dispositif d'essais dit du « Plateau Mobile », développé dans le cadre du PN ASIRI (Figure 4), une étude paramétrique sur les zones de recouvrements des nappes géosynthétiques pourra être menée. Le tassement du sol compressible est simulé via la descente contrôlée d'un plateau perforé de 61 passages réservés à autant d'inclusions rigides, dont les 9 centrales sont équipées d'un capteur de force, afin d'évaluer l'efficacité.

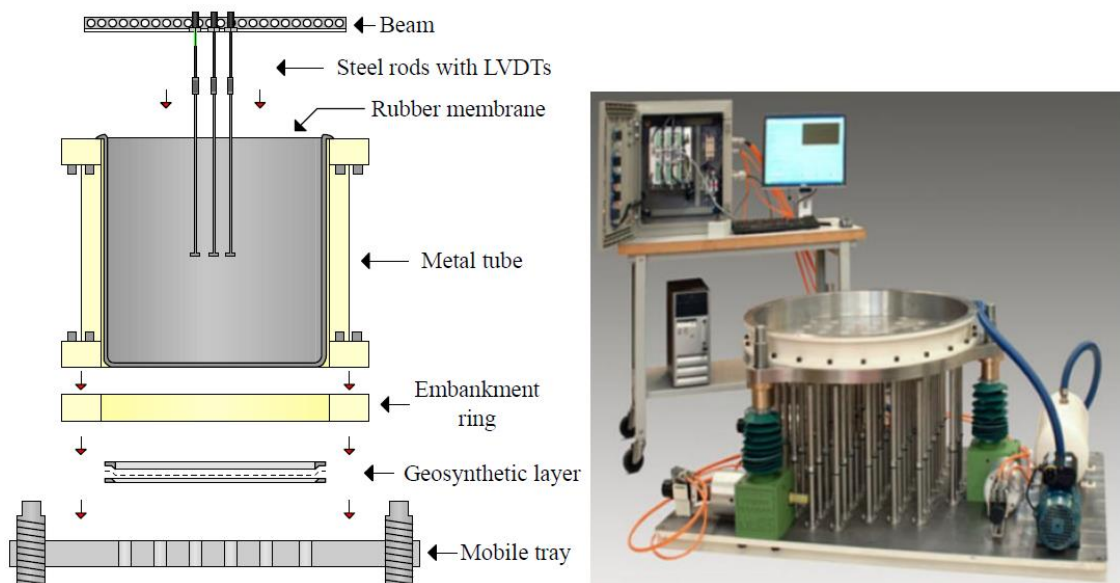


Figure 4. Dispositif du plateau mobile utilisé dans la centrifugeuse

Plusieurs taux de recouvrement α , plusieurs hauteurs de remblai H , plusieurs surcharges et surtout plusieurs configurations de recouvrement (surface, positionnement et orientation vis-à-vis de l'axe du maillage des inclusions rigides,...) pourront être testés, afin de constituer une base de données expérimentale qui sera comparée avec des simulations numériques.

Concernant les expérimentations en centrifugeuse, le dispositif expérimental du « plateau mobile » (Rault et al. 2010) existe déjà. Focalisé sur le comportement de la PTC (le tassement du sol compressible est simulé par le mouvement descendant du plateau), il permet de réaliser plusieurs

essais par semaine (jusqu'à 8 au cours des thèses de Girout 2014 et Fagundes 2016). Il nécessitera quelques adaptations et compléments afin de pouvoir mener des expérimentations (augmentation du nombre d'inclusions rigides instrumentées, acquisition de plusieurs capteurs à fibre optique de technologie Réseau de Bragg, rigidification du plateau lui-même,...).

Plot 3. Etude du comportement sous le talus

Essais en vraie grandeur

Il sera aussi possible de mesurer la mobilisation des nappes géosynthétiques sous le talus du remblai. Deux configurations d'ancrage seront testées : recouvrement simple et ancrage avec retour sur la PTC pour deux configurations d'implantations d'inclusions rigides : maillage carré (Figure 5) ou en quinconce (Figure 6). Dans ce cas particulier, l'utilisation d'un matériau compressible simulant le sol sera privilégiée.

Les mesures sous le remblai pourront aussi être comparées aux résultats du plot 1 en zone courante et du plot 2 pour la zone de recouvrement.

Un plot expérimental en vraie grandeur sera réalisé dans la tâche 2 en complément pour étudier le déplacement du sol renforcé afin de définir les courbes $g(z)$ dans le cas d'un sol renforcé par inclusions rigides.

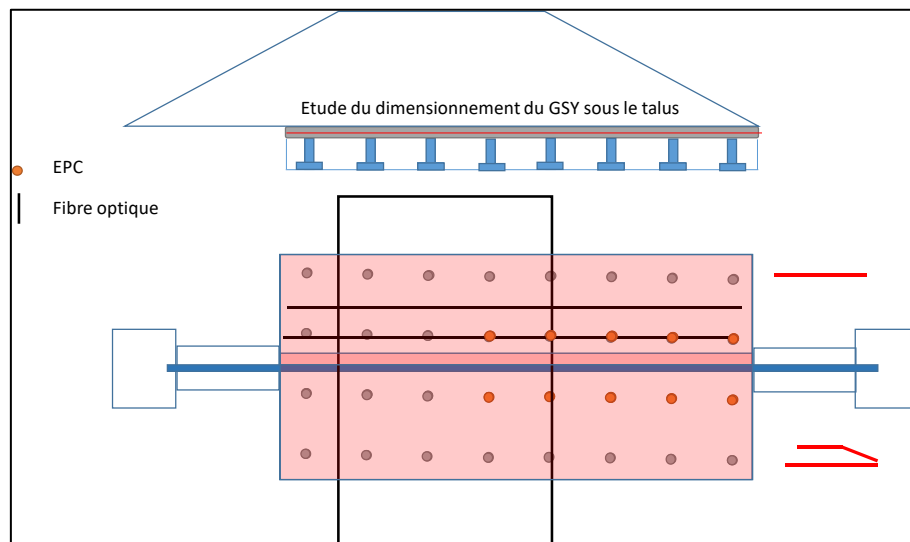


Figure 5. Schéma de principe de l'étude du comportement sous le talus

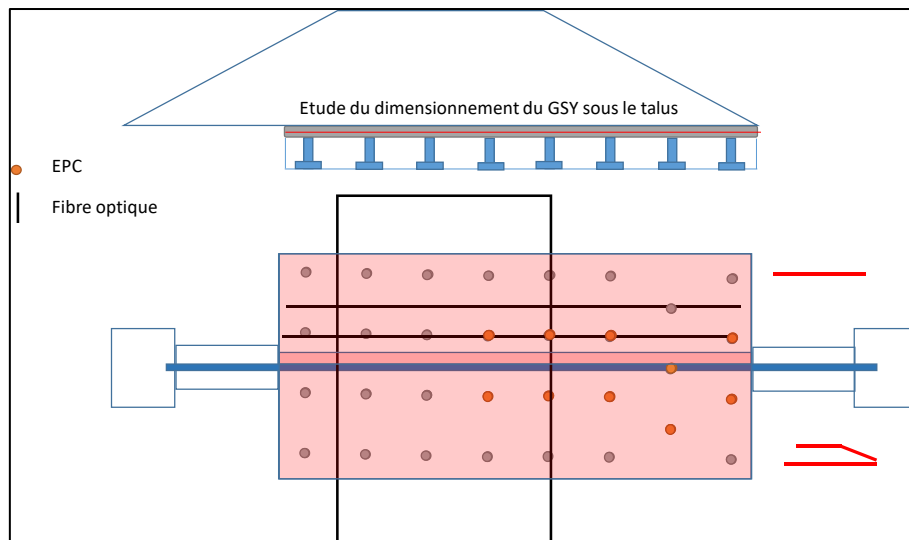


Figure 6. Schéma de principe de l'étude du comportement sous le talus avec une configuration en quinconce

Essais à la centrifugeuse

Le dispositif du « Plateau Mobile » (Figure 4) pourra être utilisé pour aborder la question du talus. Jusqu'à présent seules des configurations de PTC horizontales ont été testées en centrifugeuse. En installant les inclusions rigides dans la zone située sous le talus, l'effet sur le report de charge de différents paramètres (pentes, renforcement géosynthétique...), pourra être étudié. Le géosynthétique sera instrumenté en fibre optique afin d'obtenir sa déformation.

Plot 4 : étude du comportement d'une plateforme en sol traité

Essais en vraie grandeur

Bien qu'il ne soit plus rare que des plateformes de transfert de charge soient réalisées en sol traité au liant, l'état de l'art et l'enquête réalisée auprès de la profession mettent en évidence un besoin de proposer des règles de dimensionnement, d'imposer la réalisation de certains essais de caractérisation du traitement et de cadrer les cas d'application. Deux essais sont dédiés à cette étude (Figure 7) ; la même plateforme en sol traité sera mise en place sur deux maillages d'inclusions rigides. L'objectif de ces essais est de montrer que le comportement « fragile » d'une plateforme en sol traité n'est pas adapté lorsque le tassement différentiel au niveau des têtes d'inclusions est trop important. La comparaison des résultats de ces essais avec ceux du plot 1 permettra aussi d'analyser les efficacités d'une plateforme granulaire renforcée et d'une plateforme en sol traité. Ces essais en vraie grandeur seront couplés à une campagne expérimentale de caractérisation du sol traité afin de proposer les essais les plus adaptés pour dimensionner ces plateformes.

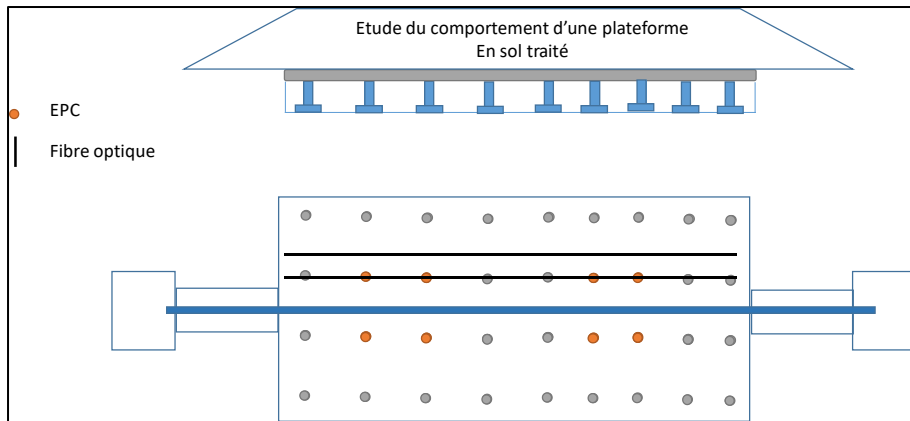


Figure 7. Schéma de principe de l'étude du comportement d'une plateforme en sol traité

Essais de caractérisation en laboratoire

Au laboratoire, pour un jeu de matériaux et de traitements à définir (mais semblable aux cas étudiés en vraie grandeur), une caractérisation fine des propriétés de déformabilité et de rupture sera réalisée. Un chargement en fatigue permettra aussi d'évaluer les dégradations au cours du temps pour un chargement cyclique représentatif. Ces données enrichiront les modèles numériques et pourront contribuer aux méthodes de dimensionnement.

Ce travail intégrera : 1) une caractérisation physique et mécanique du matériau non traité ; 2) une caractérisation mécanique du matériau traité au laboratoire allant du « classement GTS » au comportement élastoplastique et à la fatigue sur essais « structurels » ; 3) une approche physico-chimique allant de la minéralogie à l'identification des mécanismes de prise.

Les essais « structurels » consisteront à réaliser un échantillon de PTC en sol traité, à le mettre en appui sur 4 quarts d'inclusions rigides situés aux 4 coins, et à charger en son centre avec une presse dynamique. Le comportement pourra être étudié en changeant les conditions aux limites inférieures sur 4 appuis, sur un matériau simulant un sol compressible, en combinaison des points précédents.

Conditions de faisabilité et résultats attendus

La bonne réalisation de ces essais requiert de disposer pendant 6 mois d'un site avec des moyens humains et des engins de chantier afin de mettre en place et démonter les remblais de chargement. Chaque essai avec la plateforme granulaire nécessitera un mois entre la préparation, le test et le démontage, nous comptons un mois et demi pour le test en sol traité et 15 jours de préparation de la fosse.

Ce type de fosse existe au CEREMA de Rouen. Les essais seront donc réalisés sur ce site qui bénéficie aussi des moyens de mise en œuvre de remblais et d'un personnel qualifié pour la réalisation de ce type d'essais spécifiques.

Le tableau 2 présente les différents éléments qui pourront être observés dans chaque plot.

Tableau 2. Eléments observés dans chaque plot

	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4
Efficacité en charge du dispositif en zone courante	xx	x	x	x
Position des recouvrements	x	xx	x	
Comportement sous le talus			x	
Tassement différentiel sur la PTC en zone courante	xx	x	x	x
Ancrage des nappes GSY			x	

Le tableau 3 détaille les actions à mener dans le cadre de la tâche 1.

Tableau 3. Description des actions de la tâche 1

Actions	Intitulé	Personnel	Matériel	Fonctionnement	Partenaire	Coût PN
1.1	Mise à disposition du site expérimental			6	CEREMA	6
1.2	MoE chantier	7		2	CEREMA	2
1.3	Réalisation et Installation des IR – Fourniture et installation Polyester	14		27	CEREMA	27
1.4	Approvisionnement et mise en œuvre des matelas granulaires	19		6	CEREMA	6
1.5	Approvisionnement et mise en place des renforcements horizontaux				Prd GSY - GEOMAS	-
		5			CEREMA	
1.6	Approvisionnement et mise en place du matelas traité	4		1	CEREMA	1
1.7	Terrassement - Approvisionnement et mise en place du remblai (2 m)	24		4	CEREMA	4
1.8	Essais labo de caractérisation du sol du matelas	5		20	CERMES	20
1.9	Fourniture, mise en place et suivi de l'instrumentation des plots	20	5	80	GEOMAS	85
		7		2	CEREMA	2
1.10	Mise en état de la fosse	11		3	CEREMA	3
1.11	Approvisionnement des buses	1		1	CEREMA	1
1.12	Réalisation et analyse des essais	10 + 70			GEOMAS + CIFRE	
		13			CEREMA	
1.13	Mise à disposition de la centrifugeuse géotechnique	100		300	IFSTTAR	
1.14	Fournitures pour essais en centrifugeuse (sable, capteurs, consommables,...)		50		IFSTTAR	50
1.15	Mises à disposition de moyens d'essai de laboratoire pour la caractérisation mécanique de la PTC (sol naturel et sol traité)	30	10	5	IFSTTAR	5
1.16	Instrumentation pour les essais de fatigue « structurels » de la PTC en sol traité au laboratoire	30 + 55	5		IFSTTAR + CIFRE	5
1.17	Analyse physico-chimique	30 + 55	10		IFSTTAR + CIFRE	1
1.18	Pilotage de la Tache 1	Essais en vraie grandeur	20	2	CEREMA	2
		Centrifugeuse et caractérisation sol traité	120	5	IFSTTAR	5
Total			1 304 k€			225 k€

Tâche 2 : Instrumentation d'ouvrages réels

L'objectif de la tâche 2 est de profiter de deux remblais sur inclusions rigides pour tester dans le premier ouvrage l'influence du recépage d'une inclusion rigide et dans le second, les transferts de charge sous le talus ; la plateforme granulaire du second ouvrage devra être renforcée par des nappes géosynthétiques. Ces deux études peuvent être faites sur le même ouvrage mais sur deux zones

distinctes. Ces remblais pourront être instrumentés avant que le PN ASIRI+ débute si nous trouvons des chantiers qui se prêtent à ces besoins spécifiques et si les Maîtres d’Ouvrages acceptent ces interventions. Le coût des capteurs mis en place et certaines prestations d’instrumentation pourront être remboursés a posteriori par le PN aux adhérents du PN ayant participé à ces actions.

Ouvrage 1 - Remblai sur inclusions rigides pour étudier l’influence du recépage

Dans la première configuration, l’inclusion rigide est réalisée jusqu’au toit de la plateforme de travail (PT) et une plateforme granulaire renforcée est ajoutée sur les inclusions pour favoriser le transfert de charge. Dans cette configuration, on n’utilise pas la plateforme de travail comme partie basse de la PTC mais on peut espérer un meilleur report de charge par frottement de la PT sur le fût de l’inclusion. Dans la seconde configuration, l’inclusion est recépée à la base de la PT et la PT sert comme partie basse de la PTC. Ce cas est courant mais peut-être pas optimum en terme de report de charge. La comparaison entre ces deux configurations permettrait de mettre en évidence qu’un simple choix de disposition constructive peut avoir une incidence non négligeable sur l’efficacité du dispositif. Une attention particulière sera portée sur la mesure de la densité du sol au droit de l’inclusion recépée pour vérifier si le recépage ne conduit pas à une hétérogénéité de densité dans la PTC (Figure 8). La colonne de sol au droit des inclusions est une zone sensible car les contraintes appliquées y sont importantes. Il est donc nécessaire de veiller à ce que les méthodes constructives employées ne modifient pas la qualité de la plateforme de transfert de charge.

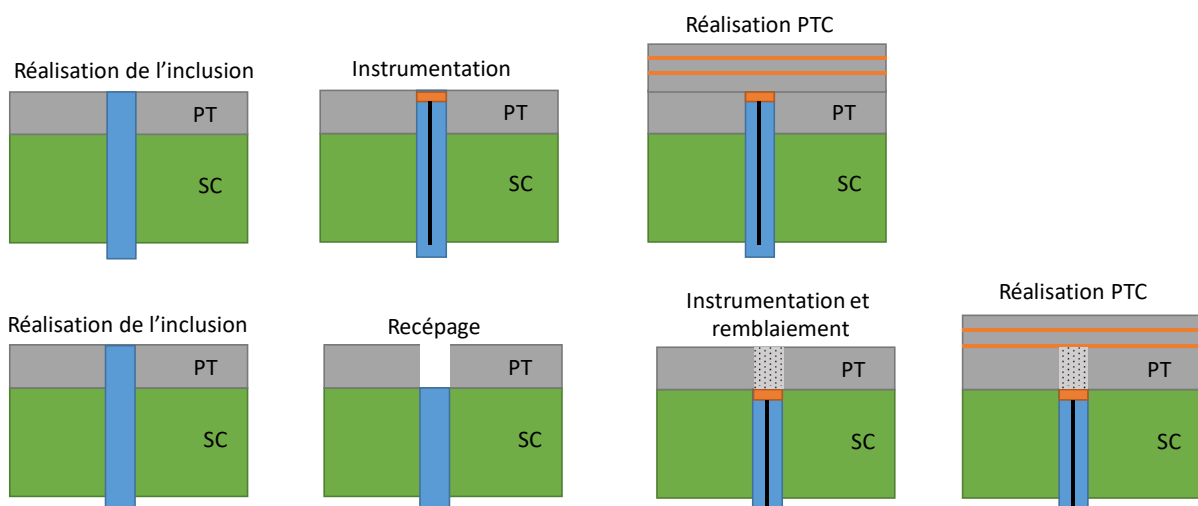


Figure 8. Schéma de principe de l’étude du recépage

Le tableau 4 détaille les actions à mener dans le cadre de la tâche 2.1.

Tableau 4. Description des actions de la tâche 2.1

Actions	Intitulé	Personnel	Matériel	Fonctionnement	Partenaire	Coût PN
2.1	Mise à disposition du chantier + travaux spéciaux	8		3	Ent IR	-
2.2	MoE chantier	5			Ent IR	-
2.3	Essais labo de caractérisation du sol du matelas	5		1	GEOMAS	1
2.4	Fourniture, mise en place et suivi de l’instrumentation des 2 plots	5	4	10	GEOMAS	10
2.5	Pilotage de la tâche 2.1	5		1	Ent IR	1
Total			47 k€			12 k€

Ouvrage 2 – Etude des déplacements horizontaux sous les talus d'un remblai sur inclusions rigides

A l'occasion d'un chantier de remblai sur inclusions rigides sans renforcement géosynthétique, il sera proposé au maître d'ouvrage de rajouter un géosynthétique sous une zone du talus et d'instrumenter par inclinomètre une inclusion en pied de rive dans la zone avec géosynthétique et une inclusion en pied de rive sous le talus sans géosynthétique. Un dispositif de mesure du déplacement sera ajouté pour analyser l'influence de la présence du géosynthétique sur les déplacements horizontaux (Figure 9). Cette simple instrumentation pourrait permettre d'évaluer l'efficacité d'un géosynthétique en remplacement du renforcement des inclusions rigides sous talus.

Si cela est possible sur un ouvrage réel, deux configurations d'implantation d'inclusions rigides seront évaluées : maillage carré et en quinconce.

Les tensions dans les géosynthétiques seront mesurées par l'intermédiaire de fibres optiques et les déplacements horizontaux du sol seront suivis à l'aide de deux forages inclinométriques si ces forages sont acceptés par le MOA.

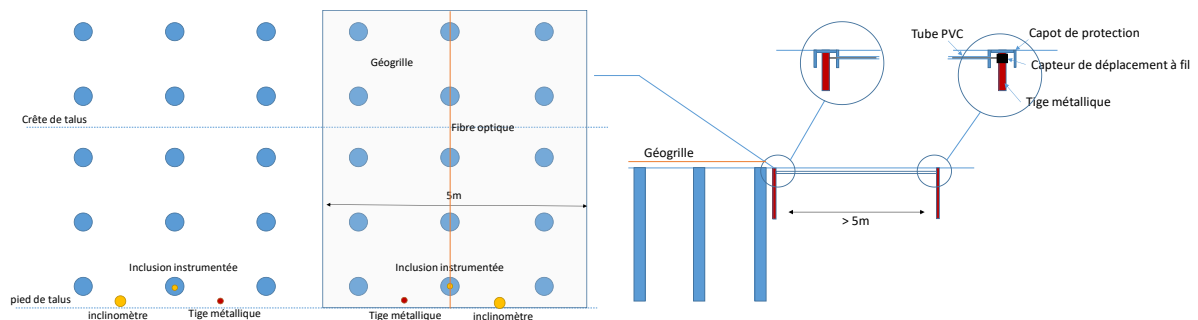


Figure 9. Schéma de principe d'une instrumentation sous talus renforcé (vue de dessus/ vue en coupe)

Le tableau 5 détaille les actions à mener dans le cadre de la tâche 2.2.

Tableau 5. Description des actions de la tâche 2.2

Actions	Intitulé	Personnel	Matériel	Fonctionnement	Partenaire	Coût PN
2.6	Mise à disposition du chantier + travaux spéciaux	8		3	Ent IR	-
2.7	MoE chantier	5			Ent IR ou MoE	-
2.8	Essais labo de caractérisation du sol du matelas	5		1	GEOMAS	1
2.9	Fourniture, mise en place et suivi de l'instrumentation des 2 plots	5	4	10	GEOMAS	10
2.10	Essais in situ de caractérisation du sol compressible (2 PS et 1 carotté)*				PN	8
2.11	Essais labo de caractérisation du sol compressible**	10		2	GEOMAS	1
2.12	Pose de deux inclinomètres	8			PN	8
2.13	Suivi inclinométrique	8		2	GEOMAS	2
2.14	Pilotage de la tâche 2.2	5		1	Ent IR	1
Total			77 k€			31 k€

* Il s'agit d'essais complémentaires puisque nous disposerons déjà des essais géotechniques courants pour l'ouvrage en construction. Selon leurs résultats des investigations complémentaires pourront être proposées car il est très important de bien caractériser le sol du site pour alimenter les benchmarks.

** Ces essais de caractérisation et de compressibilité seront faits par des laboratoires publics et n'impacteront pas le budget du projet. Leur nombre dépendra de l'homogénéité du sol pour être représentatif de son comportement.

Tâche 3 : Essais en laboratoire pour étudier la position des renforcements sous les remblais de faible épaisseur avec prise en compte du trafic

Essais en laboratoire à échelle réelle

Un dispositif expérimental permettant de tester l'efficacité des nappes GSY de renforcement de plateformes granulaires soumises à des charges roulantes est disponible dans le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon (Figure 10). Les dimensions du banc d'essai (1,8 m de large, 5 m de long et 1,2 m de haut) permettent d'envisager de réaliser des essais de PTC sur inclusions rigides à l'échelle 1. Un principe semblable à celui utilisé dans le plot expérimental de la tâche 1 sera mis en place (IR de 50 cm de haut, matelas de polystyrène à dissoudre pour simuler la compressibilité du sol ou sol analogue simulant la compressibilité d'un sol mou, instrumentation). L'avantage de cette expérimentation en laboratoire est de pouvoir multiplier les configurations du renforcement de la plateforme granulaire, du maillage des inclusions et d'appliquer des cycles de trafic. L'appareil permettant d'appliquer ce chargement est un Simulateur-Accélérateur de Trafic (SAT). Ce dispositif a été conçu et développé dans le cadre du LabCom PITAGOR de l'INSA de Lyon. Cet appareil simule un trafic uni ou bidirectionnel, sous une charge normale de 40 kN qui correspond à la charge d'un demi-essieu avec une contrainte au contact roue-surface de 566 kPa. Le SAT a été conçu pour offrir une longueur effective de roulement de deux mètres entre les zones tampons. Les structures routières non revêtues testées par ce dispositif sont soumises en général à 10 000 cycles, avec une profondeur maximale d'orniérage de 75 mm selon la FHWA (1998). La vitesse de circulation de la roue est fixée entre 7 et 10 km/h.

Quelques modifications devront être apportées au dispositif existant pour installer les inclusions rigides et le système de dissolution du polystyrène ou de sol analogue compressible. Des essais de circulation au droit d'une file d'inclusions ou entre deux files pourront être menés (Figure 11) ainsi que des essais de chargements verticaux (Figure 12). Les configurations testées dans le plot 1 de la tâche 1 seront testées sur cet appareillage afin de vérifier la cohérence des résultats et identifier les effets d'échelle s'ils existent. Les essais réalisés dans la tâche 3 permettront de :

- comparer l'efficacité de PTC renforcées ou non ;
- déterminer le plan d'égal tassement ;
- déterminer la configuration optimum du renforcement horizontal ;
- comparer l'effet d'une charge cyclique verticale et une charge roulante ;
- analyser les mécanismes de transfert de charge.

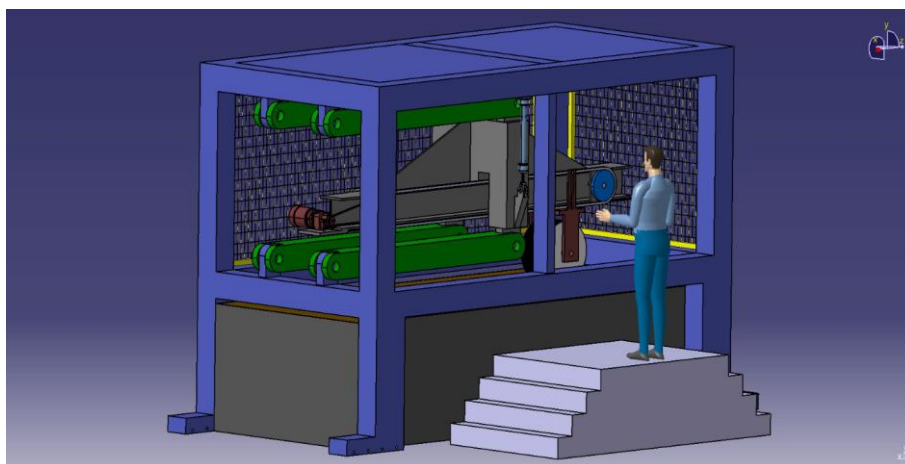


Figure 10. Schéma de principe du dispositif expérimental de la tâche 3

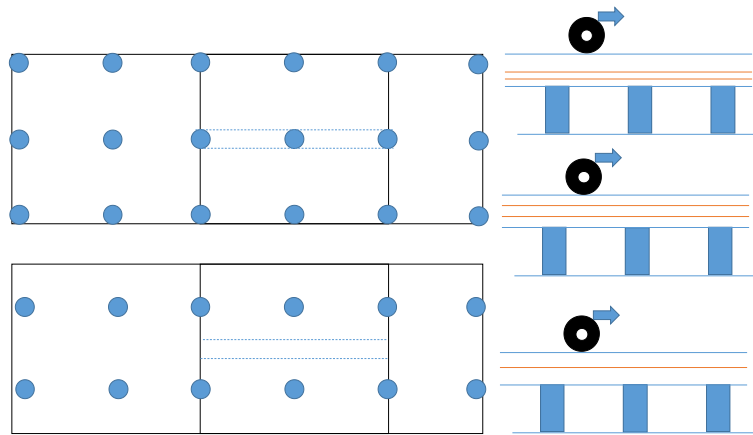


Figure 11. Essais de circulation sur dispositif expérimental de la tâche 3

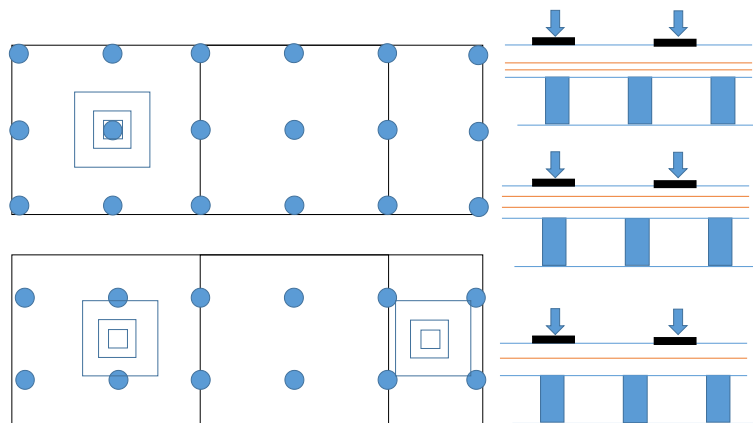


Figure 12. Essais de chargement statique sur dispositif expérimental de la tâche 3

Essais en laboratoire à petite échelle

Ces essais pourront être complétés par des essais sur un dispositif expérimental à l'échelle 1/10^e (Figure 13). Ce dispositif a lui aussi été conçu et développé dans le cadre du LabCom PITAGOR de l'INSA de Lyon.

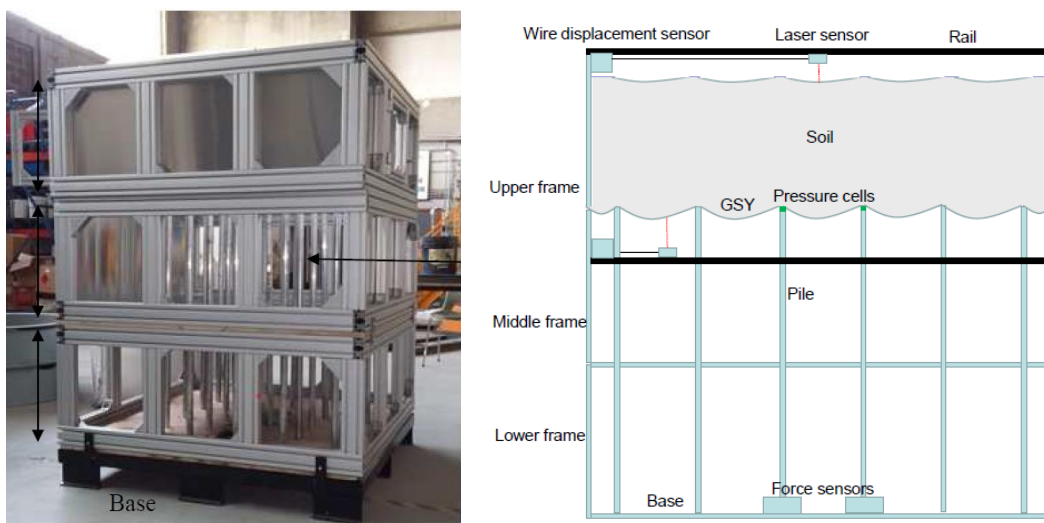


Figure 13. Dispositif expérimental à l'échelle 1/10^e de la tâche 3

Il est constitué de 36 inclusions rigides inscrites dans un maillage carré. Le sol compressible est modélisé par une mousse de compressibilité adaptée. Il permet d'analyser qualitativement la

distribution des transferts de charges, étudier l'influence des chargements cycliques sur cette distribution.

Essais à la centrifugeuse

Le nombre et la position des géosynthétiques dans la PTC granulaire fera l'objet d'une campagne expérimentale en centrifugeuse. En utilisant le dispositif d'essais dit du « Plateau Mobile », développé dans le cadre du PN ASIRI (Figure 4).

Les paramètres de l'étude seront : la hauteur de la PTC, l'intensité de la surcharge, la position et le nombre de géosynthétiques, la présence ou non de dalle. Les résultats seront interprétés en efficacité, tassement différentiel et déformation dans les géosynthétiques.

Par ailleurs, une étude paramétrique sera menée en centrifugeuse à l'aide du robot téléopérateur 4 axes X,Y,Z, θ_x (Gaudicheau et al. 2014) pour prendre en compte les sollicitations de circulation. Cela nécessitera le développement d'un outil spécifique (Figure 14) : une roue en modèle réduit, correspondant à une configuration typique d'un chargement roulant. Le modèle réduit sol-IR-remblai renforcé par GSY ou PTC en sol traité étant préalablement construit et instrumenté, avec des matériaux naturels ou analogiques. L'étude paramétrique portera sur la nature de la PTC, la présence ou non de GSY, le mouvement Aller, Aller-Retour, ou aléatoire dans le plan horizontal. Le cas du chargement hydraulique ultime de type inondation pourra être également abordé.

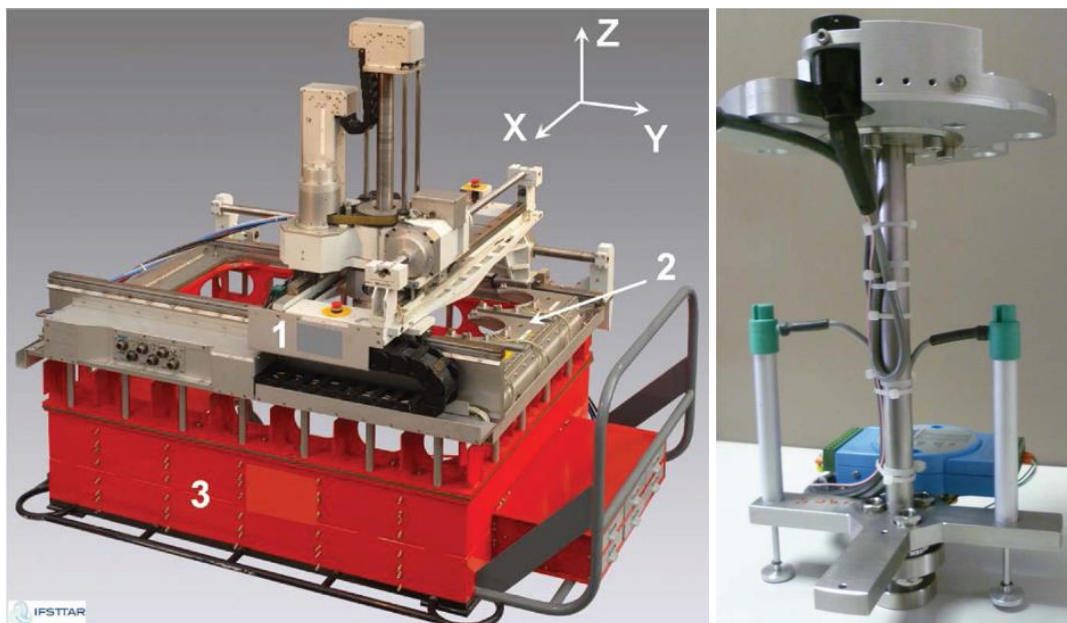


Figure 14. Robot téléopérateur de l'IFSTAR et exemple d'outil instrumenté

Le tableau 6 détaille les actions à mener dans le cadre de la tâche 3.

Tableau 6. Description des actions à mener dans le cadre de la tâche 3

Actions	Intitulé	Personnel	Matériel	Fonctionnement	Partenaire	Coût PN	
3.1	Mise à disposition des appareillages			55	GEOMAS	5	
3.2	Fourniture et Installation du sol analogique			10	GEOMAS	10	
3.3	Réalisation et Installation des IR			1	GEOMAS	1	
3.4	Approvisionnement et mise en œuvre des matelas granulaire			3	GEOMAS	3	
3.5	Approvisionnement et mise en place des renforcements horizontaux				Prd GSY	-	
3.6	Fourniture, mise en place et suivi de l'instrumentation	30	20	2	GEOMAS	22	
3.7	Réalisation et analyse des essais de trafic et de chargement	30 + 70			GEOMAS + CIFRE		
3.8	Essais labo de caractérisation du sol du matelas	5			GEOMAS	-	
3.9	Essais sur maquettes 1/10 ^e	3				-	
3.10	Maquette et instrumentation en centrifugeuse (outil charge roulante)	30		20	IFSTTAR	20	
3.11	Fonctionnement (consommables)		5		IFSTTAR	5	
3.12	Mise à disposition de la centrifugeuse et du robot téléopérateur = Essais	55		240	IFSTTAR + CIFRE	-	
3.13	Pilotage de la Tache 3	Essais laboratoires	10		2	GEOMAS	2
		Essais centrifugeuses	10		2	IFSTTAR	2
Total			592 k€			70 k€	

Tâche 4 : Semelles sur inclusions rigides

Expérimentations en vraie grandeur

Le renforcement de semelle par inclusions rigides sans plateforme de transfert de charge est une technique qui est proposée par certaines entreprises bien qu'elle n'entre pas dans le cadre des renforcements proposés par le PN ASIRI ; des cahiers des charges particuliers ont d'ailleurs dû être établis par ces entreprises pour diffuser cette technique. Afin de proposer une règle commune, il a été décidé de traiter ce cas spécifique dans le projet ASIRI+.

Trois semelles carrées seront disposées sur un maillage de quatre inclusions rigides. La première semelle est directement posée sur les quatre inclusions ; pour la deuxième, on installe un lit de sable de 5 cm d'épaisseur sur les inclusions rigides ; pour la troisième, on dispose un matelas granulaire de 50 cm d'épaisseur. Les trois semelles seront soumises à des chargements verticaux centrés, excentrés et horizontaux (Figure 15). Des chargements horizontaux et verticaux combinés permettront de simuler des efforts inclinés sur la semelle. Cet essai répondra donc aux problèmes soulevés dans la troisième partie de l'axe 1 (semelle sur IR) mais aussi à l'axe 2 (chargement inclinés). Un essai de chargement statique sera mené sur une inclusion isolée pour définir précisément l'interaction entre le sol et l'inclusion.

L'instrumentation consiste à mesurer la charge sur chaque inclusion rigide et le tassement de chaque semelle pour les chargements verticaux. Pour les essais de chargements horizontaux, les déplacements et la verticalité des inclusions seront contrôlés.

L'objectif de cet essai est, pour chaque cas de chargement, de montrer quelle configuration est la plus adaptée.

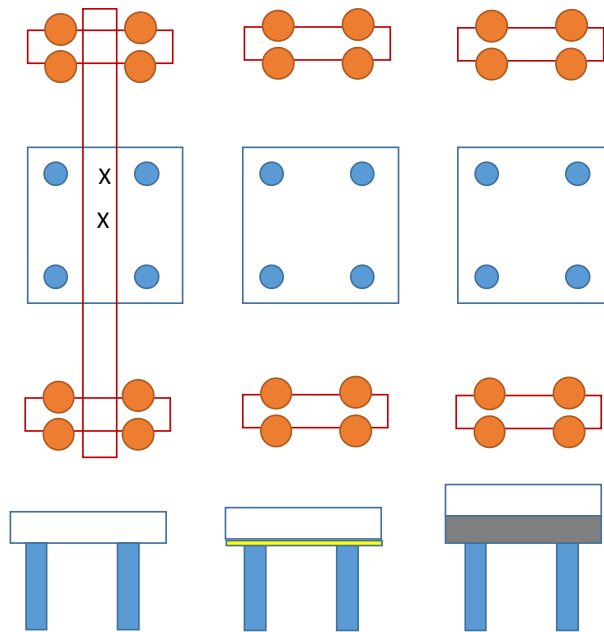


Figure 15. Dispositif expérimental de la tâche 4

Essais à la centrifugeuse

Le dispositif expérimental pourra s'inspirer des essais déjà réalisés en centrifugeuse (Rault et al. 2018 ou Blanc et al. 2014) avec des inclusions rigides instrumentées en tête mais rotulées en pied (en vue de chargements non verticaux) : essais combinés V, H, V-H, swipe tests.

Dans tous les cas, la modélisation physique doit être couplée avec une modélisation numérique.

Tableau 7. Description des actions à mener dans le cadre de la tâche 4

Actions	Intitulé	Personnel	Matériel	Fonctionnement	Partenaire	Coût PN
4.1	Mise à disposition du site expérimental et travaux spéciaux	2	9		Entreprise	-
4.2	Réalisation des IR (3 x 4) + un plot pour chargement statique + pieux pour massifs de réaction	4	16		Entreprise	10
4.3	Essais in situ de caractérisation du sol (Pressio, pénétro + 2 sondages carottés)*			20	PN	20
4.4	Approvisionnement et mise en œuvre du matelas granulaire			8	PN	8
4.5	Essais labo de caractérisation du sol	3		1	GEOMAS	1
4.6	Fourniture, mise en place et suivi de l'instrumentation des 3 plots	44		5	GEOMAS	5
4.7	Essais de chargement statique : approvisionnement et mise en place et immobilisation de la poutre de réaction	3	6		Entreprise	6
4.8	Essais de chargement statique : instrumentation		41	1	GEOMAS	42
4.9	Essais de chargement statique : essais sur éprouvettes de béton	2		1	GEOMAS	1
4.10	MoE chantier				Entreprise	
4.11	Réalisation des semelles + approvisionnement béton			6	Entreprise	6
4.12	Approvisionnement du béton pour les IR			5	PN	5
4.13	Maquette et instrumentation en centrifugeuse	30	10	5	IFSTTAR	15
4.14	Fonctionnement (consommables)			5	IFSTTAR	5
4.15	Mise à disposition de la centrifugeuse + essais	110		150	IFSTTAR + CIFRE	
4.16	Pilotage de la Tâche 4	Essais in situ	5	1	Entreprise	1

		Essais centrifugeuse	10		5	IFSTTAR	5
Total			508 k€				130 k€

Concernant la caractérisation des sols compressibles, le CPT est plus adapté pour les sols compressibles. Cependant, nous souhaitons aussi réaliser des essais pressiométriques pour le prouver sur des cas concrets car la profession utilise l'essai pressiométrique très fréquemment même dans des sols qui ne s'y prêtent pas. L'essai pressiométrique demeure cependant l'outil essentiel pour caractériser la couche d'ancrage des inclusions (sous le sol compressible), couche qui peut provoquer un refus des CPT.

Tâche 5 : Eolienne sur inclusions rigides

Contexte

Le renforcement des sols par inclusions rigides est une méthode qui est en plein essor dans le domaine de l'éolien car elle permet de gommer les hétérogénéités du sol et de transférer les efforts vers des sols plus porteurs. Le sol de fondation est soumis à un chargement répété avec des concentrations de contrainte sous la partie de la semelle comprimée. Ces mécanismes de transfert de charge sont complexes et méritent des investigations spécifiques pour améliorer la connaissance et optimiser les renforcements de sol sous éolienne.

Un projet FUI déposé en février 2018 par la société Antea Group en partenariat avec le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon, les sociétés Ménard, Parex, Nordex et CTE wind a été validé et bénéficie d'un financement. Il a débuté en septembre 2018 pour une durée de quatre ans. Ce projet dont l'acronyme est FEDRE (Fondations d'Eoliennes Durables et REpowering) a pour objectif d'améliorer la compétitivité de la filière en optimisant les fondations des éoliennes et d'améliorer l'intégration de l'éolien dans le paysage énergétique français. Plusieurs pistes d'optimisation sont à ce stade envisagées pour les fondations existantes lors des phases de repowering mais également pour les nouvelles fondations pour lesquelles une conception évolutive doit être envisagée. La technique d'amélioration des sols par inclusions rigides a été privilégiée dans ce projet car c'est la seule qui permet de faire évoluer les fondations en phase de repowering lorsque l'éolienne existante est remplacée par une plus puissante.

L'ensemble des résultats expérimentaux et numériques du projet FEDRE concernant le sol de fondation renforcé par inclusions rigides seront reversés en don en nature au projet national ASIRI+ par Antea Group, Ménard et le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon en accord avec les autres partenaires du projet FEDRE.

Expérimentations

Il est prévu dans ce projet d'instrumenter au printemps 2019 les fondations d'une éolienne et d'enregistrer les mesures pendant une durée significative (1 an) pour observer et analyser les transferts de charge du mât vers le sol de fondation. Ce démonstrateur permettra de mesurer précisément les sollicitations transmises du mât de l'éolienne vers le sol de fondation. Les modélisations physiques en laboratoire des mécanismes de transfert de charge et les modélisations numériques seront calibrées à partir des résultats de mesures du démonstrateur.

Le sol sera caractérisé par des essais in situ (pénétrömètre statique et pressiomètre) permettant d'identifier son homogénéité et guidant le choix de l'éolienne à instrumenter. Des essais en laboratoire (identification, compressibilité et cisaillement) seront effectués sur des carottes de sol prélevées à l'emplacement choisi. Des échantillons seront réservés pour des essais de fatigue sous sollicitations cycliques. Le béton des inclusions rigides sera aussi caractérisé par les essais classiques d'identification et de résistance. Ces caractéristiques devront être suffisamment définies pour que des éprouvettes identiques soient réalisées en laboratoire pour les modélisations physiques. Le matériau constituant la plateforme granulaire entre les inclusions et la base de la semelle sera caractérisé en laboratoire

(identification, cisaillement) et des essais de compactage seront réalisés in situ avant la construction de la semelle.

Les inclusions rigides refoulantes seront exécutées par Ménard qui exécutera aussi des inclusions rigides en dehors de l'emprise de l'éolienne pour effectuer des essais de chargement statique (L'amélioration des sols pour les fondations d'éoliennes se fait très couramment par des tarières refoulantes ou vibrofoncées pour éviter la gestion des terres extraites).

Modélisation numérique

En matière de modélisation des interactions sol – structure (ISS), trois approches seront dès lors mises en œuvre.

- Modélisations numériques discrètes tridimensionnelles (continue ou discrète)
- Modélisation par macro-éléments

Tout d'abord, deux types de modélisations pourront être envisagés et confrontés : l'une avec des modèles continus, l'autre par des modèles discrets. Les modélisations numériques discrètes tridimensionnelles permettent de prendre en compte toute la complexité de l'interaction sol/structure. Un modèle de comportement permettant de reproduire l'effet des cycles peut lors être mis en œuvre. Ces derniers présentent l'avantage d'intégrer naturellement les effets cycliques de chargement/déchargement au sein du matelas de transfert de charge mais ont l'inconvénient d'être prohibitifs en termes de temps de calcul pour des nombres de cycles importants. Le modèle discret sera utilisé principalement pour appréhender l'effet des premiers cycles de chargement sur les mécanismes de report de charge.

Par ailleurs, l'utilisation de macro-éléments à des fins de conception est une alternative aux méthodes de type Eléments Finis ou discrètes en 3D, coûteuses en temps de calcul, et aux méthodes traditionnelles (courbes t-z ou p-y), qui ne prennent pas en compte le couplage (V, H, M).

Toutes ces modélisations seront confrontées aux résultats expérimentaux des modèles physiques des tâches précédentes et permettront d'alimenter les modèles de type « macro-élément ».

Les macro-éléments, construits à l'origine pour traiter le problème des fondations superficielles sous sollicitations cycliques et sismiques, sont capables de reproduire le comportement non linéaire d'un ensemble sol – structure, grâce à un modèle constitutif écrit en loi de fonctionnement (effort / déplacement), dans les cadres rigoureux de la plasticité ou de l'hypo-plasticité. Par ailleurs, ils permettent de prendre en compte le caractère dynamique de la sollicitation par une évaluation de l'impédance de la fondation (fonction de la fréquence de la sollicitation) et de l'amortissement radiatif (provenant d'une perte d'énergie due à la propagation des ondes issues de la vibration de la fondation dans un sol semi infini). L'intérêt du macro-élément réside dans sa simplicité d'utilisation et surtout dans le faible cout de calcul généré (même pour des sollicitations dans l'espace y compris la torsion), permettant de faire des calculs rapides et des études paramétriques très utiles dans les dimensionnements. Son cadre global (liant torseur d'effort avec torseur de déplacement) est également en totale adéquation avec la philosophie utilisée dans les réglementations sur le comportement des fondations sous sollicitations latérales sismiques (EC8-5). Le macro-élément offre ainsi un cadre conceptuel idéal au dimensionnement des fondations. L'adaptation des modèles existants devra se faire pour les inclusions rigides sous charges cycliques dans le cadre du présent projet, en tenant compte des impédances dynamiques, de l'amortissement radiatif et des sollicitations de torsion. Il conviendra aussi d'y incorporer la description de l'interaction sol – inclusion sous charges cycliques, d'améliorer la réponse du macro-élément lorsque le pieu est en extension (sous chargement monotone puis cyclique), enfin d'étendre le macro-élément au cas des pieux rigides. Enfin, le calibrage

de ce macro-élément nécessitera un retour à des essais et l'utilisation d'essais monotones pour le calage des capacités portantes.

Des codes numériques commerciaux (Plaxis, Flac) seront utilisés et leurs résultats comparés aux codes « de recherche » plus élaborés. L'objectif de de cette sous-tâche est de vérifier les possibilités de transfert vers l'ingénierie

Tâche 6 : Comportement du massif de sol renforcé par inclusions rigides sous sollicitations dynamiques

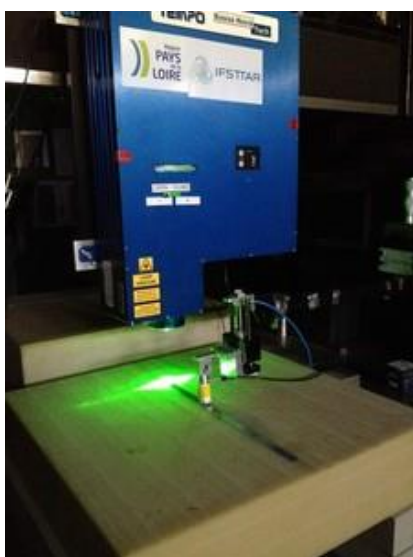
Les études menées dans les tâches 6 et 7 feront l'objet d'une demande de financement ANR portée par l'IFSTTAR de Nantes et en collaboration avec certains partenaires du PN ASIRI+ (EDF, Terrasol, SNCF...)

La question traitée ici est relative aux vitesses de propagation des ondes sismiques de surface dans des milieux hétérogènes structurés. L'application principale concerne la circulation de trains à grande vitesse sur des voies ferrées installées sur des remblais sur inclusions rigides.

Les inclusions rigides installées dans le sol compressible « transforment », vu de loin, les propriétés du sol compressible, devenu un sol renforcé. Comment les vitesses de propagation des ondes (essentiellement les ondes de Rayleigh) sont-elles modifiées par la présence de ces inclusions ?

Si la géométrie a un caractère périodique dans l'axe longitudinal de la voie (des centaines d'inclusions dans cette direction), il n'en est rien dans le sens transversal. De plus des effets de bord, induisant des réflexions supplémentaires et complexes, sont attendus.

Pour traiter cette question en s'appuyant sur des données expérimentales (bien entendu couplées avec une analyse numérique spécifique), il est proposé d'utiliser l'approche de modélisation physique de la propagation des ondes sur modèle réduit, à l'aide du dispositif expérimental de l'IFSTTAR MUSC (Mesure Ultrasonore Sans Contact) (Figure 16). Le principe est de réduire les longueurs d'onde d'intérêt selon le même ratio que la taille du modèle réduit par rapport au prototype en vraie grandeur. De la sorte, une maquette pluridécimétrique d'un sol renforcé par inclusions rigides peut être mise à l'échelle, mais uniquement du point de vue des vitesses de propagation des ondes sismiques de surface, le contraste entre inclusions rigides et sol étant respecté. La sollicitation est appliquée en surface de la maquette (nature de la sollicitation à définir selon l'énergie), et les mesures, depuis la surface également, sont enregistrées sans contact par interférométrie laser.



Le banc MUSC se compose :

- *d'une table optique,*
- *d'un dispositif qui permet le déplacement sur une surface de 1 m² (incrément minimum 100 μm, précision 10 μm) d'un interféromètre laser (le récepteur) suivant deux axes,*
- *d'une source piézoélectrique suivant un axe (incrément minimum 1 mm, précision 100 μm),*
- *d'une électronique de pilotage (déplacement des 3 axes, génération et acquisition des signaux).*

Figure 16. Banc MUSC (Mesures Ultrasonores Sans Contact) de l'IFSTTAR

Sur cette base, une étude expérimentale sur un modèle réduit constitué d'une résine (pour simuler le sol compressible) et de métal (pour les inclusions rigides) peut être réalisée. La géométrie de la largeur du sol renforcé sous la voie ferrée peut être respectée, tandis que dans le sens longitudinal sera considérée une zone renforcée uniquement dans la partie centrale de la maquette, de telle sorte que cette zone renforcée puisse être considérée comme un élément « homogène », différente en propriétés des zones de « sol non renforcé » aux extrémités. Les paramètres concerneront :

- maquette de « sol non renforcé » vs maquette de « sol renforcé »
- plusieurs géométries de « sol renforcé », e.g faible α et fort α
- maquette surmontée d'un élément de « remblai » pour étudier l'effet des terrains adjacents sur la propagation de l'énergie dans le modèle

Ces expérimentations seront couplées à une simulation numérique élaborée, car concernant la propagation des ondes en milieu hétérogène tridimensionnel fini. Cette modélisation numérique sera traitée dans la tâche 8.3.

Tableau 8. Description des actions à mener dans le cadre de la tâche 6

Actions	Intitulé	Personnel	Matériel	Fonctionnement	Partenaire
6.1	Réalisation de maquettes pour banc MUSC	30	25		IFSTTAR
6.2	Fonctionnement, capteurs, consommables			15	IFSTTAR
6.3	Mise à disposition du banc MUSC			60	IFSTTAR
6.4	Pilotage, suivi, réunions, déplacements	60		10	IFSTTAR
6.5	Post-Doc 18 mois. Ondes de surface en milieu hétérogène à inclusions verticales : modélisations physique et numérique	70			IFSTTAR
Total			270 k€		

Tâche 7 : Comportement du massif de sol renforcé par inclusions rigides sous sollicitations sismiques

Le domaine des sollicitations sismiques est assez vaste, et peu de données sont disponibles pour les fondations composites que constituent les sols compressibles renforcés par inclusions rigides. Aussi la démarche adoptée ici est de s'intéresser aux interactions cinématique et inertielle sous sollicitation sismique contrôlée. Pour ce faire, sera utilisé le simulateur de séismes (Figure 17) embarqué dans la centrifugeuse géotechnique de l'Ifsttar. Ce simulateur permet de réaliser à échelle réduite des sollicitations horizontales unidirectionnelles (ondes V_{SH}) monofréquentielles (sinus) ou multifréquentielles (séisme).

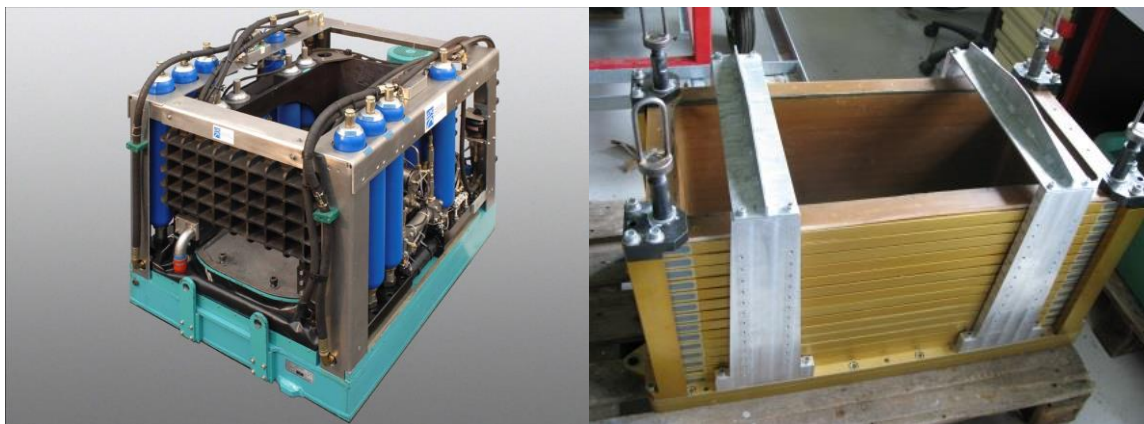


Figure 17. Simulateur de séismes 1D de l'Ifsttar et conteneur flexible (Equivalent Shear box)

Chaque modèle réduit sera instrumenté (accéléromètres, capteurs de pression interstitielle, déplacement sans contact, bender elements,...) et configuré de façon à pouvoir étudier 1) le comportement en champ libre ; 2) la réponse du sol renforcé sans superstructure ; 3) la réponse du sol avec une superstructure (e.g. une fondation de bâtiment).

Ces expérimentations seront couplées à des simulations numériques développées dans la tâche 8.4.

Tableau 9. Description des actions à mener dans le cadre de la tâche 7

Actions	Intitulé	Personnel	Matériel	Fonctionnement	Partenaire
7.1	Réalisation de maquettes pour la centrifugeuse et le simulateur de séismes embarqué	30k€	30k€		IFSTTAR
7.2	Fonctionnement, capteurs, consommables			20k€	IFSTTAR
7.3	Mise à disposition de la centrifugeuse			180 k€	IFSTTAR
7.4	Pilotage, suivi, réunions, déplacements	60k€		10k€	IFSTTAR
7.5	Post-Doc 18 mois Interaction inertielle et cinématique	70 k€			IFSTTAR
Total		400 k€			

Tâche 8 : Modélisation numérique

La tâche 8 « modélisation numérique » sera menée simultanément aux expérimentations en vraie grandeur et en laboratoire. Des calculs seront réalisés lors de benchmarks en utilisant les modèles existants. Ceux-ci auront comme objectif principal de tester les pratiques existantes en matière de modélisation numérique et de définir les domaines de validité et la pertinence des modèles numériques testés. Ces modèles seront enrichis grâce aux résultats des expérimentations en vraie grandeur puis appliqués à des configurations complexes. La facilité qu'ont les modèles numériques à envisager à moindre coût des études paramétriques détaillées permettra d'apporter un éclairage nouveau sur les mécanismes impliqués dans le renforcement et sur le rôle de chaque composant.

Sous-tâche 8.1 : Benchmarks

A l'occasion des différents plots expérimentaux détaillés dans les tâches 1 à 4, des benchmarks analytiques et numériques seront proposés aux membres du PN ASIRI+. Pour chaque benchmark, les paramètres géométriques et géotechniques ainsi que les chargements appliqués seront fournis par les animateurs des tâches 1 à 4. Chaque benchmark sera géré par un animateur qui aura en charge d'assurer le transfert des données d'entrée, de faire respecter le planning, de faire une synthèse et une présentation des résultats.

Sous-tâche 8.2 : Modélisation des mécanismes développés dans la PTC

Deux types de modèles numériques seront envisagés pour en tester la pertinence et pour appréhender les mécanismes de transfert de charges dans la PTC. Les modèles continus, largement utilisés en ingénierie et la méthode des éléments discrets utilisée actuellement plutôt à des fins de recherche. L'apport de chaque modèle à la compréhension des mécanismes mis en jeu dans la PTC sera analysé via des études numériques comparatives. Un soin sera apporté pour préciser dans quelle mesure les modèles testés sont capables ou non de rendre compte de la complexité du problème (concentration des efforts au niveau de la tête de pieux entre autre). Plusieurs scénarios de chargement seront envisagés (charges ponctuelles verticales ou inclinées, charges réparties uniformes ou localisées).

L'influence de la cohésion du sol, ayant un rôle de rigidification de la PTC, peut avoir un effet bénéfique sur la tenue de la plateforme en service ou négatif lorsqu'un chargement excessif est appliqué (risque de rupture brutale par exemple). Pour en vérifier l'importance ou l'influence, différents modèles numériques mettant en œuvre des sols plus ou moins cohésifs seront testés. Les mécanismes de transfert de charge et d'endommagement de la PTC lors de l'application d'une surcharge seront en

particulier étudiés aussi bien avec les modèles continus que discrets. A noter que ces derniers sont du fait de leur nature discrète particulièrement aptes à décrire des mécanismes de fissuration, de fracturation ou de rupture.

La question du rôle d'un renforcement géosynthétique dans la PTC sera également abordée. Un soin particulier sera accordé pour déterminer dans quelle mesure les modèles numériques utilisés en ingénierie sont capables ou non d'appréhender le comportement en membrane du géosynthétique. L'apport d'un renforcement par des géogrilles réparties dans le remblai comparativement à une nappe géotextile positionnée à la base du remblai sera également discuté. Pour cette étude, les modèles discrets semblent plus indiqués dans la mesure où l'on cherchera ici à modéliser l'interaction à l'échelle d'une maille élémentaire entre le renfort et le sol. L'application du modèle à l'échelle de l'ouvrage pouvant s'avérer problématique, compte tenu des temps de calcul prohibitifs que cela pourrait engendrer, on se limitera ici à reproduire et à analyser les mécanismes mis en jeu entre les grilles et le sol en s'appuyant sur des résultats expérimentaux obtenus au tomographe.

Sous-tâche 8.3 : Modélisation d'un ouvrage soumis à des sollicitations dynamiques

Les sollicitations cycliques et dynamiques requièrent des modèles numériques avancés dont les paramètres sont complexes à définir ou à déterminer. Il s'agira de tester dans un premier temps les modèles disponibles sur le marché et d'en déterminer les performances. Les modèles discrets qui ne nécessitent pas de lois de comportement spécifiques et qui intègrent naturellement les déformations irréversibles obtenues à chaque cycle par rotations ou déplacements des grains pourront également être testés. Dans ce cas, et compte tenu des temps de calcul prohibitifs qu'un nombre de cycles important pourrait engendrer, seules quelques dizaines de cycles pourront raisonnablement être envisagées. Dans le cas des sollicitations alternées, le rôle du sol compressible peut s'avérer crucial (réversibilité ou non d'une partie des déformations suite au comportement plus ou moins élastique du sol support). Un soin particulier sera donc apporté au comportement du sol support sur l'évolution des déplacements et des transferts de charge dans la PTC.

Sous-tâche 8.4 : Modélisation d'un ouvrage soumis à un séisme

L'objectif de cette sous-tâche est d'élaborer une série de modèles de référence permettant de couvrir, de façon séparée puis combinée, les principaux mécanismes mis en jeu sous séisme pour un ouvrage sur sol renforcé par inclusions rigides : effet fusible, interaction inertielle et interaction cinématique. Ces modèles devront être établis en lien avec les configurations testées en centrifugeuse, dans un objectif de validation d'une part et de généralisation d'autre part (à des configurations plus complexes).

8.4.1 Comportement du matelas

Le matelas joue le rôle de premier plan pour un ouvrage sur inclusions rigides soumis à des sollicitations sismiques. C'est le fameux effet « fusible ». Cet effet fusible « isole » l'ouvrage et limite les efforts qui transitent via le matelas entre la structure et les inclusions. On cherche à évaluer cet effet visible en examinant les aspects suivants :

- Epaisseur du matelas et espacement des inclusions ;
- Réserve de portance (en tête des inclusions) disponible immédiatement avant séisme (sous chargement permanent) ;
- Loi de comportement du matelas : élasto-plastique parfaite / élastique non-linéaire / écrouissage etc...

Afin d'isoler « l'effet fusible », les inclusions devront être ancrées dans un terrain résistant afin de « privilégier » le mécanisme de glissement/décollement vis-à-vis de celui du poinçonnement local ou

global. Les principaux paramètres à évaluer sont la distorsion dans le matelas, le déplacement irréversible post-séisme et l'effort maximal en tête des inclusions. Ces modèles permettront également d'apprécier l'effet des non-linéarités « géométriques » (décollement de l'ouvrage, par exemple). Les modèles seront excités à la base, par une série d'accélérogrammes naturels représentatifs des spectres en vigueur.

8.4.2 Interaction d'origine inertielle

Dans ces modèles, les inclusions seront explicitées par des éléments volumiques, la structure par un oscillateur équivalent (type brochette simplifiée) reposant sur un diaphragme rigide. Afin de capter exclusivement l'effet « inertiel », c'est la structure qui sera excitée dans ces modèles.

Les sollicitations induites dans les inclusions sous l'effet des forces d'inertie transmises par la structure portée dépendent de plusieurs facteurs :

- L'effort en tête (directement lié à ce qui aura été approfondi en §8.4.1) ;
- L'effet de groupe entre inclusions ;
- La distorsion du massif encaissant sous l'effet des charges transmises par la structure (à ne pas confondre par la distorsion d'origine « cinématique »).

Les paramètres à évaluer sont le spectre de réponse en déplacement avec/sans inclusions, avec/sans matelas (solution pieux), les sollicitations dans les inclusions (N, V, M), la déformée moyenne du massif (capter l'effet « $g(z)$ inertiel »). Ces modèles seront confrontés à des modèles où le sol renforcé est représenté par un massif homogénéisé équivalent.

8.4.3 Transmission des efforts d'origine « cinématique »

Afin de capter exclusivement les efforts d'origine « cinématique », la structure sera « désactivée » dans ces modèles et remplacée par une surcharge verticale équivalente non accélérée. Ces modèles seront excités à leur base.

Les paramètres à évaluer sont les sollicitations dans les inclusions (V, M), la déformée moyenne du massif (capter l'effet « $g(z)$ cinématique »). Ces modèles seront confrontés à des modèles où le sol renforcé est représenté par un massif homogénéisé équivalent.

Les paramètres à faire varier sont l'épaisseur du sol « meuble », la densité des inclusions, l'ancrage dans le « matelas » et l'ancrage dans le substratum.

Sous-tâche 8.5 : Modélisation du comportement d'une semelle sur inclusions rigides

Cette problématique a déjà fait l'objet d'un certain nombre de modélisations numériques discrètes ou continues. Il s'agira ici de confronter les résultats des modélisations numériques à ceux obtenus sur les plots expérimentaux.

L'objectif de cette sous-tâche est d'élaborer une série de modèles de référence permettant d'approfondir les aspects suivants (pour une semelle sur sol renforcé par inclusions rigides soumise à un chargement statique ou pseudo-statique combiné V, H, M) :

- Diagramme de stabilité (V, H, M) ou (V, δ , e) d'une semelle sur inclusions rigides : influence du matelas dans le domaine où le soulèvement/glisement est prépondérant, influence de la densité des inclusions dans le domaine où le poinçonnement est prépondérant / Critère de poinçonnement du matelas sous chargement incliné ;
- Effet de groupe entre inclusions et sollicitations internes ;
- Evaluation des sollicitations de flexion liées aux effets de bord pour une semelle chargée verticalement ;
- Cas d'inclusions flottantes / influence des couches profondes.

L'étude paramétrique qui sera faite devrait permettre d'expliciter les mécanismes de transfert de charge. Ces modèles ont pour vocation d'orienter la mise au point de règles simplifiées pour la justification de portance et de contribuer à clarifier la validité des modèles simplifiés développés dans ASIRI.

Synthèse

Tableau 10. Description des actions à mener dans le cadre de la tâche 8

Actions	Intitulé	Personnel	Matériel	Fonctionnement	Partenaire	Coût PN
8.	Pilotage de la Tâche 8	5		1	3SR	1
8.1	Gestion et analyse des benchmarks	7		5	Polytech Clermont	5
8.2	Modélisation des mécanismes développés dans la PTC – Apport d'un renforcement géosynthétique	72	3		3SR + Postdoc	59
8.3	Modélisation d'un ouvrage soumis à des sollicitations dynamiques	20	5		3SR + CIFRE	5
8.4	Modélisation d'un ouvrage soumis à un séisme/ Modélisation numérique continue	27	5		3SR + CIFRE	5
		20		1	Terrasol	1
8.5	Modélisation du comportement d'une semelle sur inclusions rigides	25	5		3SR + CIFRE	5
		20		1	Terrasol	1
Total		224 k€				82 k€

Tâche 9 : Valorisation et transfert vers la pratique

Sous-tâche 9.1 : Logiciels de bureau d'études (BE)

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet s'inscrivent dans un contexte d'ingénierie, afin de pallier le manque ou les limitations des outils d'ingénierie actuellement disponibles pour mieux dimensionner les ouvrages et prédire leur comportement de manière réaliste.

Les benchmarks menés dans le cadre du PN ASIRI+ mettront en évidence les limites de certains logiciels commerciaux. Les résultats des modélisations numériques calibrées sur les expérimentations du projet ASIRI+ permettront d'enrichir les outils d'ingénierie existants et d'en développer de nouveaux.

Sous-tâche 9.2 : Rédaction des recommandations

Des recommandations complémentaires aux recommandations ASIRI (2012) seront rédigées ; elles proposeront des règles de dimensionnement et de mise en œuvre dans les trois axes traités dans le projet ASIRI+. La rédaction de ces recommandations nécessitera la mobilisation de nombreux partenaires qui travailleront en groupes restreints sur les différents chapitres. On peut estimer que ce travail représente un apport en nature des participants aux groupes de rédaction de l'ordre de 100 k€ dont 20 k€ seront budgétés sur le PN ASIRI+ pour couvrir les frais organisationnels.

Sous-tâche 9.3 : Publications et communications

Les objectifs de valorisation de ce projet sont nombreux et couvriront tous les domaines abordés. En plus des recommandations, plusieurs thèses seront effectuées dans le cadre de ce projet. Ce travail collaboratif sera aussi valorisé par la publication d'articles dans des revues scientifiques et des communications à des conférences nationales et internationales. Une enveloppe de 20 k€ est approvisionnée pour prendre en charge certains déplacements à des conférences des doctorants et post-doctorants du projet.

Sous-tâche 9.4 : Site internet

Un site internet public, développé sous la responsabilité de l'Irex, présentera le projet, les partenaires et toutes les informations utiles et diffusables publiquement.

Sous-tâche 9.5 : Journées de restitution

Plusieurs journées de restitution des résultats seront proposées en fin de projet sur le modèle de ce qui a été fait pour valoriser le PN ASIRI.

Tâche 10 : Etude de l'impact environnemental

Le renforcement des sols par inclusions rigides est une technique associant différents éléments introduits dans le sol : les inclusions, la plateforme renforcée ou non par des nappes horizontales. Cette technique peut être proposée en variante à des solutions moins vertueuses vis-à-vis de l'environnement. En effet, elle présente de nombreux avantages environnementaux tels que :

- une diminution des volumes de matériaux (et de leur transport) par l'utilisation de tarières refoulantes ou vibrofoncées qui limitent les quantités de sols à évacuer,
- la participation du sol en place à la fondation de l'ouvrage, ce qui réduit la consommation de béton,
- un meilleur transfert de la charge appliquée par l'ouvrage vers les formations porteuses qui limite les risques de tassement de l'ouvrage au cours de sa vie et donc diminue les coûts de maintenance.

Un des objectifs du projet ASIRI+ sera de mettre en avant l'intérêt environnemental des solutions proposées pour les inclusions rigides et la plateforme.

La tâche 10 transverse permettra d'évaluer les aspects environnementaux liés à la solution de renforcement de sol par inclusions rigides. Cette évaluation permettra de comparer les solutions techniques en suivant la démarche d'Analyse du Cycle de Vie afin de fournir les données environnementales permettant d'évaluer les impacts environnementaux de la solution de renforcement et de son utilisation durant sa vie en incluant les matières premières nécessaires à sa construction, sa mise en œuvre, son utilisation et son élimination le cas échéant. Le principe général est défini par les normes NF EN ISO 14040 (2006) et NF EN ISO 14044 (2006) et la liste des indicateurs environnementaux repris pour partie de la norme NF EN 15 804.

Selon le type d'ouvrage renforcé, cette Analyse du Cycle de Vie sera limitée à la livraison du chantier lorsqu'il n'est pas possible de s'engager sur la fréquence des séquences d'entretien et de la démolition de l'ouvrage en fin de vie, on parle dans ce cas d'une analyse de vie partielle. Pour certains ouvrages tels que les éoliennes sur inclusions rigides qui seront étudiées dans le cadre du projet FUI FEDRE, l'Analyse du Cycle de Vie sera complète puisque la technique de renforcement de sol a un impact direct sur la maintenance de l'ouvrage et sa réutilisation lors des phases de « repowering ».

Les moyens pour évaluer les aspects environnementaux de la solution « inclusions rigides » existent déjà puisqu'ils ont été développés pour les différents éléments constituant ce renforcement de sol. Par exemple, il existe des études qui permettent d'évaluer la consommation énergétique égale à 1525 MJ et les émissions des gaz à effets de serre (193 kg eq CO₂) pour produire 1 m³ de béton. Le transport et la mise en œuvre du béton dans les inclusions rigides peuvent aussi être évalués avec quelques hypothèses sur la distance entre la centrale à béton et le chantier. En général ils représentent un faible impact sur l'environnement car les distances

entre les centres de production et les chantiers sont souvent inférieures à 20 km et les moyens de mise en place sont peu consommateurs en énergie et émettent peu de gaz à effet de serre. D'autres études permettent d'évaluer le coût énergétique et l'émission de gaz à effet de serre pour le transport et la mise en place de la plateforme granulaire ou de la plateforme en sol traité, de leur renforcement par des nappes horizontales.

Nous disposons donc de quasiment tous les éléments pour proposer systématiquement une étude d'Analyse du Cycle de Vie et estimer l'impact du renforcement des sols par inclusions rigides en comparaison à d'autres méthodes et aussi pour évaluer l'intérêt environnemental des solutions optimisées proposées dans les recommandations ASIRI+. En effet, l'étude du comportement de la plateforme de transfert de charge qui sera menée dans l'Axe 1 du projet permettra de proposer :

- des solutions de renforcements horizontaux qui diminueront les épaisseurs des plateformes (donc le volume de matériau granulaire), limiteront le ferrailage des inclusions sous talus pour les remblais ou encore remplaceront les treillis soudés par des nappes géosynthétiques,
- des solutions de renforcement optimisées qui diminueront le nombre d'inclusions et donc le volume de béton,
- des solutions de plateformes traitées au liant hydraulique diminuant l'approvisionnement en matériaux granulaires naturels,
- des solutions de plateformes constituées de matériaux recyclés supprimant les volumes de matériaux granulaires naturels à approvisionner pour une économie circulaire de cette technique,
- des solutions de fondations évolutives pour assurer les phases de « repowering » des éoliennes,
- des solutions de semelles sur inclusions rigides sans plateforme de transfert de charge supprimant les volumes de matériaux granulaires à approvisionner.

Pour mettre en place ces évaluations en utilisant un outil de calcul de l'Analyse du Cycle de Vie, nous nous appuierons sur l'expertise de certains partenaires du PN ASIRI+. Citons par exemple l'équipe Matériaux de l'IFSTTAR qui a développé le logiciel ECORCE2, un éco-comparateur qui permet de fournir des données d'inventaire de cycles de vie et des résultats d'indicateurs environnementaux pour la réalisation de travaux routiers, le CEREMA ou encore certains bureaux d'études tels que EGIS ou Antea Group qui disposent de cette expertise en interne.

Les objectifs d'établir des solutions de renforcement de sol optimisées ne sont pas en contradiction avec des objectifs environnementaux puisque toute diminution d'apport de matériaux induit une diminution de consommation d'énergie et de production de gaz à effet de serre.

Tâche 11 : Pilotage et gestion du projet

11.1 : Comité Directeur

Le Comité directeur du Projet, constitué d'un représentant de chacun des partenaires, a pour mission de veiller au bon déroulement du projet. Il détient la totalité des pouvoirs de décision concernant le déroulement du projet, notamment :

- statuer sur les décisions techniques,
- décider de l'éviction ou du remplacement d'un partenaire en cas de manquement grave ou de défaillance de celui-ci,
- d'examiner la candidature d'un nouveau partenaire,

- de suivre le déroulement des travaux et de veiller au respect du calendrier d'exécution,
- de donner des avis sur d'éventuels points de désaccord entre les partenaires,
- de proposer aux partenaires des modifications éventuelles qui interviendraient dans la répartition des parts de projet,
- d'initialiser et de faire évoluer les listes de connaissances antérieures et nouvelles propres,
- de régler, si possible à l'amiable, les différends susceptibles de voir le jour entre les partenaires à l'occasion de l'exécution du programme de recherche.
- de définir les tranches budgétaires et de valider les états des dépenses,

Le comité directeur est animé par un Président qui est nommé lors de l'assemblée constitutive. Les attributions du comité directeur sont définies dans la charte d'adhésion du projet ASIRI+.

11.2 : Comité de pilotage

Pour le suivi plus opérationnel, un comité de pilotage est mis en place auquel participent le président, deux directeurs scientifiques et techniques et les responsables de tâches. Ce comité de pilotage rendra compte de l'avancement des travaux au comité directeur. Le comité de pilotage coordonne le projet et veille à la cohérence des travaux. Il a pour missions entre autres de :

- définir avec précision les actions de recherche à entreprendre dans le cadre du Projet, qui sont ensuite approuvées par le Comité de direction ;
- organiser, avec les responsables de tâches, la réalisation des actions de recherche ;
- assurer une coordination et la circulation de l'information entre les différentes tâches.

Les directeurs scientifiques et techniques sont : Laurent Briançon (INSA Lyon) et Luc Thorel (IFSTTAR).

La structure du projet en tâches de travaux permettra de suivre efficacement l'avancement technique du projet. Le responsable de chaque tâche est en charge de s'assurer de la cohérence technique de la tâche. Une enveloppe de 20 k€ est budgétée pour couvrir les frais de ce comité de pilotage.

Comme il est prévu que les résultats du projets FEDRE soient apportés en apports en nature au PN ASIRI+, le responsable de la tâche 5 sera le directeur du projet FEDRE, Eric Antoinet (Antea Group).

De même il est prévu qu'un projet ANR soit déposé sur la partie sollicitations dynamiques et sismiques, les responsables des lots 6 et 7 seront désignés parmi les porteurs de ce projet ANR.

Tableau 11 – Responsables des tâches

Taches	Responsables	
1	CEREMA – INSA de Lyon	
2.1	Entreprise IR	
2.2	Entreprise IR	
3	INSA de Lyon	
4.1	Entreprise IR	
4.2	IFSTTAR	
5	Antea Group - Ménard (FEDRE)	
6	IFSTTAR (ANR)	
7		
8	3SR	
	8.1	Université Clermont Auvergne
	8.2	3SR
	8.3	IFSTTAR
	8.4	Terrasol
	8.5	Terrasol
9	Bruno Simon	

11.3 : Organisation du travail

Une première journée de travail réunira tous les participants du projet pour fixer les objectifs de chacun, présenter les responsables de chaque tâche, créer les liens nécessaires à la bonne réalisation d'un projet collaboratif, définir les groupes de travail et les interactions entre chaque tâche.

Tous les documents du projet (Planning, budget, livrables, Odj et CR des réunions) seront mis en ligne sur un espace collaboratif sécurisé accessible uniquement aux partenaires du projet. La partie publique du site internet, développé sous la responsabilité de l'Irex, présentera le projet et les partenaires.

Chaque thèse bénéficiera d'un comité de suivi impliquant les partenaires du projet impliqués spécifiquement sur le sujet traité.

11.4 : Doctorants et Post-Doctorants

Pour mener à bien ce projet national, plusieurs thèses seront nécessaires. Le tableau 12 présente le besoin en doctorants et en post-doctorants. Les entreprises susceptibles de proposer une bourse CIFRE pour les 6 doctorants prévus pour ce projet seront identifiées dès le début du projet. Un post-doc sera financé directement par le projet ASIRI+.

Tableau 12 – Doctorant et post-doctorant

Sujet	Tâche	Encadrement	Besoin
Mécanismes de transfert de charge dans une plateforme sur inclusions rigides – Approches expérimentales et numériques	1 / 8.1 / 8.2 / 9.1	3SR - GEOMAS	Doctorant CIFRE
Renforcement horizontal de la PTC par géosynthétique : modélisation physique en centrifugeuse et numérique	1 / 3 / 8.1 / 8.2 / 9.1	IFSTTAR	Doctorant CIFRE
Modélisation discrète des mécanismes développés dans la PTC – Apport d'un renforcement géosynthétique	8.2 / 9.1	3SR	Post-Doc ASIRI+
Caractérisation mécanique et physico-chimique de la PTC en sol traité au laboratoire	1 / 8.1 / 8.2 / 9.1 / 10	IFSTTAR	Doctorant CIFRE
Effet d'une charge roulante sur une fondation composite « inclusions rigides » : essais en vraie grandeur et en centrifugeuse	3 - 8.2 - 9.1	GEOMAS 3SR	Doctorant CIFRE
Modélisations physique et numérique des mécanismes de transfert de charge sous une semelle d'éolienne fondée sur inclusions rigides	5 / 10	FEDRE	Doctorant CIFRE (Ménard)
Comportement d'une semelle sur inclusions rigides : essais in situ, modélisation physique et numérique	4 / 8.5 / 9.1	IFSTTAR	Doctorant CIFRE
Vitesse de propagation des ondes dans un sol compressible renforcé par IR	6	IFSTTAR	Post-Doc - ANR
Interaction cinématique et inertielle d'une fondation composite « Inclusions rigides » sous sollicitations sismiques	7	IFSTTAR	Post-Doc - ANR
Modélisation des ouvrages soumis à des sollicitations dynamiques et sismiques	8.3 - 8.4 - 9.1	3SR	Doctorant CIFRE

Des besoins en étudiants ont aussi été identifiés. Une enveloppe de 30 k€ dédiée au financement des stages de master et des PFE est prévue dans le projet.

11.5 : Planning

L'assemblée constituante sera organisée en début d'année 2019 si le projet est labellisé « projet national » par le comité d'orientation du réseau RAGC (recherche appliquée en génie civil) qui se réunit le 21 novembre 2018. La durée du projet a été fixée à 4 ans. Un planning prévisionnel a été établi (Tableau 13). Pour les tâches 2 et 4 dont la réalisation dépend des opportunités de chantier, une période a été déterminée pour essayer de trouver des sites qui se prêtent aux expérimentations définies et des maîtres d'ouvrages susceptibles de les accueillir.

Le projet FUI FEDRE a débuté en septembre 2018 et l'instrumentation des fondations de l'éolienne prévue dans ce projet se fera en mars 2019 et durera une année. Les résultats du projet FEDRE pourront donc être apportés au projet ASIRI+ en fin d'année 2020. Le projet ANR qui regroupera les tâches 6 et 7 débutera début 2020. Les campagnes d'essais seront réalisées dès le début de ce projet pour apporter des résultats au PN ASIRI+ à l'horizon 2021.

La dernière année du projet sera consacrée au transfert vers l'ingénierie et la finalisation des recommandations.

Tableau 13 – Planning prévisionnel

Tâches	2019	2020	2021	2022
1	Essais en vraie grandeur			
	Essais Centrifugeuse			
2	Selon opportunité d'un chantier (2 mois)			
3	Essais en laboratoire			
	Essais Centrifugeuse			
4	Selon opportunité d'un chantier (3 mois)			
	Essais en vraie grandeur			
	Essais Centrifugeuse			
5	FEDRE			
6	ANR			
7	ANR			
8	8,1			
	8,2			
	8,3			
	8,4			
	8,5			
9	9,1			
	9,2			

11.6 : Livrables

Le tableau 14 présente le détail des livrables prévus pour ce projet. Pour chaque livrable, ce tableau donne le nom du responsable.

Tableau 14 – Tableau des livrables

Tache	Livrable	Responsables
1	Expérimentations en vraie grandeur – Présentation et analyse des résultats	CEREMA - GEOMAS
	Essais de caractérisation du sol traité	IFSTTAR
	Essais à la centrifugeuse avec le plateau mobile – Synthèse des résultats	IFSTTAR
2.1	Analyse de l'influence du recépage	GEOMAS
2.2	Etude des déplacements horizontaux sous un talus d'un remblai sur inclusions rigides	GEOMAS
3	Essais de circulation sur une plateforme sur inclusions rigides	GEOMAS
	Modélisation physique en laboratoire des mécanismes de transfert de charge d'une une plateforme granulaire sur inclusions rigides	GEOMAS
	Essais à la centrifugeuse	IFSTTAR
4.1	Etude de l'influence de l'épaisseur d'une plateforme granulaire sous une semelle sur inclusions rigides	GEOMAS
4.2	Modélisation physique à la centrifugeuse de chargements d'une semelle sur inclusions rigides	IFSTTAR

5	Etude de fondations d'éoliennes sur inclusions rigides	ANTEA GROUP - MENARD
6 & 7	PROJET ANR	IFSTTAR
8.1	Résultats du Benchmark sur les plots expérimentaux de la tâche 1	Bastien Chevalier Université Clermont Auvergne
	Résultats du Benchmark sur l'ouvrage de la tâche 2.1	
	Résultats du Benchmark sur l'ouvrage de la tâche 2.2	
	Résultats du Benchmark sur le plot expérimental de la tâche 4.1	ANTEA GROUP
8.2	Résultats du Benchmark sur l'ouvrage de la tâche 5	3SR
8.2	Modélisation FEM et DEM du comportement d'une plateforme granulaire renforcée sur inclusions rigides	IFSTTAR
8.3	Prise en compte des sollicitations dynamiques sur le dimensionnement du renforcement des sols par inclusions rigides par des modèles numériques	Terrasol
8.4	Prise en compte des sollicitations dynamiques sur le dimensionnement du renforcement des sols par inclusions rigides par des modèles numériques	Terrasol
8.5	Modélisation du comportement d'une semelle sur inclusions rigides	BE
9.1	Prise en compte des résultats du PN ASIRI+ dans les logiciels commerciaux	Bruno Simon
9.2	Recommandations ASIRI+	A définir
10	ACV	

11.7 : Budget et plan de financement

Le budget prévisionnel du projet est synthétisé dans le tableau 15 :

- le budget global est le coût total de la recherche ;
- la « part PN » représente le financement qui sera accordé aux partenaires réalisant les actions de recherche ;
- la différence entre les deux est l'apport en nature. Il s'agit des contributions valorisées et liées à des actions de recherche du projet, prises en charge directement par les partenaires qui exécutent ces actions, réalisées explicitement pour le programme de recherche, et non facturées au projet.

Les frais de gestion administratifs et financiers de l'Irex sont inclus dans la tâche 11.

Le taux de financement moyen envisagé, i.e. le rapport entre la part PN et le coût global, est de 25% environ.

Tableau 15 – Budget prévisionnel (k€ HT)

Tâches	Coût global (k€)	Part PN (k€]
1	1304	225
2	124	43
3	592	70
4	508	130
5	FUI FEDRE	
6	ANR	
7		
8	224	82
9	100	40
10	50	10
11	190	170

Cout total	3092	770
-------------------	-------------	------------

La tâche 5 n'a pas été intégrée dans le budget global ASIRI+ puisqu'elle sera traitée dans le cadre du projet FUI FEDRE. De même les tâches 6 et 7 n'apparaissent pas dans ce tableau de synthèse puisqu'elles feront l'objet d'une demande de subvention ANR. Dans l'éventualité où le projet déposé à l'ANR ne serait pas retenu, un nouveau travail de priorisation serait à effectuer sur les tâches concernées afin de rendre les budgets associés compatibles avec les sources de financement du PN.

Le montage de ce projet avec deux autres projets de recherche imbriqués permet de travailler sur tous les sujets que la profession a souhaité voir traiter dans ce domaine. Malgré les nombreux cas qui seront traités dans ASIRI+ avec des expérimentations en vraie grandeur, des essais en laboratoires et des modélisations numériques, la part qui reste à financer reste raisonnable du fait de la réutilisation de nombreux dispositifs développés dans le cadre du PN ASIRI.

Selon les prévisions établies au moment de la rédaction de ce programme de recherche, les ressources en numéraire nécessaires pour financer la part PN sont de 770 k€. Ces ressources proviendront majoritairement des contributions directes des partenaires que sont les cotisations, dont la grille est fournie dans la charte d'adhésion, selon l'hypothèse de 4 appels de fond (1 appel de cotisation par an). Une demande de financement auprès du ministère en charge de l'aménagement et des infrastructures pourra être demandée.

11.8 : Partenaires pressentis

L'enquête soumise en juin 2016 par l'IREX à l'ensemble de la profession sur l'opportunité de monter le projet ASIRI+ a permis de mettre en avant les nouveaux sujets à étudier mais aussi d'identifier les organismes prêts à participer à ce nouveau projet. Parmi les 59 organismes ayant répondu à l'enquête, 43 se sont déclarés prêts à participer et de nouveaux organismes se sont manifestés depuis (ENERCON, Université de Lille, Nuvia Group).

La liste des organismes ayant manifesté un intérêt pour le projet ASIRI+ est donnée en annexe.

Annexe : liste des partenaires pressentis

Académique (10)

Ecole Centrale de Nantes
Ifsttar
INSA Lyon
Institut Pascal
Université Cadi Ayyad Marrakech
Université de Lille
Université de Lorraine
Université de Nice
Université de Tlemcen (RisAm)
Université Grenoble Alpes (3SR)

Bureau de contrôle (2)

Apave
Socotec

Entreprise de travaux (9)

Botte Sondages
Colas
FNTP
NGE Fondations
Keller
Medinger
Menard
Nuvia group
Pinto
Soletanche-bachy

Industriel (8)

Balineau
Enercon
Huesker
Lhoist
Maccaferri
Naue
TenCate
Texinov

Ingénierie (14)

Accotec
Alios Pyrenées
APC Ingénierie
Arcadis
Cerema
CTTP
Egis
Fondasol

Geolithe
Geotec
Hydrogéotechnique
Kaena
Terrasol
XAmSol Développement

Maître d'ouvrage (3)

Conseil Départemental des Alpes Maritimes
EDF
SNCF Réseau