

Centre de Nantes
Route de Bouaye
BP 4129
44341 Bouguenais Cedex

Site Web : www.ifsttar.fr

Département Géotechnique Eau
Risque

Department Geotechnical
Engineering Water Risk
Jean-Pierre.Magnan@ifsttar.fr

Groupe Modèles Physiques en
Géotechnique

Physical Modelling in Geotechnics
Unit
Luc.Thorel@ifsttar.fr

Secrétariat :
GER.GER9@ifsttar.fr

☎ 33 (0)2 40 84 58 16

📠 33 (0)2 40 84 59 97

Semelle sur inclusions rigides soumises à des sollicitations inclinées : expérimentations en centrifugeuse

Auteurs :

Gérard Rault

Nomenclature d'activité :

Référence sur Numéro de contrat* :

13W07112

Confidentialité :

Confidentiel

Référence GER/GER9 : 2011-4-10-1/1-a

Date d'origine	Date de la présente version	Rédacteur	Vérificateur
10 octobre 2011	25/11/2011	Gérard Rault	Luc Thorel

Etablissement public
à caractère scientifique
et technologique



N° 9915173 pour les sites
de Paris et de Nantes
Cité Descartes –
Boulevard Newton F-77
Champs-sur-Marne

Marne-la-Vallée

Satory-Versailles



Projet National

Amélioration des Sols par Inclusions Rigides

Opération du Réseau Génie Civil et Urbain

OPERATION DU RESEAU GENIE CIVIL & URBAIN

Semelle sur inclusions rigides soumise à des sollicitations inclinaées : expérimentations en centrifugeuse

Décembre 2011

AUTEURS :

Gérard RAULT, IFSTTAR

VERIFICATEUR :

Luc THOREL, IFSTTAR

Décembre 2011

A.S.I.RI/FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Semelle sur inclusions rigides soumise à des sollicitations inclinées
RAPPORT N° : 4.11.3.20
DATE D'ETABLISSEMENT : Décembre 2011
AUTEUR(S) : Gérard RAULT
ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : IFSTTAR
THEME DE RATTACHEMENT : Thème 3 : Essais de laboratoire et en centrifugeuse
LETTRE DE COMMANDE : 11/ASI/126

LISTE DE DIFFUSION

NOM	ADRESSE
IREX (2 exemplaires)	
Webmestre ASIRI	

Résumé

Ce rapport présente l'état d'avancement du programme expérimental sur la modélisation physique en centrifugeuse du chargement de fondation superficielle posée sur un groupe d'inclusions rigides. Sont présentés les différentes phases de préparation des dispositifs de chargement, des modèles réduits et de la préparation en laboratoire des massifs de sol compressibles dédiés aux essais ; une large part est faite à l'instrumentation et aux aspects concernant les montages mécaniques, aux contrôles et tests de réception. Aucun résultat d'essai ne peut être présenté à ce jour.

Pour l'élaboration de ce programme expérimental, plusieurs intervenants ont apporté leur contribution :

<i>Philippe Audrain</i>	<i>Groupe modélisation physique en géotechnique</i>	<i>GER9</i>
<i>Claude Favraud</i>	<i>Groupe modélisation physique en géotechnique</i>	<i>GER9</i>
<i>Damien Macé</i>	<i>Groupe modélisation physique en géotechnique</i>	<i>GER9</i>
<i>Eick Merliot</i>	<i>Groupe Physique et Instrumentation</i>	<i>MACSI</i>
<i>Alain Néel</i>	<i>Groupe modélisation physique en géotechnique</i>	<i>GER9</i>

Mots clés : Centrifugeuse, modèles réduits, groupe d'inclusions rigides

TABLE DES MATIERES

1	– INTRODUCTION	7
2	- BASE ET DEVELOPPEMENT DE L'EXPERIMENTATION	7
3	- MODELE ET CONCEPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL	9
3.1	– Définition du capteur de force	10
3.2	– Définition d'une inclusion	11
3.3	– Vérification des montages mécaniques	12
3.4	- Contrôle des capteurs de force	16
3.5	– Les fondations superficielles	19
3.6	Aménagement particulier du conteneur d'essais	21
3.7	- Instrumentation	28
4	- MONTAGE EXPERIMENTAL	30
4.1	– Reconstitution du massif de sol en laboratoire	30
4.2	– Equipement et préparation de l'instrumentation interne au massif	30
4.3	- Equipement et la préparation du modèle sur la centrifugeuse	32
4.4	– Démontage des dispositifs d'essais	32
5	- PROGRAMME EXPERIMENTAL	35
5.1	- Calendrier des essais en centrifugeuse	35
5.2	– planning de préparation des massifs de sol	36
6	- CHOIX DU MATELAS DE TRANSFERT DE CHARGES	37
6.1	- Paramètres physiques	37
7	- PREPARATION ET CARACTERISTIQUES DES MASSIFS DE SOL CENTRIFUGES.	39
7.1	- Notations	39
7.2	- Remarques préliminaires	39
7.3	– Eléments de la fiche signalétique d'un massif	40
7.4	– Procédure de reconstitution d'un massif d'argile en laboratoire (kaolinite-sable à 20%)	41
7.5	– Procédure retenue pour la préparation d'un massif de sol	41
7.6	- Préparation du massif centrifugé d'argile C01 (kaolinite-sable à 20%)	42
7.7	– Comparaison des massifs après préparation en laboratoire	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Ouvrage prototype souhaité (noté n°0), présenté par Dias (CFMS du 16 mars 2011).....	8
Figure 2 – Capteur FGXF 3044 modifié.....	11
Figure 3 – Inclusion instrumentée (A) et détail des usinages pour insertion du capteur (B) et passage de câble dans le bouchon étanche (C)	11
Figure 4 – Implantation des dispositifs d’essais dans la nacelle de la centrifugeuse et.....	13
repérage des groupes d’inclusions	13
Figure 5 – Repérage et cotation des éléments mécaniques.....	15
Figure 6 – Utilisation d’un bâti oedométrique modifié pour la mise en compression d’une inclusion.....	16
Figure 7 – Exemple de résultats de calibration de capteur équipant les inclusions	18
Figure 8 – Fondations superficielles utilisées pour l programme d’essais $H_m = 0.5m$ (grandeur prototype) ...	20
Figure 9 – Vue générale du montage mécanique.....	21
Figure 10 – Plan de réalisation de la plaque de fond de conteneur.....	22
Figure 11 – Plaque de fond et détails des bouchons utilisés pour le passage de câble de capteur.....	22
Figure 12 - Tourillons disposés sur 2 génératrices opposées pour assurer le retournement du conteneur d’argile	23
Figure 13 – Anneau additionnel pour rattrapage des jeux (hauteur de remblai variable).....	23
Figure 14 – procédure de chargement.....	24
Figure 15 – Principe de montage pour la réalisation séparément de l’essai vertical et horizontal	26
Figure 16 – Principe de montage pour réalisation simultanément de l’essai combiné	27
Figure 17 - Vue générale du dispositif combiné.....	28
Figure 18 - Coupe du dispositif combiné.....	28
Figure 19 - Vue en coupe (axialement au rayon de la centrifugeuse).....	28
Figure 20 - Vue en coupe (direction de la rotation de la centrifugeuse).....	28
Figure 21 – Exemple de montage du dispositif pour essai combiné en centrifugeuse.....	28
Figure 22 – planche photographique.....	34
Figure 23 - planning de reconstitution du massif de sol C01.....	36
Figure 24 - Contrôle de l'homogénéité du mélange (Baudouin et al., 2008).....	37
Figure 25 - Courbe granulométrique des fractions et du mélange de sable d'Hostun (Morgon, 2010)	38
Figure 26 - campagne préliminaire et détermination d’une corrélation Q_c/S_u	40
Figure 27 – répartition spatiale des couches d’argile dans chaque conteneur	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I - Prototypes envisagés	9
Tableau II - Eléments de dimensionnement.....	10
Tableau III – Caractéristiques techniques générales du capteur de force FGP XF3044 modifié	10
Tableau IV – Repérage et appellation des inclusions	12
Tableau V - Groupe 1 (maille 90 x 90mm) & Groupe 2 (maille 72 x 72mm).....	15
Tableau VI – Exemple de fichier d’acquisition après traitement (feuille d’essais type)	17
Tableau VII – Récapitulatif des coefficients de calibration.....	19
Tableau X – Récapitulatif des capteurs utilisés et rappel de leur attribution.....	29
Tableau XI - organisation type d’une campagne de 2 essais consécutifs avec un arrêt de la centrifugeuse....	35
Tableau XII - planning des essais à réaliser en centrifugeuse en 2011 et 2012 ($H_{matelas} = 26.4mm$)	36
Tableau XIV - Caractéristiques granulométriques du sable d'Hostun (Grosseau, 2007).....	38
Tableau XV - Principales caractéristiques du mélange de sables retenu (Dupla et al., 2008).....	38
Tableau XVI– Détermination de la procédure de consolidation.....	42
Tableau XVII – conteneur ASIRI C01 : répétition de la préparation des couches.....	43
Tableau XVIII - Planning de préparation du massif d’argile conteneur ASIRI C01 (mélange à 20%)	43
Tableau XIX – Caractéristiques des couches dans le conteneur ASIRI C01.....	44

1 – Introduction

Dans la continuité du programme ASIRI, projet national initié en 2005 pour lequel on a fait appel à la modélisation physique en centrifugeuse pour répondre à un certain nombre de volets à étudier sur le système de renforcement proposé, il se dégage quelques nouveaux aspects qui demandent à être éclaircis. Avant tout, un petit historique mérite cependant d'être rappelé ;

- L'une de ces approches a été d'étudier le renforcement d'un sol compressible par inclusions rigides en étudiant le comportement de groupes élémentaires distribués selon une maille carrée ; deux taux de recouvrement associés à trois différentes hauteurs de matelas de transfert et à un type de chargement souple ou rigide a fait l'objet d'une première campagne d'essais¹ ; cette approche a fait l'objet des travaux de thèse de Gaëlle Baudouin soutenue en 2010.

- Une seconde approche s'est faite par le biais de la conception d'un dispositif expérimental appelé plateau mobile ; le croisement des paramètres étudiés permet aussi d'associer 3 taux de recouvrement, 3 hauteurs de matelas de transfert et des applications de surcharge de type souple ou dallage ; la combinaison de ces paramètres a été associée à la nature du matelas de transfert de charge, matériau pulvérulent d'une part² (sable d'Hostun à granulométrie étalée) et d'autre part des matériaux reconstitués³, sols traités à base de mélange de limon : cette approche a fait l'objet des travaux de thèse de Umur Okyay soutenue en 2010 et du stages de Mathieu Morgon en 2010.

- On peut ajouter également des campagnes spécifiques utilisant ce même dispositif expérimental pour étudier l'apport d'une ou plusieurs nappes de géotextiles introduites à la base du matelas de transfert ; essais réalisés dans le cadre du stage de Sébastien Lefebvre et Diego Hartman en 2011 sous le couvert de Marcio Almeida.

Parmi les nouvelles problématiques, l'une d'entre elles consiste à étudier le comportement d'une semelle posée sur un matelas granulaire surmontant un sol compressible renforcé par inclusions rigides et soumise à des sollicitations inclinées. Le principe d'un essai reprend l'approche expérimentale utilisant un massif de sol reconstitué déjà initiée dans la première approche : elle consiste à réaliser, dans un conteneur qui sera soumis à la macrogravité en centrifugeuse⁴, un modèle réduit géotechnique comportant le sol compressible renforcé par inclusions rigides, surmonté d'un matelas granulaire, sur lequel est posée une semelle carrée dont les dimensions sont en rapport avec la largeur de la maille (distance entre inclusions).

2 - Base et développement de l'expérimentation

Il s'agit d'étudier le comportement d'une semelle carrée, posée sur un matelas granulaire, lui-même surmontant un sol compressible renforcé de **quatre inclusions rigides**.

Les inclusions rigides seront rotulées à leur base et instrumentées en tête.

Le matelas granulaire utilisé est toujours le sable d'Hostun à granulométrie étendue ; une voire deux hauteurs de matelas seront étudiées.

Par conteneur d'essai, 2 configurations avec chacune 4 inclusions permettent de tester 2 taux de recouvrement ; ces 2 configurations seront reconduites à l'identique pour tous les conteneurs pour une même épaisseur de matelas.

La procédure de chargement consiste à appliquer une composante verticale puis une composante horizontale ; des essais préliminaires, chargement vertical et horizontal de référence permettent d'encadrer les cas de chargement combiné à résultante inclinée. Les cas de chargement retenus sont essentiellement de type monotone statique

Le schéma présenté figure 1 résume les spécifications particulières à approcher pour le dimensionnement du modèle ; entre autres particularités, la semelle de fondation est libre de rotuler en son centre de telle façon

¹ Essais réalisés à 27.8×G

² Essais réalisés à 20×G

³ Essais réalisés à 12×G

⁴ Essais réalisés à 18.9×G

que le centre de rotation reste dans le plan de l'interface fondation sol-matelas et le contact matelas-semelle est rugueux.

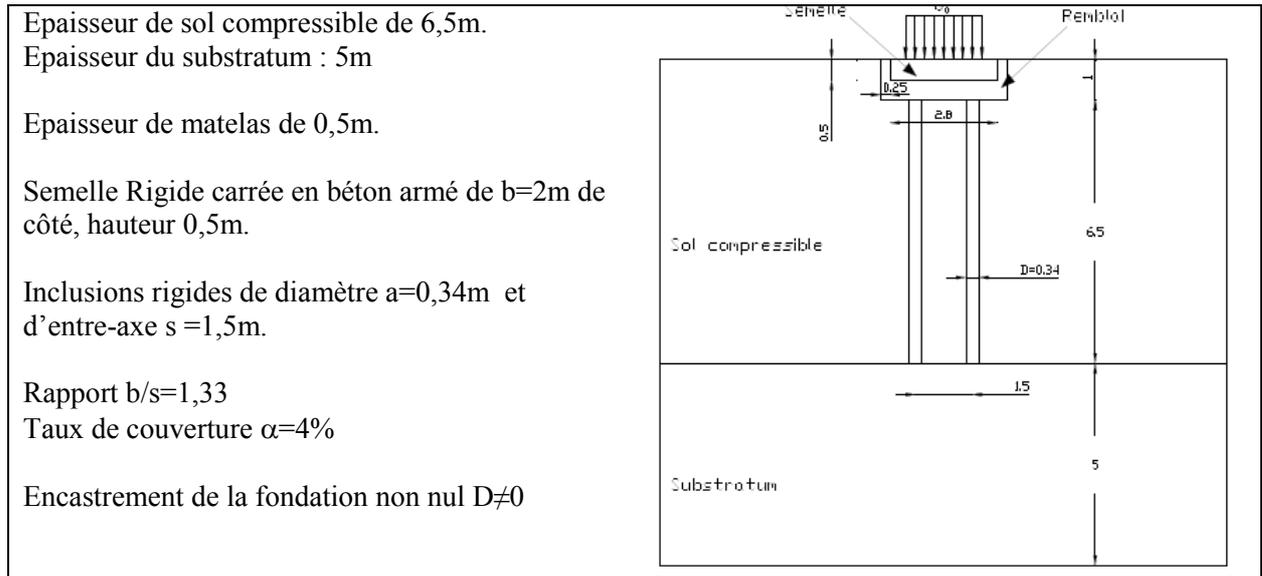


Figure 1 : Ouvrage prototype souhaité (noté n°0), présenté par Dias (CFMS du 16 mars 2011).

Une instrumentation spécifique adaptée au problème posé est mise en œuvre afin de :

- mesurer les efforts en tête dans chacune des quatre inclusions de chaque groupe ; il s'agit de la composante normale générée par le chargement combiné de la semelle. Une prospection a été faite concernant la mesure de la composante horizontale (effort tranchant dans le fût de l'inclusion au voisinage de la tête) ; des capteurs conventionnels ne le permettent pas compte tenu de l'étroitesse de la géométrie et les mesures par jauges ne sont pas adaptées (montage extensométrique mesurant le cisaillement ni même le moment),
- mesurer la composante de l'effort vertical appliqué au centre de la fondation
- mesurer l'effort horizontal nécessaire au déplacement de la fondation
- mesurer les déplacements verticaux et horizontaux de la fondation, et en déduire sa rotation éventuelle,
- mesurer les tassements en surface du matelas, à proximité de chaque groupe, et en zone non renforcée ; le suivi en temps réel des mesures de tassement permettent de déterminer le degré de consolidation avant exécution d'essais eux-mêmes,
- mesurer les dissipations de pression interstitielles par des sondes préalablement introduites dans le massif compressible par des forages horizontaux à différentes altitudes loin de toute zone d'influence ; ces informations viennent compléter les mesures données par les tassements,
- identifier le profil de cohésion du sol compressible par l'intermédiaire d'essais pénétrométriques en vol,

La réflexion conduit à proposer l'étude sur quatre ouvrages prototypes légèrement différents, regroupés en deux familles (correspondant à deux entre-axes d'inclusions). L'épaisseur de la semelle est maintenue, ainsi que le diamètre des inclusions. Par contre d'autres paramètres sont modifiés, en particulier l'encastrement ($D=0$, suite au courriel de B. Simon 12/04/11).

De plus, la largeur des fondations prototypes n°1 et 2 respectent la règle suivante : « Le débord minimal de la semelle par rapport au nu des inclusions est la demi-épaisseur du matelas. L'épaisseur minimale du matelas sous une semelle a été fixée à 0,3 m. Une valeur 0,5 m est courante. » (courriel B. Simon 12/04/11). Les deux hauteurs de matelas sont envisagées, le cas « bis » correspondant à l'épaisseur de 0,3m.

Le tableau I rappelle les différents types d'ouvrages envisagés.

Tableau I - Prototypes envisagés

	<i>Ouvrage prototype souhaité °0 Selon Dias (CFMS su 16 mars 2011)</i>	<i>Ouvrages prototypes proposés n°1 / n°1 bis</i>	<i>Ouvrages prototypes proposés n°2 / n°2 bis</i>
Diamètre des inclusions rigides a [m]	0,34	0,34	0,34
Entre-axe entre inclusions s [m]	1,5	1,70	1,36
Taux de couverture α [%]	4	3,1	4,9
Epaisseur de matelas Hm [m]	0,5	0,5 / 0,3	0,5 / 0,3
Hm+s+a [m]	2,34	2,54 / 2,34	2,20 / 2,00
Côté de la Semelle Rigide carrée : b[m]	2	2,54 / 2,34	2,20 / 2,00
b/s [-]	1,33	1,49 / 1,38	1,62 / 1,47
Matériau semelle rigide	Béton armé	Béton armé	Béton armé
Module de Young de la fondation [GPa]	20	20	20
Epaisseur de la semelle h [m]	0,5	0,5	0,5
Rigidité en flexion EI [GNm²]	0,42	0,53 / 0,49	0,46 / 0,42
Encastrement de la semelle D [m]	0,5	0	0
Epaisseur du substratum [m]	5	Non quantifiée	Non quantifiée
Epaisseur de sol compressible [m]	6,5	~ 6,8	~ 6,8
Effort Vertical max V (pour 0,2MPa) [MN]	0,80	1,23 / 1,10	0,96 / 0,80

3 - Modèle et conception du dispositif expérimental

Le modèle est inspiré des expérimentations menées au cours de la thèse Baudouin (2010), pour lequel l'échelle était de 1/27,8 (en raison notamment du choix de l'instrumentation). Dans ces expérimentations, le fond du conteneur circulaire ($\varnothing=890\text{mm}$) avait été perforé afin de faciliter la mise en place des inclusions instrumentées. Deux groupes de 9 inclusions étaient ainsi testées dans le même conteneur. Pour l'application en cours, la géométrie est réutilisée pour les deux groupes de 4 : les 2x5 autres trous étant alors bouchés. Dans cette configuration, deux taux de couverture sont accessibles : $\alpha=3,1\%$ ou $4,9\%$.

Afin de réduire le plus possible les modifications, les **paramètres suivants sont conservés** :

- **diamètre des inclusions $\varnothing=18\text{mm}$**
- **entre axe des inclusions $s_1=90\text{mm}$ ou $s_2=72\text{mm}$**
- **fiche des inclusions $f = 360\text{mm}$ environ**
- **le substratum n'est pas modélisé : sa face supérieure correspond au fond du conteneur.**

Le respect du prototype n°0 (tableau I) conduit à choisir un facteur d'échelle respectivement de :

- 18,89 si l'on respecte les diamètres d'inclusion ;
- 16,67 ou 20,83 si l'on respecte les entre-axes ;
- 16,71 ou 20,89 si l'on respecte le rapport b/s ;
- 18,06 si l'on respecte la hauteur de sol compressible.

L'échelle de 1/18,9 (soit une accélération centrifuge de $18,9\times g$), est un bon compromis pour respecter la similitude géométrique des différents paramètres : il est possible de simuler presque parfaitement le diamètre des inclusions, ainsi que les géométries prototypes n°1 & 2 du tableau I.

Dans un conteneur, une seule hauteur de matelas est étudiée. Compte tenu de la géométrie des conteneurs (diamètre de 894mm), deux fondations sont testées, avec ou sans inclusions. Une des deux fondations est soumise à un chargement combiné (vertical et horizontal), l'autre ne pouvant subir qu'un chargement vertical.

L'ouvrage prototype simulé est, compte tenu des contraintes liées au dispositif expérimental en centrifugeuse, légèrement différent de l'ouvrage simulé numériquement par D. Dias (tableau II).

Tableau II - Eléments de dimensionnement

Option*	échelle	Entre axe		Diamètre inclusion		Taux	rapport	Coté fondation	
		proto	modèle	proto	modèle			proto	modèle
	×g	s (m)	s (mm)	a (mm)	a (mm)	α	b/s	b (m)	b (mm)
1-1	18,9	1,70	90	340	18	3,1	1,49	2,54	134
1-bis	18,9	1,70	90	340	18	3,1	1,38	2,34	124
2-1	18,9	1,36	72	340	18	4,9	1,62	2,20	117
2-bis	18,9	1,36	72	340	18	4,9	1,47	2,00	106

* les options tiennent compte de 2 entre axes et de deux hauteurs de matelas

3.1 – Définition du capteur de force

Les capteurs de force miniature FGP sont de type XF3044 (traction-compression); d'étendue de mesure 2kN (tableau III). Ce capteur est né d'un besoin et son développement s'est fait dans le cadre de l'étude du « comportement d'un groupe élémentaire (3*3 inclusions) ». On trouvera dans les travaux de thèse de G. Baudouin (Sols renforcés par inclusions rigides : Modélisation physique en centrifugeuse de remblais et de dallage) un volet de son utilisation.

Le choix du type de capteur a été fait à partir de réflexions qui ont permis l'adaptation d'un produit courant au besoin particulier défini dans le cahier des charges [Rault & Thorel, 2006] et [Rault, 2006]. Les modifications fondamentales portent sur la géométrie, l'adaptation des sorties électriques dans l'axe du capteur et son étanchéité.

Vingt six capteurs avaient été approvisionnés ; ils se sont montrés très satisfaisants par rapport aux objectifs passés, et à ce titre, il a été suggéré de les réaffecter dans le cadre de cette nouvelle étude.

Un rappel des caractéristiques générales et dispositions particulières sont rappelées dans le tableau I et la figure 1.

Tableau III – Caractéristiques techniques générales du capteur de force FGP XF3044 modifié

ETENDUE DE MESURE RANGE	2kN
SURCHARGE ADMISSIBLE OVERANGE	2 x l'étendue de mesure 2 x full scale
TENSION D'ALIMENTATION EXCITATION	10 Vcc 10 Vdc
SIGNAL SIGNAL OUTPUT	100mV 100mV
DESEQUILIBRE OFFSET	< ±10mV < ±10mV
LINEARITE + HYSTERESIS COMBINE LINEARITY + HYSTERESIS	< ±1% de l'étendue de mesure < ±1% full scale
INTERACTIONS CROSS SENSITIVITY	- -
INDICE DE PROTECTION PROTECTION	IP68 - 1 bar IP68 - 1 bar
TEMPERATURE D'UTILISATION OPERATING TEMPERATURE RANGE	0°C à +60°C 0°C to +60°C
TEMPERATURE DE COMPENSATION COMPENSATED TEMPERATURE RANGE (CTR)	0°C à +60°C 0°C to +60°C
DERIVE DE ZERO DANS LA PLAGE COMPENSEE ZERO SHIFT WITHIN CTR	< 2% de l'étendue de mesure / 60°C < 2% full scale / 60°C
DERIVE DE SENSIBILITE DANS LA PLAGE COMPENSEE SENSITIVITY SHIFT WITHIN CTR	< 2% de la valeur lue / 60°C < 2% of reading / 60°C
MATIERE MATERIAL	Acier inox Stainless steel
SORTIE ELECTRIQUE ELECTRICAL OUTPUT	Sortie sapin surgainée Fir output
FICHE MOBILE MATING CONNECTOR	Non No
TYPE ET LONGUEUR DE CABLE CABLE OUTPUT	2m - Gaine teflon ø1,8 - 5 conducteurs 2m - Gaine teflon ø1,8 - 5 conductors
MASSE WEIGHT	< 30g < 30g
ENCOMBREMENT DIMENSIONS	Voir plan XF3044 See drawing XF3044

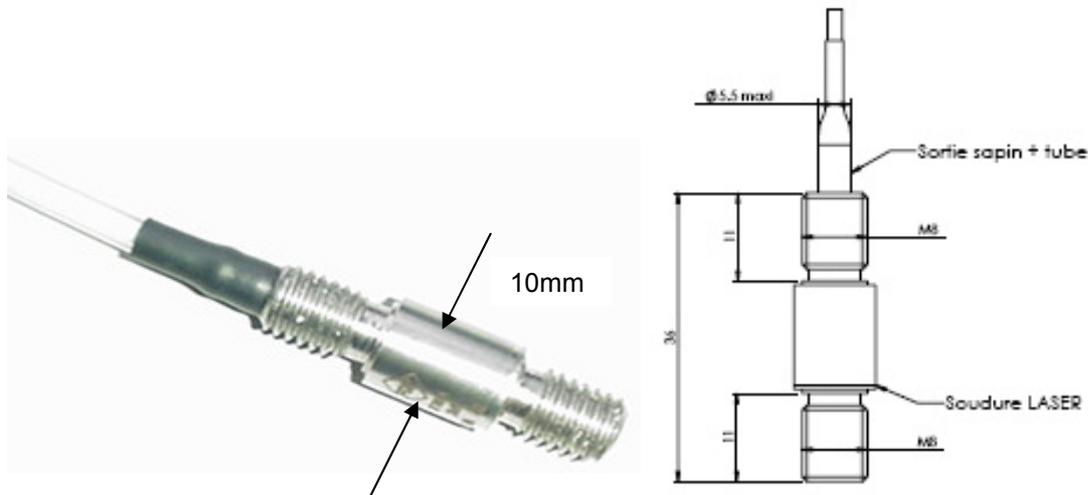


Figure 2 – Capteur FGPXF 3044 modifié

3.2 – Définition d’une inclusion

Le choix de la géométrie de l’inclusion est conditionné principalement par le choix du capteur (cf. §3.1), et ensuite par d’autres considérations telles que les réservations déjà réalisées dans la plaque de fond du conteneur, et la puissance du massif de sol retenue et la disponibilité des matériels existants (conteneur). On rappelle que l’échelle de réduction est de $18.9 \times G$ a été choisie à partir d’un compromis sur un ensemble de critères dont celui-ci, en gardant à l’idée la meilleure représentativité vis a vis de la problématique posée.

La figure 3 et la planche de photos (figure 4) présentent une perspective du plan d’exécution d’une inclusion instrumentée et les différents éléments qui la composent ; de part et d’autre du fût central (diamètre nominal de 18mm et longueur de 319 mm), on trouve :

- en tête, le logement pour le capteur sur lequel se visse un chapeau équipé d’une vis de réglage qui garantit le jeu ($1 \text{ à } 2/10^{\text{ème}}$) nécessaire à la respiration du capteur
- en pied, une pointe conique vissée dans le fût ; la pointe conique (angle au sommet 90°) est percée latéralement pour permettre le passage du câble du capteur. La pointe vient se loger et prendre appui dans un cône évidé (angle au sommet 125°) aménagé dans le bouchon étanche lui-même usiné pour laisser le passage du câble de mesure. Le montage permet d’avoir un débattement de $\pm 17.5^\circ$ dans toutes les directions ce qui assure la rotule de l’inclusion dans la limite de ce débattement ; ce degré de liberté correspond à un déplacement maximum en surface de $\pm 113\text{mm}$. Le bouchon de pied (diamètre 18 mm) équipé d’un joint torique est vissé dans la plaque de fond du conteneur par sa face extérieure.

Huit inclusions (+ 1 en réserve) correspondant aux 2 mailles de 4 inclusions ont été réalisées sur cette base ; la tarière utilisée pour le forage des trous dans le massif d’argile possède un diamètre de 20 mm et une longueur de 380 mm ; le sur dimensionnement (2mm au diamètre) est conditionné par le fait que l’inclusion doit être introduite assez librement sans frotter sur les parois du forage afin de réduire le collage de l’argile sur le fût de l’inclusion ; la restructuration du massif autour de l’inclusion se faisant naturellement pendant la phase de reconsolidation sous gravité ;



Figure 3 – Inclusion instrumentée (A) et détail des usinages pour insertion du capteur (B) et passage de câble dans le bouchon étanche (C)

3.3 – Vérification des montages mécaniques

La phase montage des pièces mécaniques ne présente pas de difficulté particulière ; après réglage final du jeu entre les éléments sensibles en tête, et passage des câbles de mesures dans les éléments de liaison, le colmatage des trous de passage de câble est assuré en utilisant un gel-coat (Dow Corning ® RTV 3140) qui garantit l'étanchéité.

3.3.1 Adoption d'un plan de repérage des inclusions

Le repérage tient compte de l'ensemble des dispositifs présents dans la nacelle de la centrifugeuse. La figure 5 présente une vue en plan de la configuration d'essai et rappelle la localisation exacte des 2 groupes à étudier. L'implantation des groupes est faite symétriquement par rapport à l'axe du conteneur, lequel est confondu avec l'axe du bras de la centrifugeuse pour respecter la symétrie de chargement sur les 2 groupes (ménisque du plan d'eau suivant une surface où la force centrifuge est constante).

On appelle **groupe**⁵, un ensemble de 4 inclusions instrumentées distribuées selon un maillage carré :

Tableau IV – Repérage et appellation des inclusions

Groupe	Maille modèle (mm)	Maille prototype (m)	Taux de recouvrement (α en %)	Repérage des inclusions
1	90 x 90	2.50 x 2.50	3.1	G1-12 / G1-11 / G1-22 / G1-21
2	72 x 72	2.00 x 2.00	4.9	G2-11 / G2-12 / G2-21 / G1-22

Chaque inclusion est référencée par rapport au groupe dans lequel elle est intégrée et par les coordonnées de son implantation dans le même groupe (exemple G1-xy) ; l'axe Y est dirigé vers le pivot de la centrifugeuse (figure 4).

La mesure de l'effort enregistrée par l'inclusion sera par la suite référencée par rapport à ce repérage et non pas par rapport à la dénomination commerciale du capteur, celui-ci pouvant être changé si détérioration.

Le tableau IV présente pour chaque groupe les appellations adoptées pour les inclusions qu'elles soient instrumentées ou non-instrumentées. A noter que pour respecter la symétrie du montage, les inclusions G1-12 / G1-11 et G2-11 / G2-12 sont localisées tête-bêche sur le même diamètre.

⁵ Groupe est préféré à réseau, terme qui est utilisé pour les inclusions inclinées.

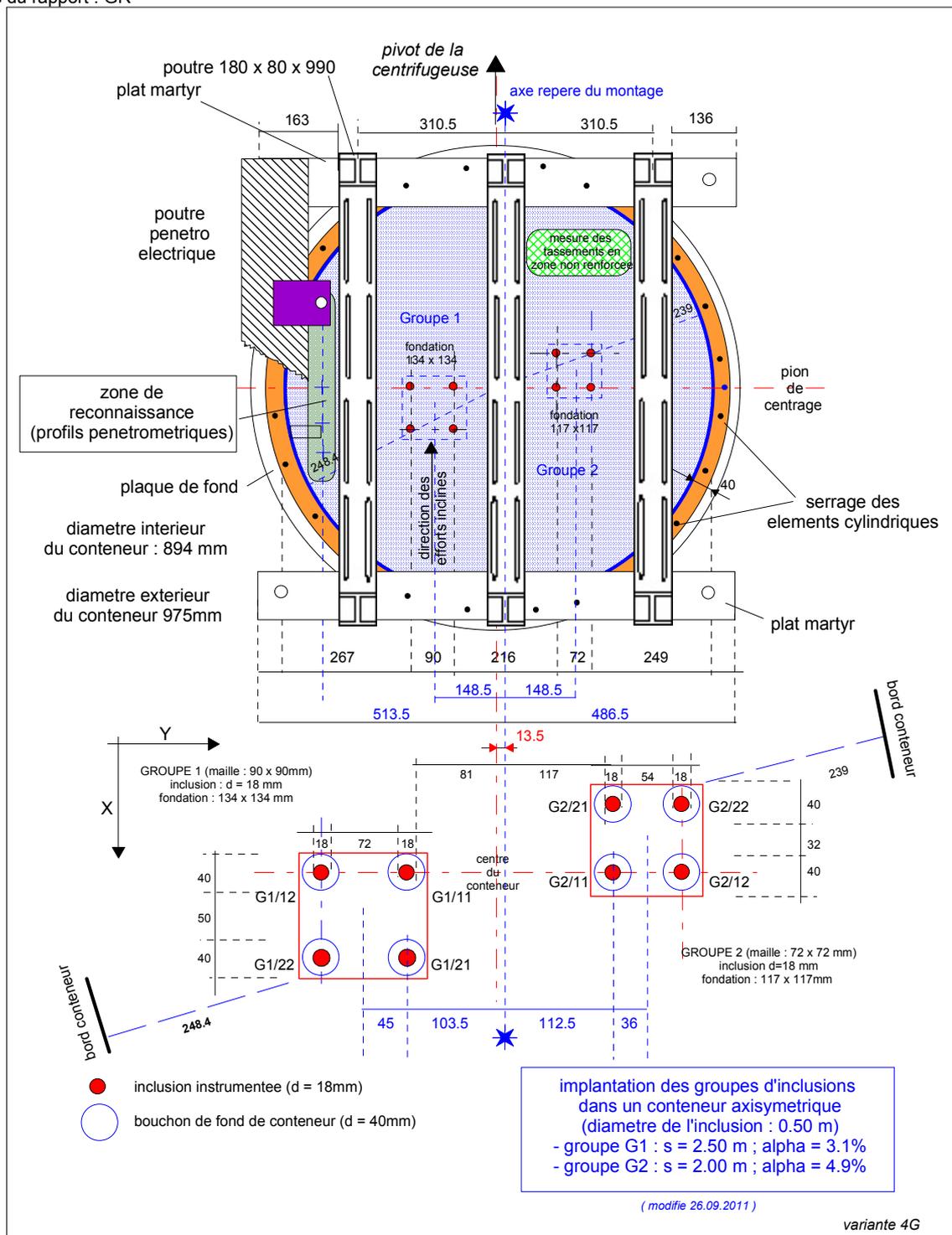


Figure 4 – Implantation des dispositifs d'essais dans la nacelle de la centrifugeuse et repérage des groupes d'inclusions

3.3.2 Constitution d'une inclusion

L'inclusion est composée d'un ensemble de pièces mécaniques réalisées à partir d'un plan unique, vérifiées à réception mais sans contrôle dimensionnel.

Le montage d'une inclusion c'est un assemblage de ces différentes pièces qui lui sont, après coup, dédiées après ajustement « personnalisé » ; l'élément est alors gravé et comporte la référence de l'inclusion associé à son emplacement ; le capteur peut cependant être changé.

3.3.2.1 Critère de réglage

Les capteurs de force miniature XF 3044 (étendue de mesure 2kN) travaillent en traction compression ; ces capteurs en inox ont une raideur de 10^8 N/m.

La respiration du capteur de 2000 N peut être calculée comme :

$$2000 / 10^8 = 2 \times 10^{-5} \text{ m} = 20 \times 10^{-6} \text{ m soit } 20 \text{ microns ou } 2/100^{\text{ème}} \text{ mm.}$$

Dans la pratique, on se fixe un jeu entre chaque élément actif compris entre $2/10^{\text{ème}}$ et $5/10^{\text{ème}}$.
Ce jeu est corrigé par l'intermédiaire de la vis de réglage située en tête du chapeau.
Un contrôle de la calibration est effectué après le montage définitif de chaque inclusion

3.3.2.2 Recensement des caractéristiques par élément instrumenté

Les inclusions instrumentées sont constituées par l'empilement de 4 éléments A, B, C, D.

Le tableau V rappelle, pour chaque groupe, les caractéristiques géométriques et pondérales propres à chaque inclusion ; on y trouve :

- le poids propre de chaque sous-élément,
- le poids cumulé des éléments directement supérieurs à la partie sensible du capteur d'effort (A),
- le numéro du capteur intégré dans la tête de l'inclusion instrumentée (exemple 01 pour le capteur XF3044-0)1
- le jeu adopté pour garantir le fonctionnement du capteur,

Au-delà du poids de l'inclusion instrumentée et de sa longueur totale, le plus important est le poids propre du secteur actif de l'inclusion situé au dessus du capteur d'effort. **Seul le poids cumulé (A) est déductible à 18.9xG de la mesure enregistrée par les capteurs.**

On note que :

- les longueurs totales présentent des écarts maxima de l'ordre de quelques dixièmes dus aux jeux de réglages
- les poids propres entre inclusions instrumentées présentent au plus un écart de 9/100.

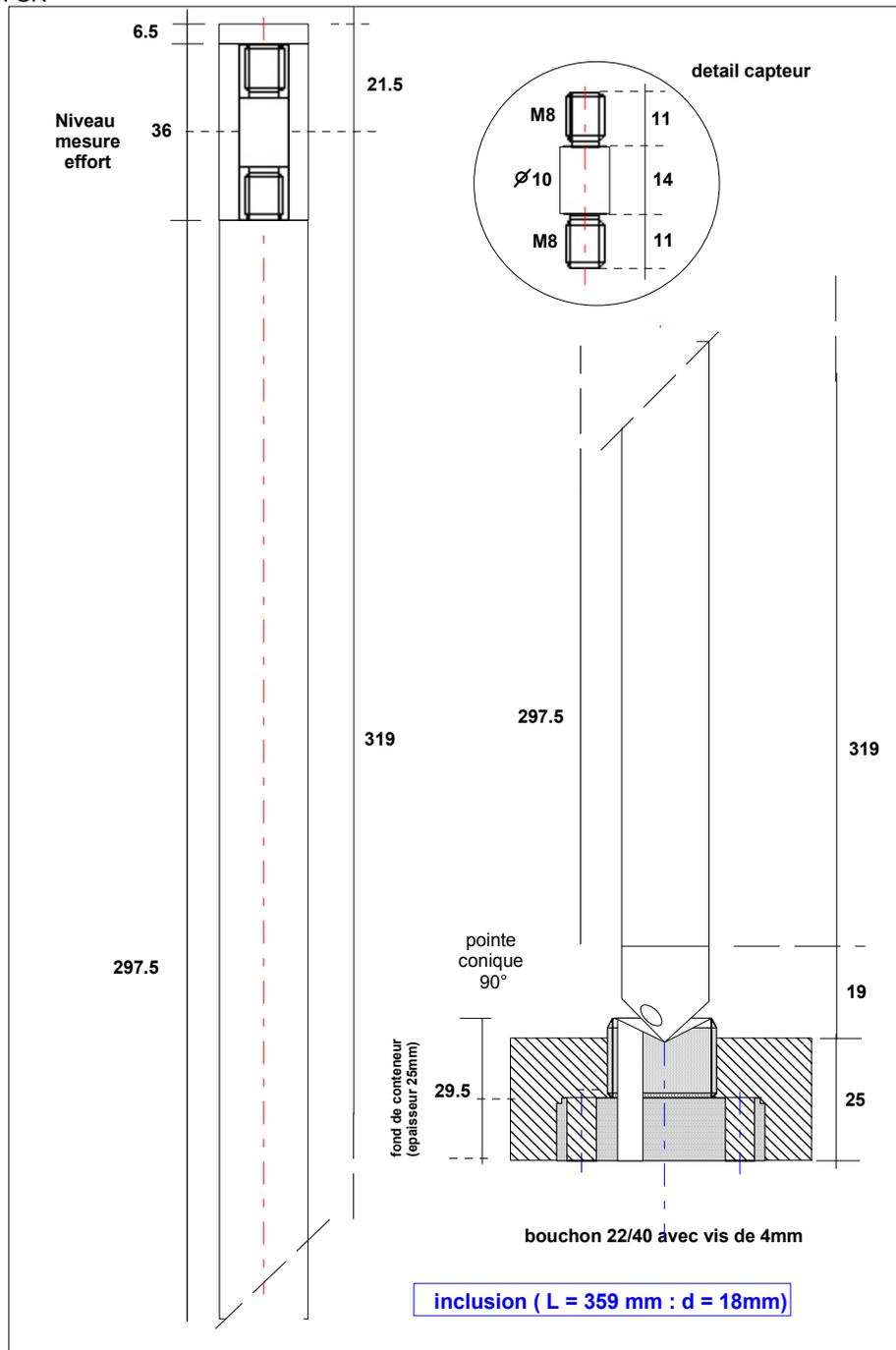


Figure 5 – Repérage et cotation des éléments mécaniques

Tableau V - Groupe 1 (maille 90 x 90mm) & Groupe 2 (maille 72 x 72mm)

Inclusion instrumentée (G1-xy)	G1-11	G1-12	G1-21	G1-22	G2-11	G2-12	G2-21	G2-22
Vis de réglage (g)	2	2	2	2	2	2	2	2
Tête (g) (A)	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7
Longueur active au dessus du capteur (mm)	21	21	21	21	21	21	21	21
Poids cumulé (g) (A)	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7
Jeu (J_A en $1/100^{\text{ème}}$ mm)	20/100	20/100	20/100	20/100	20/100	20/100	20/100	20/100
Capteur (g) (n°)	(01)12.5	(02)12.5	(03)12.5	(04)12.5	(01)12.5	(02)12.5	(03)12.5	(04)12.5
Câble 335mm (g)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
Élément milieu /Fût (g) (B)	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0	190.0
Cône rotulé (g) (C)	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
Bouchon (g) (D)	40.1	40.1	40.1	40.1	40.1	40.1	40.1	40.1
Poids cumulé (g) (A+B)	271.7	271.7	271.7	271.7	271.7	271.7	271.7	271.7
Longueur totale inclusion (mm)	384.1	384.1	384.1	384.1	384.1	384.1	384.1	384.1

Seul le poids cumulé (A) sera déductible à $18.9 \times G$ de la mesure enregistrée par les capteurs

3.4 - Contrôle des capteurs de force

3.4.1 – Moyen de calibration

Les capteurs ont fait l'objet d'un contrôle élémentaire électrique des ponts de jauges et d'une calibration afin de vérifier la linéarité de la réponse des capteurs intégrés dans leurs inclusions respectives ; par la suite, on parlera de calibration des inclusions par opposition à la calibration d'un capteur seul.

Les inclusions équipées et câblées sont installées verticalement sur un bâti oedométrique (figure 6); la base de l'inclusion est vissée sur un socle ; sur la tête de l'inclusion, une pièce mécanique permet de poser une rotule qui permet d'imposer le chargement axial de l'inclusion ; le chargement de l'inclusion en compression est assuré par un étrier équipé d'une contre-rotule qui garantit à son tour le chargement axial de l'inclusion.

Le centrage initial du système, ainsi constitué, ne peut à aucun moment être dérégulé pendant l'accroissement des paliers de chargement.

Le système de chargement par bras de levier permet de multiplier par 5 l'effort de compression imposé à l'inclusion. Pour éviter tout risque de flambage (l'inclusion n'est pas frettée latéralement), on se limitera volontairement au 1/3 de la charge nominale des capteurs (2kN).

Les inclusions sont connectées, chacune à leur tour, au système d'acquisition HBM SPIDER 8 programmation en pont complet avec une sensibilité de 12mV/V (correspondance à une charge pleine échelle de 2300N).

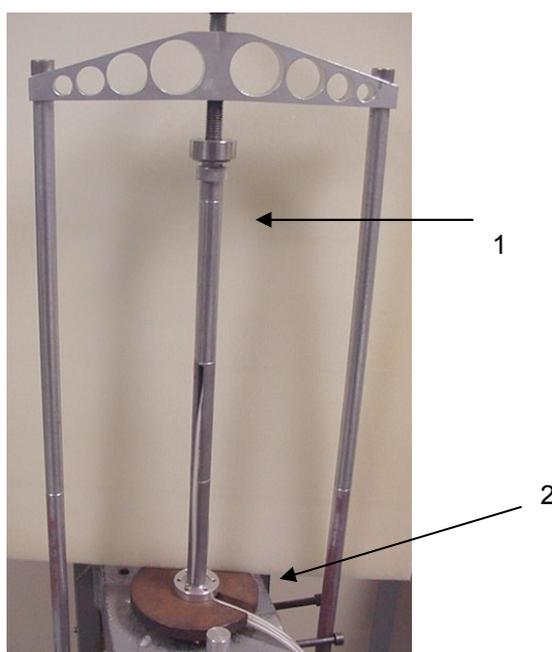


Figure 6 – Utilisation d'un bâti oedométrique modifié pour la mise en compression d'une inclusion
1- rotule et contre rotule
2- embase aménagée pour le passage des câbles

3.4.2 – Procédure de calibration

De façon préliminaire, une première inclusion est montée dans la configuration de l'étalonnage ; la première vérification consiste à contrôler la stabilité de la réponse des capteurs pendant une durée d'une vingtaine de minutes sous chargement axial ; sous cette amplitude de chargement axial, plusieurs cycles de chargement et déchargement sont opérés afin de contrôler la répétabilité des réponses.

Les 8 inclusions sont calibrées à tour de rôle en appliquant un chargement et un déchargement ; l'exploitation des résultats se fait directement après l'application d'un cycle de charge-décharge afin de mettre en évidence toute anomalie de comportement éventuelle.

Un exemple de résultats des calibrations propre à chaque capteur est présenté dans le tableau VI.

Tableau VI – Exemple de fichier d'acquisition après traitement (feuille d'essais type)

(sensibilité 12mv/v ; qui correspondrait à une charge pleine échelle de 2300N)

fichier contrôle Calibration F05, F06, F07, F08.xls

commentaires : calibration après démontage des inclusions
montage du capteur revisé sur le pied du bouchon d'inclusion
pour vérification du bon fonctionnement des capteurs

Impédance d'entrée	1401 Ω	1413 Ω	1397 Ω	1404 Ω
Impédance de sortie	460 Ω	472 Ω	457 Ω	461 Ω

masse kg	somme kg	force (x5) Newton	C05 PC 12mv	C06 PC 12mv	C07 PC 12mv	C08 PC 12mv	observation
0	0	0	0,592	-0,956	1,624	-0,265	libre
0	0	0	0,595	-0,974	1,623	-0,272	contact
0,9817	0,9817	48,152385	0,382	-1,18	1,404	-0,488	
0,979	1,9607	96,172335	0,169	-1,385	1,191	-0,706	
0,993	2,9537	144,87899	-0,038	-1,596	0,996	-0,92	
1,0227	3,9764	195,04242	-0,263	-1,814	0,767	-1,148	
1,9947	5,9711	292,88246	-0,671	-2,247	0,365	-1,58	
3,941	9,9121	486,18851	-1,507	-3,125	-0,452	-2,37	
4,003	13,9151	682,53566	-2,349	-4,025	-1,29	-3,195	
9,984	23,8991	1172,2509	-4,474	-6,23	-3,372	-5,297	
9,978	33,8771	1661,6718	-6,573	-8,335	-5,464	-7,39	
9,984	23,8991	1172,2509	-4,627	-6,225	-3,644	-5,507	
4,003	13,9151	682,53566	-2,419	-4,04	-1,454	-3,354	
3,941	9,9121	486,18851	-1,54	-3,158	-0,53	-2,465	
1,9947	5,9711	292,88246	-0,683	-2,313	0,318	-1,595	
1,0227	3,9764	195,04242	-0,245	-1,867	0,78	-1,145	
0,993	2,9537	144,87899	-0,025	-1,648	0,996	-0,929	
0,979	1,9607	96,172335	0,173	-1,437	1,186	-0,725	
0,9817	0,9817	48,152385	0,382	-1,218	1,4	-0,5	
0	0	0	0,585	-1,005	1,611	-0,288	contact
0	0	0	0,588	-1,02	1,611	-0,278	libre

régression linéaire

chargement et déchargement (tous les points)

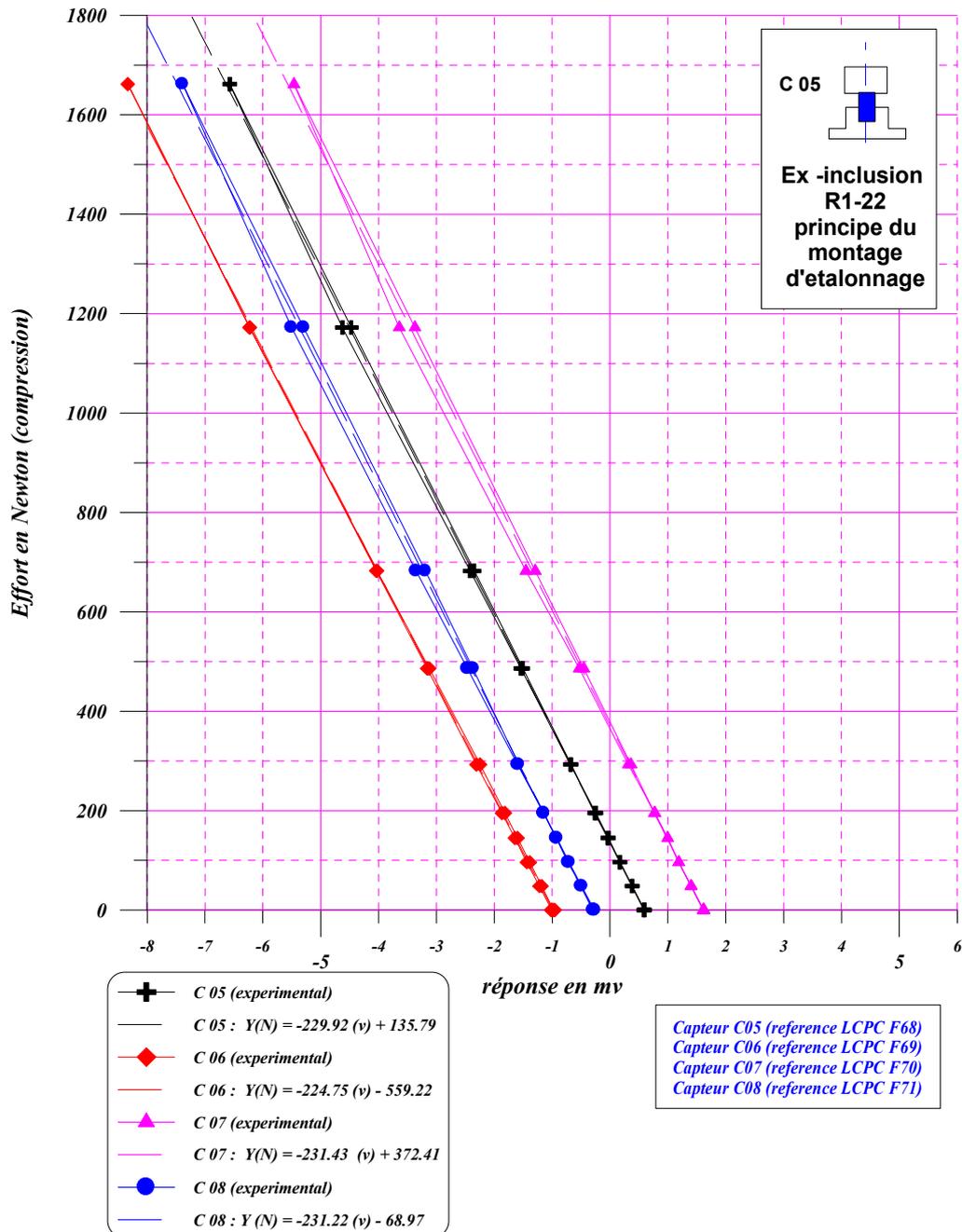
capteur C05 $y (N) = -229,92 (v) + 135,79$
 capteur C06 $y (N) = -224,75 (v) - 559,22$
 capteur C07 $y (N) = -231,43 (v) + 372,41$
 capteur C08 $y (N) = -231,22 (v) - 68,97$

chargement seul

$y (N) = -231,90 (v) + 136,49$
 $y (N) = -224,27 (v) - 215,18$
 $y (N) = -234,93 (v) + 378,83$
 $y (N) = -234,00 (v) - 68,16$

Les coefficients obtenus pour les deux types de régression utilisant les mesures chargement – déchargement ou les mesures du chargement seul diffèrent quelque peu ; il est probable que la faible hystérésis observée autour du retour au zéro de charge en soit l'explication.

Chaque calibration d'inclusion fait l'objet d'un ensemble de courbes correspondant à la réponse des capteurs intégrés dans leur montage mécanique définitif. L'une d'elle est présentée sur la figure 7



Programme ASIRI (Inclusion Rigides)
 Contrôle de la calibration des capteurs FGP XF3044 démontés de l'inclusion
 Ex- inclusion R1-22 (capteur C05, C06, C07, C08)
 (montage en compression - chargement seul du capteur : étendue de mesure 2kN)
 vérification du bon fonctionnement avant démontage (03.08.2011) F05toF08.grf

Figure 7 – Exemple de résultats de calibration de capteur équipant les inclusions

Un tableau récapitulatif (tableau VII) présente les coefficients obtenus des capteurs après cette phase de calibration ; un dernier contrôle des coefficients de calibration est réalisé avant la mise en place du Gel-Coat (RTV 3140 & 3145) assurant la protection étanche du fût de l'inclusion.

On rappelle que, seuls, les coefficients obtenus lors de la mise en compression de l'inclusion sont retenus; en effet compte tenu du principe de mise en charge continu sans déchargement, il est plus judicieux de retenir ces coefficients qui sont mieux ajustés au principe de l'essai. Le coefficient B de la régression linéaire n'est pas retenu compte tenu de l'initialisation à zéro des tous les capteurs avant le début de l'essai (les inclusions mises en place dans le massif peuvent être soumises à une légère précontrainte lors de leur introduction et pendant les phases préparatoires).

Tableau VII – Récapitulatif des coefficients de calibration

Repérage du groupe	Chargement seul en compression			
G1	G1/11 (C 05)	G1/12 (C 06)	G1/21 (C 07)	G1/22 (C 08)
	Y= -231.90 (v) +136.49	Y= -224.27 (v) -215.18	Y= -234.93 (v) + 378.83	Y= -234.00 (v) -68.16
G2	G2/11 (C 09)	G2/12 (C10)	G2/21 (C11)	G2/22 (C12)
	Y= -227.91 (v) +391.91	Y= -215.35 (v) + 516.04	Y= -221.26 (v) – 199.38	Y= -233.31 (v) + 178.31
G1 ou G2		C 14	C 15	C 16
(1)		Y= -213..60 (v) -557.34	Y= -236.35 (v) +297.85	Y= -231.63 (v) -18.73

(1) 3 capteurs C14, C15 et C16 ont été étalonnés parallèlement pendant l'opération de calibrage pour palier une défaillance de l'un des capteurs instrumentant les inclusions utilisées.

3.5 – Les fondations superficielles

3.5.1 – Définition des modèles

Le type de fondation retenue est une semelle carrée dimensionnée en fonction du groupe d'inclusions sur lequel elle est centrée : le centre de la fondation correspondant au centre de la maille ;
 Les caractéristiques du modèle sont rappelées dans le tableau VIII

Le facteur d'échelle de 18,9 conduit à retenir une épaisseur de l'ordre de 17mm si l'on veut respecter la rigidité en flexion sur la base d'une fondation prototype en béton (module de Young de 20GPa).

La fondation superficielle doit être rigide

L'interface est non encadrée et rugueuse. La rugosité est obtenue en collant du sable d'Hostun (identique au matériau du matelas de transfert).

On rappelle que la nature du chargement conduit aux des spécificités suivante sur la fondation :

- charge verticale ou inclinée centrée sur la fondation : le point de rotation de la semelle est situé en son centre à l'interface semelle-sol (rotule hémisphérique) ;
- charge uniquement horizontale : l'altitude du point d'application est au plus près de l'interface horizontale matelas-fondation (afin d'éviter un moment de renversement non souhaité).

Les fondations carrées sont en aluminium :

- épaisseur >17,3mm
- largeur : de 106 à 134 mm selon les cas

Dans le cas d'un **chargement purement vertical** ou d'un **chargement combiné**, une rotule de centre positionnée à la base de la fondation permet l'application de l'effort résultant à l'interface matelas-fondation. Un dégagement central de diamètre 45mm pour le passage de la rotule hémisphérique ; la profondeur de l'évidement correspond à une épaisseur de la fondation moins 6mm.

Le débattement angulaire autorisé par la contre-rotule est de $\pm 5^\circ$

Tableau VIII : propriétés des modèles réduits de fondation superficielle

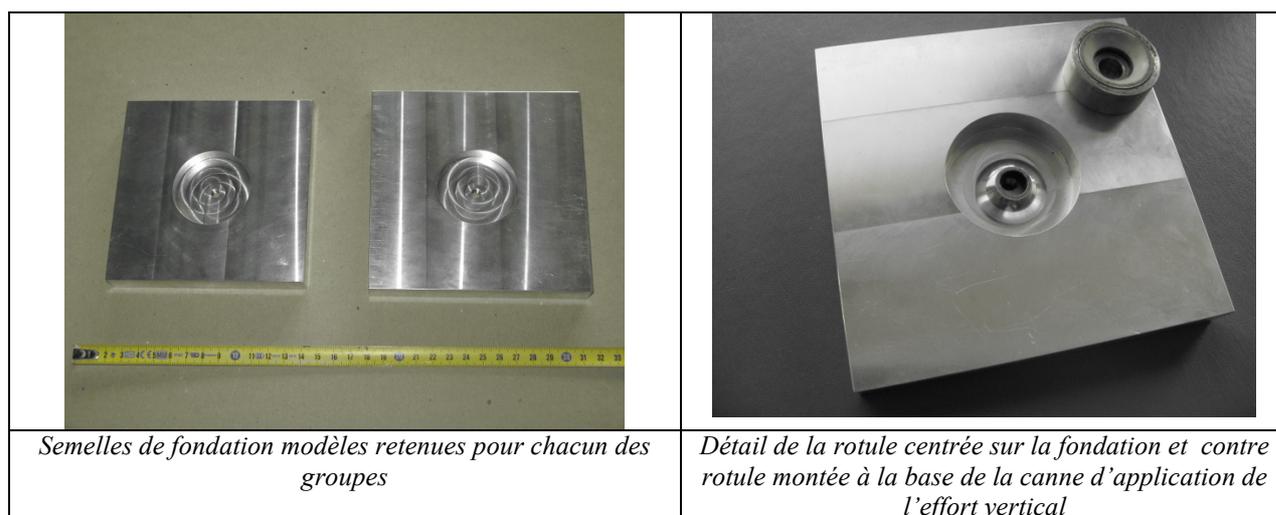
Matériau	Masse volumique	n°	Largeur	Hauteur fondation respectant EI	Masse	Contrainte verticale sous la fondation	Poids	Poids déjàugé	Hm Proto correspondant
	rho [kg/m3]		b [m]	h [m]	[kg]	sigma v [kPa]	[N]	[N]	[m]
Aluminium	2700	1	0,1340	0,0175	0,848	8,8	157	99	0,5
Aluminium	2700	2	0,1170	0,0173	0,639	8,7	119	75	0,5
Aluminium	2700	1bis	0,1240	0,0175	0,727	8,8	135	85	0,3
Aluminium	2700	2bis	0,1060	0,0173	0,525	8,7	97	61	0,3

Les contraintes calculées dues au poids propre de la fondation (inférieure à 9kPa) sont à comparer à la surcharge verticale qui serait appliquée (200kPa) maximum.

Pour l'application de la composante horizontale, que le chargement soit purement horizontal ou combiné, vertical-horizontal, un évidement est prévu, centré sur l'un des cotés de la fondation pour l'accrochage du dispositif de mise en traction (figure).

La semelle de fondation est ainsi libre de tout tassement pendant la phase de consolidation mais reste guidée par le doigt qui vient au contact de l'évidement dès que la mise en traction est imposée. Le doigt est toujours solidaire du piston du servo-vérin hydraulique horizontal.

Ainsi l'altitude du point de traction par rapport au plan de contact sol-semelle reste constant et la direction de l'effort est unique.



Semelles de fondation modèles retenues pour chacun des groupes

Détail de la rotule centrée sur la fondation et contre rotule montée à la base de la canne d'application de l'effort vertical

Figure 8 – Fondations superficielles utilisées pour l'programme d'essais $H_m = 0.5m$ (grandeur prototype)

Les poids propres des fondations usinées sont :

- pour le groupe G1, M1 = 775.7 grammes + 27,0 (vis + rotule) soit 802.7 grammes
- pour le groupe G1, M1bis = 656.7 grammes + 27,0 (vis + rotule) soit 683.7 grammes

3.6 Aménagement particulier du conteneur d'essais

Le conteneur d'essais embarqué dans la centrifugeuse est constitué de sous-ensembles (figure 9).

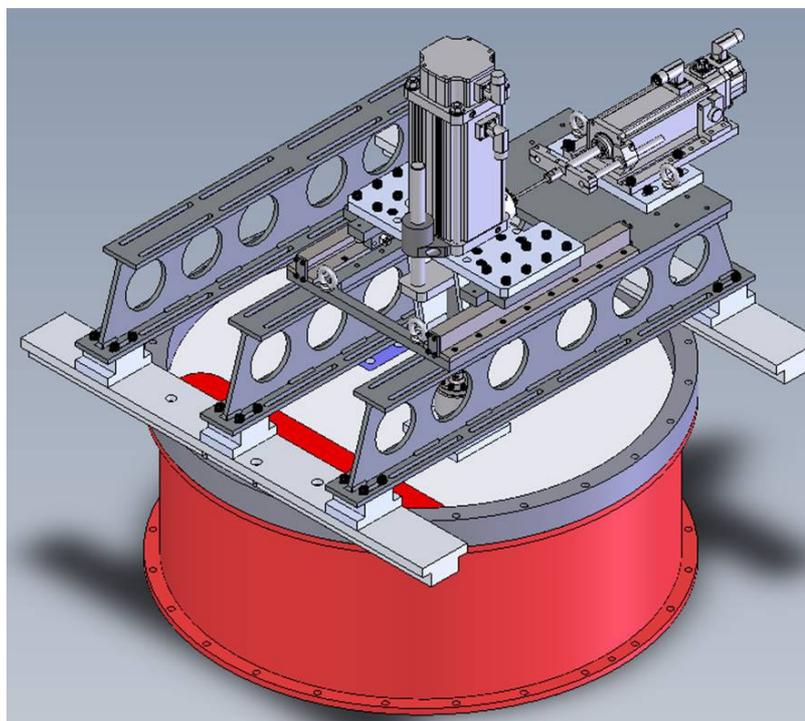


Figure 9 – Vue générale du montage mécanique

Certains sous-ensembles utilisent des dispositifs et matériels existants, utilisés de façon récurrente pour diverses applications (enveloppe métallique circulaire de diamètre 894 mm, poutre support-capturs, etc.). D'autres sont des matériels nouveaux ou adaptés pour la circonstance ; les développements particuliers, esquissés pour une meilleure compréhension du projet, ont fait pour la plupart l'objet d'un cahier des charges afin de finaliser leur réalisation.

Chaque nouvel élément fait l'objet d'un contrôle géométrique pour la plupart ou particulier, quand il s'agit d'autres aspects comme l'étanchéité.

3.6.1 – Aménagement de la plaque de fond

La plaque de fond est un matériel déjà existant. Dans le principe, on choisit d'introduire les inclusions dans le massif par sa base pour éviter des perturbations (renforcement non désiré du matelas) dues à la présence des câbles conducteurs provenant des capteurs équipant les inclusions.

Cette plaque en aluminium est équipée de canaux autorisant le drainage radial (figure 10).

Les groupes R1 (90 x 90mm) et R2 (72 x 72mm) sont distribués symétriquement sur un diamètre, lequel devient l'axe de référence du système (figure 4).

Seuls 2 fois 4 trous de diamètre 19 mm sont utilisés pour permettre l'introduction des inclusions ; des bouchons pleins adaptés vissés sont mis en place pendant la phase de consolidation du massif ; ils sont remplacés par des bouchons spéciaux équipant la base des inclusions instrumentées pour assurer le passage des câbles.

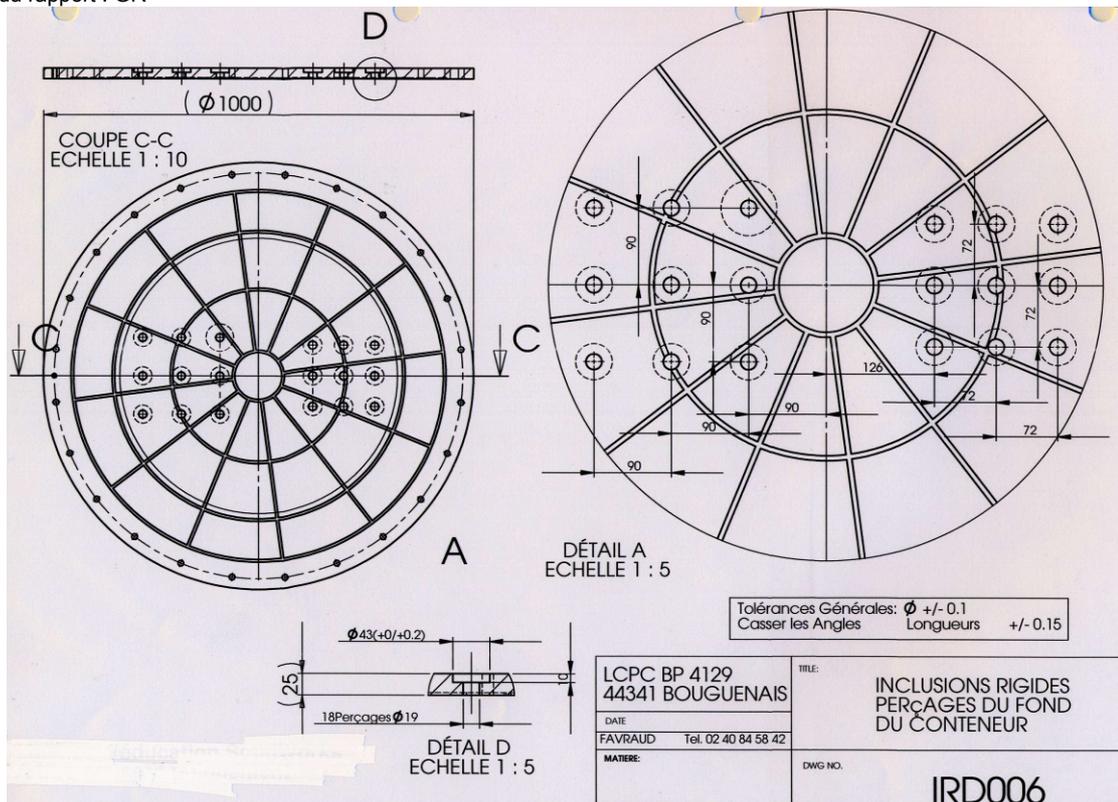


Figure 10 – Plan de réalisation de la plaque de fond de conteneur

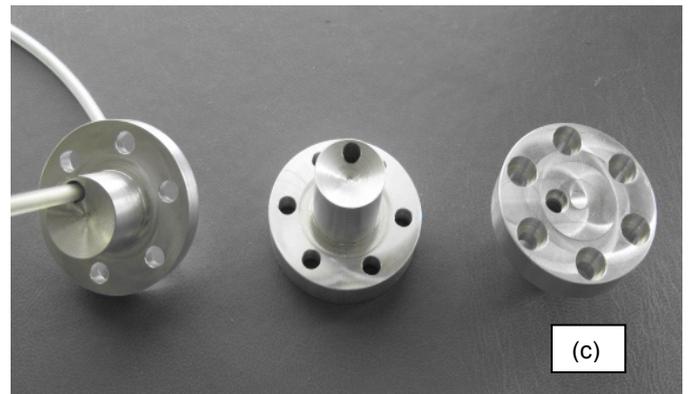
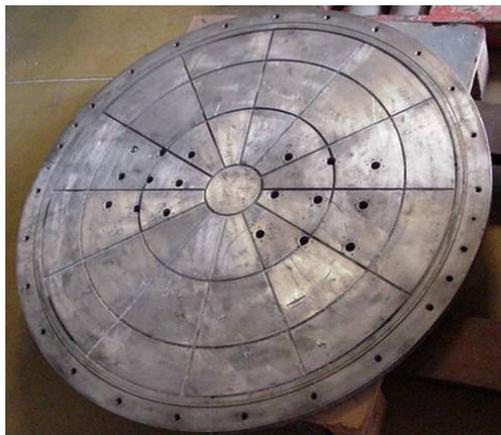


Figure 11 – Plaque de fond et détails des bouchons utilisés pour le passage de câble de capteur

3.6.2 – Aménagement du conteneur d'essai

Le conteneur d'essai est une enveloppe en acier de hauteur 360mm et de diamètre intérieur 894mm ; des trous filetés, disposés verticalement sur 4 génératrices permettent d'introduire dans le massif d'argile des sondes de pression interstitielles à différentes cotes (pas de 50mm). Ce conteneur reçoit des tourillons fixés sur un dispositif à joue (figure 12) présents sur 2 génératrices diamétralement opposées. Ce dispositif permet de retourner le conteneur de massif d'argile après sa phase de consolidation à 1G de façon à pouvoir introduire les inclusions par le fond du conteneur.

Pendant toute la durée du programme d'essais, ce conteneur spécialement aménagé est dédié à la réalisation des massifs d'argile reconstitués.



Figure 12 - Tourillons disposés sur 2 génératrices opposées pour assurer le retournement du conteneur d'argile

3.6.3 – Aménagement d'un anneau additionnel

Après la phase de consolidation en laboratoire, l'anneau additionnel utilisé exclusivement pour permettre la consolidation de la dernière couche la consolidation et conservé pendant les phases de retournement, est enlevé et remplacé par un second anneau qui supporte tous les dispositifs de chargement préréglés. L'anneau (figure 13) dont l'épaisseur fait 60mm permet d'ajuster la hauteur du matelas de transfert ($h_{\text{remblai modèle}}$ comprise entre 27 ou 16 mm), sans toucher à l'empilement de tous les autres éléments annexes.

Les plans de contacts avec les conteneurs hauts et bas sont munis d'une gorge recevant un joint corde pour assurer l'étanchéité.

Sur cet anneau sont montés les plats martyrs qui servent à la manutention de l'ensemble.

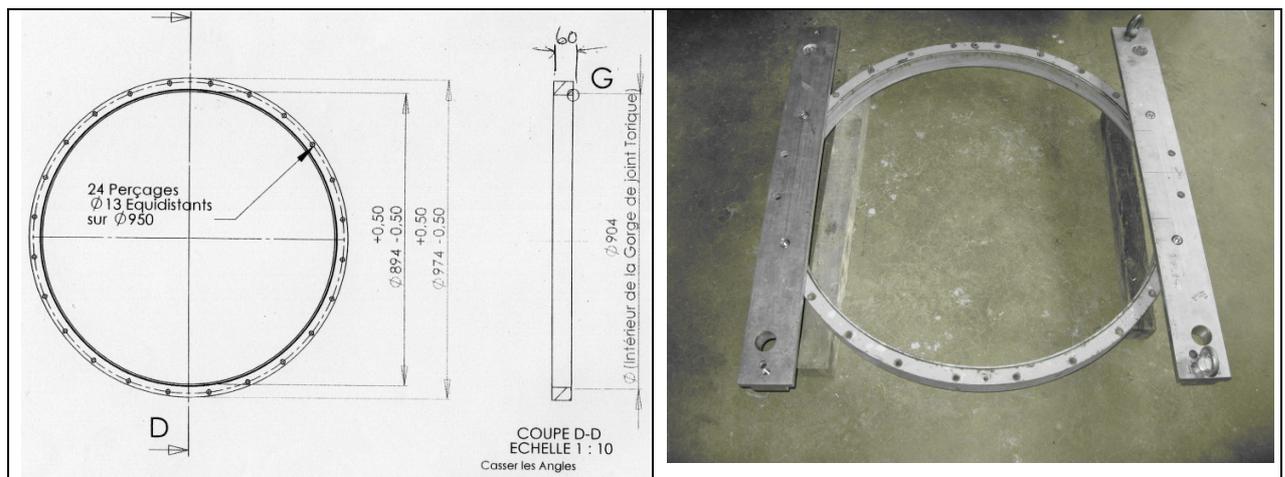


Figure 13 – Anneau additionnel pour rattrapage des jeux (hauteur de remblai variable)

3.6.4 – Dispositifs de chargement

Pour optimiser l'utilisation d'un massif de sol reconstitué (encombrement et temps de consolidation), il a été prévu de réaliser (quasi) simultanément 2 types d'essai dans un seul conteneur, l'un avec une charge verticale, l'autre avec une charge combinée ou horizontale. La figure 14 montre schématiquement en vue de dessus le positionnement possible des deux fondations en évitant toute interaction entre les zones d'essai.

Pour répondre aux spécifications du mode de chargement statique, on retient d'exécuter les essais en appliquant un type d'asservissement uniquement en déplacement selon les 2 composantes (figure 14) qu'elles soient appliquées simultanément ou individuellement.

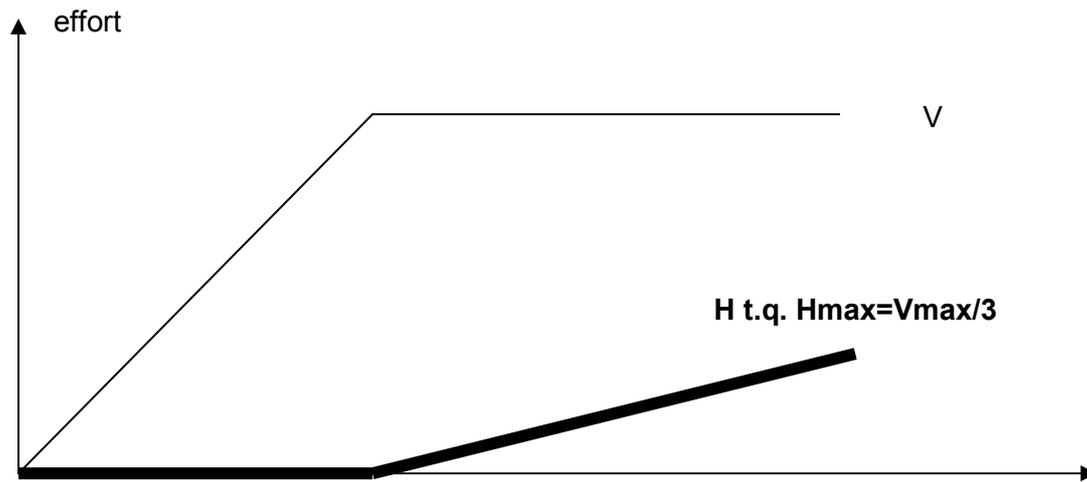


Figure 14 – procédure de chargement

Les vérins disponibles sont soit hydraulique, soit électrique. Ils sont pilotables indépendamment *via* un PC commun. Les vérins électriques offrent plus de souplesse d'utilisation. Compte tenu de la complexité du chargement combiné, le choix des vérins est ordonnancé de la façon suivante.

Tableau IX – Performances des vérins de chargement

Référence du vérin	Principe	Composante	Type d'essais	Effort (daN)	Course (mm)
EXLAR 50	Electrique	Vertical	V & C	750	150
EXLAR 30	Electrique	Horizontal	C	350	150
ASTEVA SV1	Hydraulique	Horizontal	H & C	2500	70

Les dispositifs de chargement accompagnés de leur instrumentation dédiée et associée sont intégrés dans des ensembles mécaniques qui leur sont propres mais restent néanmoins réglables compte tenu des aléas de préparation des massifs d'argile (cote finale).

Les dispositifs sont montés sur un ensemble composé de 3 poutres ajourées, espacées entre âme de 310.5mm et qui définissent 2 corridors, l'un où est localisé l'emplacement du groupe G1 (maille de 90 x 90, $\alpha= 3.1\%$) et le second où est localisé l'emplacement du groupe G2 (maille de 72 x 72, $\alpha= 4.9\%$).

Le vérin EXLAR 50 est positionné verticalement sur un berceau, dimensionné pour reprendre sa masse propre de 37kg ; le berceau peut être fixe ou mobile selon la nature de l'essai vertical ou combiné. La translation du berceau est assurée par 4 galets dont la piste de roulement est la face supérieure des poutres. Le piston du vérin est équipé d'une canne allonge au bout de laquelle est vissé un capteur d'effort (FGP FN 5138 T/C) ; sur l'autre face du capteur est vissée une pièce de liaison supportant la contre rotule qui vient au contact de la rotule hémisphérique posée sur la fondation ; l'application de l'effort à la fondation n'est opérée que pendant la phase d'approche : aucun autre chargement que le poids propre n'intervient pendant la phase de consolidation.

Le piston du vérin EXLAR 50 est équipé d'un système anti rotation et d'un capteur laser dédié de 300mm de course (Wenglor 80Hz).

Sous le berceau mobile, on trouve un guidage de la canne de transfert d'effort et une platine support des capteurs de déplacement de la fondation ; toute translation du vérin vertical entraîne la translation de la platine support capteurs : aucune correction de rotation du corps des capteurs dans le plan vertical n'est ainsi à opérer.

A noter que la canne d'effort est équipé d'un fusible mécanique qui protège le piston du vérin vertical si une opération intempestive du vérin horizontal venait perturber la procédure de chargement

La platine support capteurs peut recevoir au choix des capteurs laser sans contact ou des capteurs traditionnels type LVDT à contact par palpeurs. Quatre aménagements sont réalisés pour un besoin de 3 informations distribuées selon une géométrie carrée à proximité de chaque coin (espacement de 100mm).

- la moyenne arithmétique sur 2 mesures données par des capteurs situés diagonalement permet de suivre le tassement de la fondation

- la différence entre 2 mesures données par des capteurs consécutifs rapporté à leur espacement permet d'avoir la rotation de la fondation selon les 2 directions principales.

Le vérin EXLAR 30 est positionné horizontalement sur un support réglable et est utilisé essentiellement pour l'essai combiné ; c'est ce dispositif qui assure la translation du berceau supportant le vérin EXLAR 50 : il s'agit d'un poussage qui ne nécessite pas d'effort particulier. La liaison mécanique entre vérin-berceau est rigide et porte cependant un capteur de force qui permet de contrôler un accroissement d'effort parasite. Son pilotage est assuré en déplacement et sa vitesse est calquée sur le vérin hydraulique ASTEA qui exerce l'effort sur la fondation.

Le vérin hydraulique ASTEA SV1 est positionné dans un berceau horizontal réglable et bridé sur les plats martyrs solidaires des flancs de l'anneau additionnel vissé sur le conteneur (figure 13).

Son piston est équipé d'un col de cygne, ou pièce mécanique déportée en forme de S qui support le capteur d'effort et qui permet de corriger l'altitude du plan de traction en le rapprochant de la surface de l'argile sans toutefois l'atteindre.

Le nez du capteur est équipé d'un élément fileté sur lequel est monté un doigt vertical ; c'est ce doigt passant au travers de l'évidement situé sur le côté de la fondation qui assure, après contact, la traction sur la fondation.

Pour l'essai combiné statique, c'est ce vérin qui commande toute la procédure de déplacement du vérin EXLAR 30 qui exerce le poussage du chariot supportant le vérin EXLAR 50 (vertical). La vitesse de déplacement du vérin est contrôlée *via* le capteur de déplacement HBM qui l'équipe.

Les figures 15 et 16 rappellent les 3 configurations mises en œuvre pour les 2 types de montages retenus.

3.6.5 – chargement statique vertical et horizontal

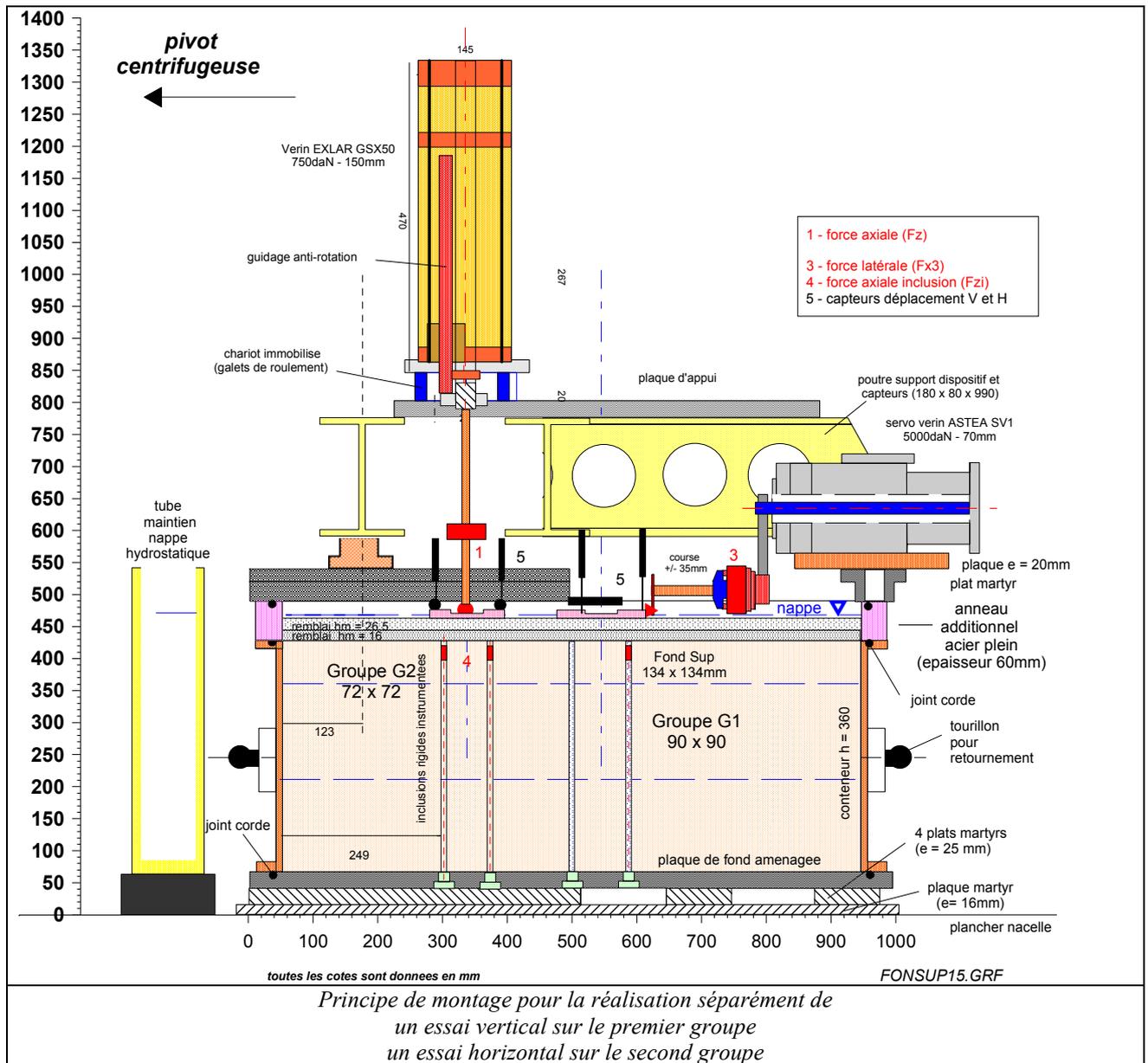


Figure 15 – Principe de montage pour la réalisation séparément de l'essai vertical et horizontal

3.6.6 – chargement combiné

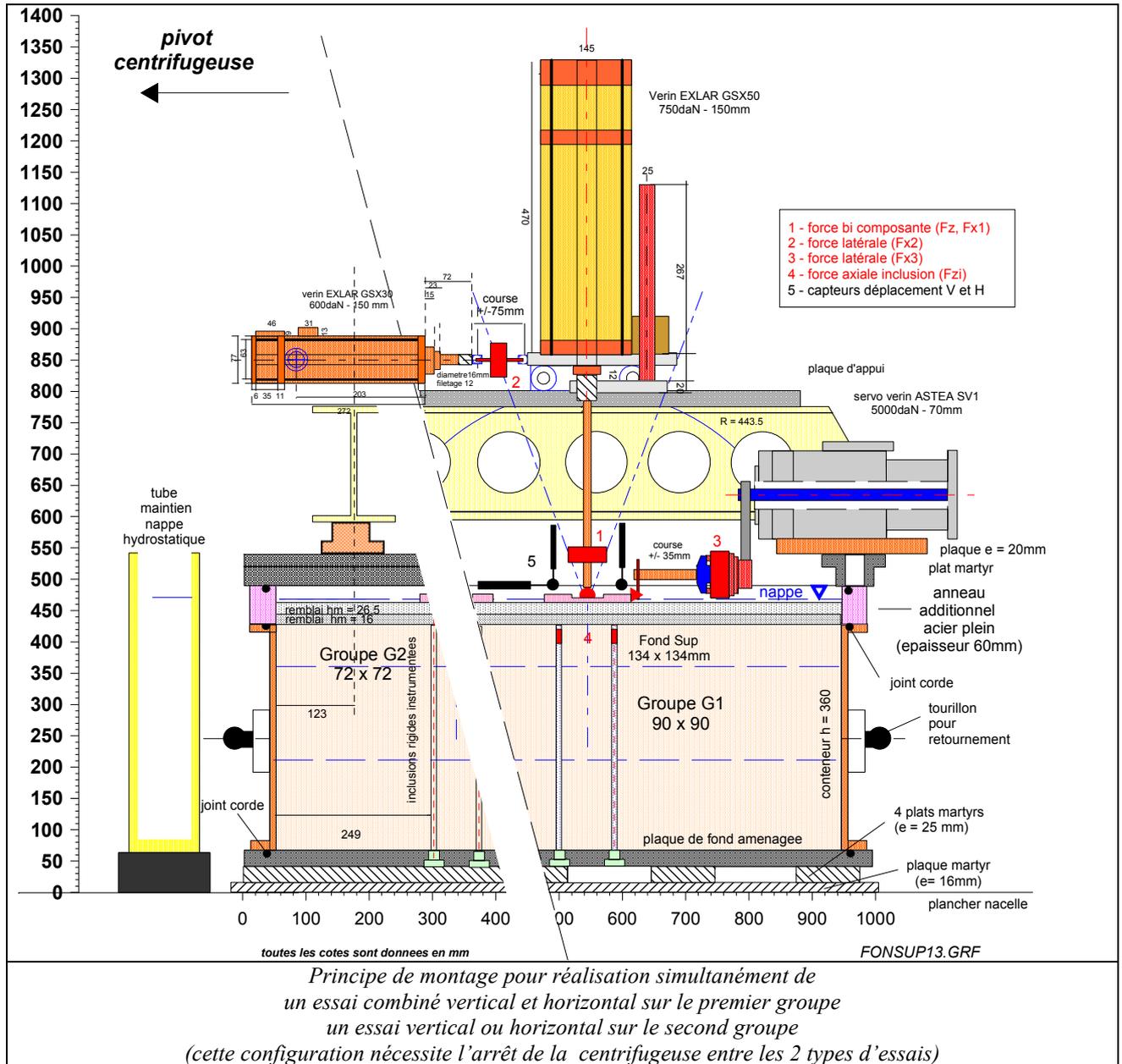


Figure 16 – Principe de montage pour réalisation simultanément de l'essai combiné

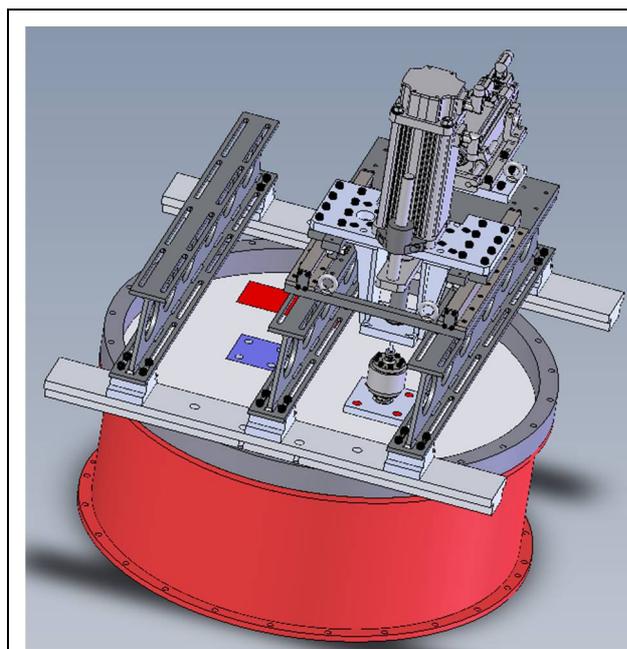


Figure 17 - Vue générale du dispositif combiné

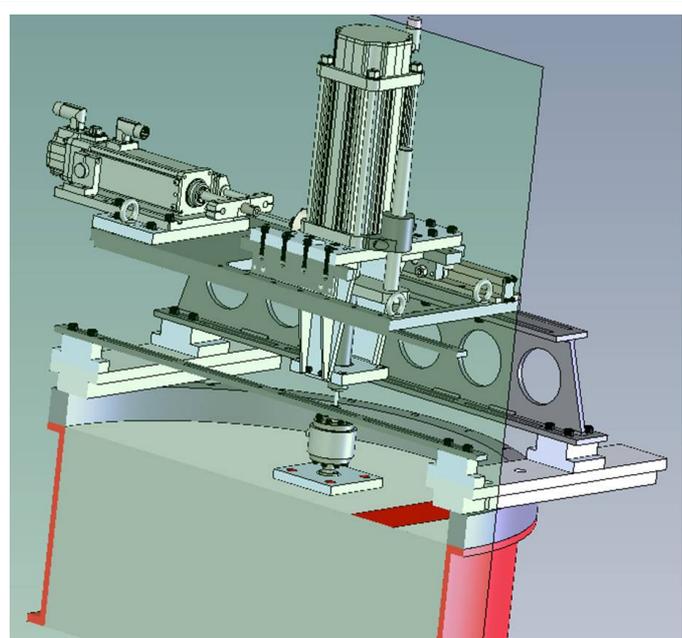


Figure 18 - Coupe du dispositif combiné

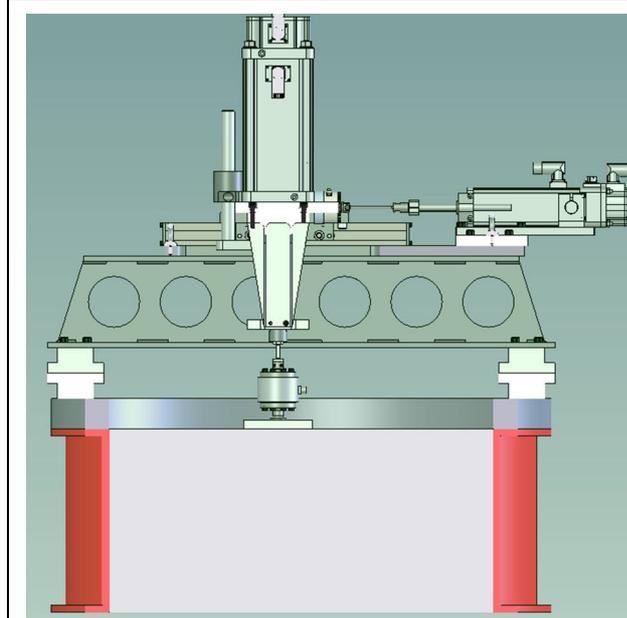


Figure 19 - Vue en coupe (axialement au rayon de la centrifugeuse)

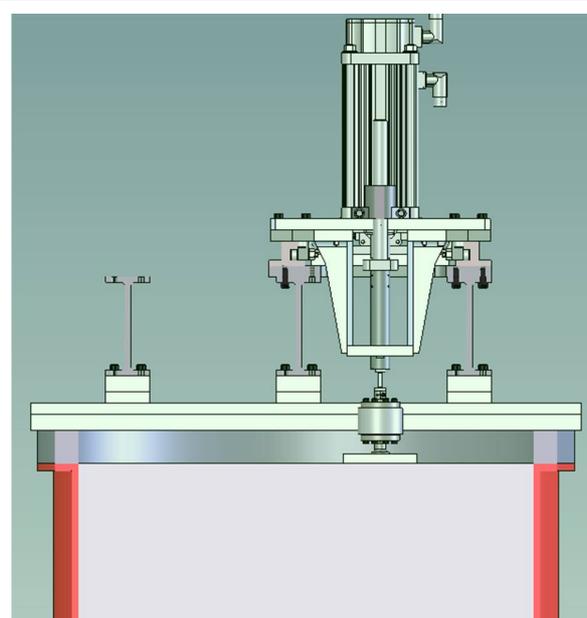


Figure 20 - Vue en coupe (direction de la rotation de la centrifugeuse)

Figure 21 – Exemple de montage du dispositif pour essai combiné en centrifugeuse

3.7 - Instrumentation

3.7.1 – Organisation

L'instrumentation à prévoir par conteneur d'essai (tableau X):

- 6 Spider HBM sont disponibles pour les expérimentations en centrifugeuse, de 8 voies chacun, soit **48 voies disponibles**

En effet, pour confirmer la symétrie des comportements dans les groupes d'inclusion (exemple mesure de déplacement au centre du groupe) ou pour doubler l'information (exemple pallier la défaillance d'une sonde de pression) pendant la phase de suivi de la consolidation qui précède le début du chargement des groupes d'inclusions, la mise à disposition de 6 Spider est confortable et permet de lever d'éventuels doutes sur les analyses globales.

Tableau X – Récapitulatif des capteurs utilisés et rappel de leur attribution

<i>Affectation et paramètres à mesurer</i>	<i>Type et nombre de capteur</i>	
	<i>Disponibles</i>	<i>distribution</i>
<i>Instrumentation inclusions</i>		
2 x 4 inclusions instrumentées (capteur de force FGP XF3044)	8 force	2000N
<i>Instrumentation associée</i>		
Pression interstitielle Druck (consolidation)	2 PPt (700kPa)	700 kPa
Mesure de la surcharge d'eau Druck	1 PPt (300kPa)	300 kPa
Mesure de la charge hydrostatique Druck à la base du massif de sol	1 PPt (700kPa)	300 kPa
<i>Instrumentation fondations</i>		
Tassement du sol hors zone d'essai (MCB)	2 LVDT	100mm
Cote du niveau d'eau (accroissement de la surcharge) (MCB)	1 LVDT	100mm
Déplacement de la fondation du groupe G1 (MCB ou laser)	3 LVDT	100mm
Déplacement de la fondation du groupe G1 (MCB ou laser)	3 LVDT	100mm
<i>Dispositif de chargement</i>		
Déplacement du servo Vérin EXLAR 50	1 laser	300mm
Déplacement du servo Vérin EXLAR 30	1 laser	300mm
Déplacement du servo Vérin ASTEA SV1	1 LVDT	± 50 mm
Mesure d'effort vertical FGP FN5138 T/C ou TME 521 TC	Pont complet Jauges	500daN
Mesure d'effort horizontal FGP FN3335 T/C	Pont complet Jauges	200daN
Mesure d'effort horizontal TME F521 TC	Pont complet Jauges	250 daN
<i>Instrumentation pour reconnaissance géotechnique</i>		
Résistance en pointe qc (capteur de force)	1 force	500N
Mesure de l'enfoncement (déplacement vertical en z)	1 LVDT	300mm
Mesure du déplacement latéral (positionnement x du dispositif)	1 LVDT	500mm
Nombre de voies de mesure		
	30	

3.7.2 – Reconnaissance en vol

Pour contrôler les caractéristiques du massif de sol pendant les phases d'essais (consolidation, étapes de l'application de la charge,...) des reconnaissances méthodiques sont envisagées en utilisant l'espace restreint entre les poutres qui supportent les dispositifs en utilisant le pénétromètre mobile électrique ; il présente l'avantage de pouvoir obtenir un profil en continu et est exécuté loin de toute zone d'influence.

4 profils peuvent être envisagés pendant toute la durée d'un essai (sans arrêt de la centrifugeuse) :

- 1 premier profil en fin de la période de consolidation,
- 1 second après le premier essai de chargement,
- 1 troisième avant le second essai de chargement, notamment si celui-ci est précédé d'une période d'arrêt de la centrifugeuse pour transfert des dispositifs d'essais ; une nouvelle phase de consolidation s'impose.
- 1 dernier après le second essai de chargement.

La poutre supportant le chariot mobile qui assure le positionnement de l'un ou l'autre des moyens cités a été équipée d'un système de contrôle de positionnement muni d'un ensemble de sécurités informatiques et électriques qui viennent compléter les sécurités mécaniques déjà existantes ; le pilotage est assuré et contrôlé par un logiciel indépendant du système d'acquisition embarqué.

4 - Montage expérimental

La réalisation d'un essai passe obligatoirement par un ensemble de phases chronologiques qui s'accompagnent d'un ensemble de relevés et de contrôles quelque soit la nature de l'opération : la préparation se décline en 3 phases principales :

- 1 - la reconstitution du massif de sol en laboratoire
- 2 - l'équipement et la préparation de l'instrumentation interne au massif.
- 3 - l'équipement et la préparation du modèle sur la centrifugeuse
- 4 - démontage des dispositifs d'essais

Une série de photos récapitule les différentes phases de préparation.

4.1 – Reconstitution du massif de sol en laboratoire

Le massif de sol est préparé par une méthode dite de consolidation couche par couche en laboratoire. Cette méthode de préparation est parfaitement rodée : un double lit de géotextile drainant est posé sur le fond du conteneur qui prend en sandwich une couche de sable drainant afin d'assurer à la fois un drainage axial et radial à la base de l'échantillon ; dans le cas présent, sa particularité est de posséder deux fenêtres carrées sensiblement égales aux dimensions des fondations posées en surface à l'aplomb de chacun des groupes de 4 inclusions ; cet artifice permet d'introduire par la suite les inclusions lorsque la reconstitution du massif sera achevée sans risque d'entraîner des particules de sables qui pourraient modifier les parois du trou de forage. La boue de mélange argile-sable à 20% (teneur en eau visée de 75 à 80%) préparée initialement dans un malaxeur est ensuite coulée dans le conteneur par l'exutoire placé sous le malaxeur: le volume mis en œuvre est déterminé à partir d'une estimation de la hauteur finale souhaitée sous la contrainte qui sera appliquée ; l'objectif étant d'avoir une répartition spatiale des 3 couches sans disparité trop importante. La mise en place est répétée identiquement pour les 3 couches.

La procédure de consolidation couche par couche consiste à appliquer des paliers croissants de chargement selon un programme de chargement prédéfini, la contrainte finale appliquée sur la couche C_n la plus basse étant toujours supérieure à la couche C_{n-1} ; l'objectif est de cibler par défaut le diagramme de cohésion à atteindre pendant la centrifugation.

La contrainte est appliquée au moyen d'une presse hydraulique qui est autorégulée en fonction du tassement sous charge. Le drainage en haut et la base de l'échantillon est imposé pendant cette phase préparatoire.

Le conteneur utilisé pour cette opération a une hauteur de 360mm (correspondant à la longueur des inclusions) ; un anneau additionnel de 160mm est ajouté temporairement pour garantir la hauteur finale du massif lors de la consolidation de la dernière couche.

A l'issue de cette phase préparatoire (de l'ordre de 3 semaines), le processus de reconstitution est arrêté pour passer à la seconde phase d'équipement.

4.2 – Equipement et préparation de l'instrumentation interne au massif

Le dégagement de la presse de consolidation permet d'accéder au plan du massif d'argile ; la cote du sol finale est impérativement comprise entre 360mm et 420mm.

Un film en plastique souple débordant largement les parois du conteneur est alors déposé en faisant épouser au mieux les congés circulaires intérieurs du conteneur; après cette opération on vient compléter l'espace libre dans l'anneau additionnel par une couche de sable propre qui, de ce fait, est isolé du massif d'argile.

La couche de sable est surfacée pour pouvoir poser un fond circulaire en aluminium qui est solidarisé par vissage au conteneur de sol. Le massif étant alors emprisonné, il peut être procédé au retournement du conteneur par suspension au moyen d'un système à tourillons.

En effet, on rappelle que l'introduction des inclusions se fait par le fond du conteneur après la phase délicate de retournement (poids du conteneur de l'ordre de 520 kg) et que ce choix est consécutif du fait que l'on s'assure ainsi de tout risque de drainage parasite par des câbles de liaison des capteurs de force

4.2.1 – La mise en place des inclusions dans le sol

La mise en place est une suite de sous-séquences qui nécessitent un ordonnancement soigné.

Après retrait des bouchons obturateurs, le dispositif de forage est posé sur le conteneur: il est équipé d'une tarière guidée verticalement par un système à coulisseau la tarière (mèche à bois au diamètre légèrement supérieur au diamètre de l'inclusion)

Une tarière de diamètre 19.8mm et de longueur 560mm est utilisée pour garantir une mise en place correcte des inclusions instrumentées : on évite ainsi que le trou de forage ne se referme et on s'affranchit du risque de collage du matériau sur le fût de l'inclusion.

La rotation de la tarière est assurée manuellement en évitant qu'elle ne descende trop rapidement (passes d'environ 50mm) ; la remontée de la tarière est effectuée en maintenant la rotation toujours dans le sens du forage pour éviter de déposer du matériau sur les parois du trou de forage; la tarière est nettoyée de ses copeaux d'argile et l'opération est répétée jusqu'à la cote finale du forage matérialisée par une butée mécanique sur le guidage.

Un joint torique est positionné dans la gorge de l'embase de l'inclusion ; ce joint en s'écrasant au serrage garantit qu'aucune fuite ne peut se produire à la base de l'inclusion (risque de drainage local autour du fût de l'inclusion). L'inclusion appairée peut alors être introduite par simple poussage dans le forage. La dernière opération consiste à visser l'embase de l'inclusion dans son logement.

Seule, l'opération de mise en place des 8 inclusions dure environ 5 heures (positionnement, contrôle de la verticalité, forage, nettoyage,...). Tous les câblages sont alors protégés, maintenus et orientés vers la génératrice du conteneur la plus proche des chaînes d'acquisitions embarquées.

4.2.2 – Dépose du matelas granulaire

Une deuxième phase de retournement peut alors être envisagée pour rendre accessible le plan supérieur du massif. Le faux fond de conteneur est alors enlevé, le sable évacué et le film plastique retiré. L'opération consiste à désolidariser l'anneau additionnel qui laisse apparaître l'excès d'argile de la dernière couche consolidée (excédent de 5 à 20mm) ; cet excédent est enlevé par une méthode d'arasement par passes successives afin d'atteindre la puissance finale du massif de 360mm.

L'anneau additionnel peut alors être repositionné : un repérage circulaire interne permet de contrôler la dépose du matériau granulaire (matelas de 26.4mm). Grâce à ce repère, le contrôle de la masse volumique du matelas peut être confirmé.

Pendant cette phase, les sondes de pression interstitielle destinées à suivre la phase consolidation en centrifugeuse sont mises en place ; chaque sonde est introduite dans un forage horizontal réalisé au travers de l'enveloppe du conteneur ; les deux sondes sont localisées dans des plans horizontaux parallèles espacés de 100mm et sur une génératrice éloignée des 2 réseaux d'inclusions et de la zone affectée à la reconnaissance au pénétromètre.

4.2.3 – Mise place des compléments d'équipement

La préparation est poursuivie par la pose de l'ensemble du dispositif de chargement (poutraison, chariotage du dispositif de chargement vertical, vérin électrique de translation, vérin hydraulique de chargement horizontal). Tous les équipements connexes sont pré-installés et pré-réglés (pénétromètre électrique, capteurs de déplacement LVDT,...) néanmoins tous les réglages fins sont réalisés en dernier recours avant démarrage de la centrifugeuse.

Le montage ainsi constitué peut alors être acheminé vers la centrifugeuse ; le poids total de l'équipage embarqué est de l'ordre de 1590 kg.

4.3 - Equipement et la préparation du modèle sur la centrifugeuse

Sur la centrifugeuse, des dispositions particulières sont à prendre concernant l'orientation du conteneur dans la nacelle (figure) à cause des encombrements du vérins hydraulique qui se trouve en porte à faux sur le bord du conteneur ; cette orientation est cependant intéressante car elle permet d'intervenir sur le montage et favorise les accès autour des fondations et facilite de ce fait tous les réglages. Si une permutation des dispositifs de chargement est envisagée, ce choix ne fera que la faciliter.

La poutre du pénétromètre électrique ne peut être utilisée sous sa configuration habituelle car le risque de collision du pénétromètre mobile avec les poutres disposées orthogonalement à la direction de la zone de reconnaissance n'est pas nul.

Le conteneur d'essai est relié à un tube de hauteur équivalente par l'intermédiaire de pipes connectés à la base au conteneur et en tête du conteneur ; ce tube est rempli d'eau pour permettre d'imposer la cote de la nappe et, en conséquence, d'imposer le gradient hydrostatique dans le massif de sol compressible.

Tous les capteurs sont connectés, réglés (course des capteurs de tassement) et contrôlés ; toutes les mesures seront initialisées à zéro à 1G quelques heures avant le démarrage du programme de consolidation afin de s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble ; le dispositif d'essai est prêt.

4.4 – Démontage des dispositifs d'essais

La phase de démontage est une phase importante dite de « retour d'expérience » où l'on va pouvoir faire un ensemble d'observations visuelles et de contrôles qui seront utiles pour la suite du programme d'essai. Le dépouillement du conteneur s'effectue d'abord par le retrait de tous les dispositifs connexes latéraux et propres aux fondations ; le montage permet de désolidariser seulement l'anneau supérieur dédié et posé sur le conteneur en le laissant équipé de tous les dispositifs de chargement (poutre platine, chariotage, vérin, poutre support capteurs, etc,...). La reconduction pour l'essai suivant en est facilitée.

Le conteneur de massif de sol étant alors accessible, on procède d'abord au retrait du matelas de sable dont on vérifie la teneur en eau. Le plan de l'interface matelas argile permet déjà de contrôler la régularité des maillages et au besoin de vérifier les tassements différentiels entre tête d'inclusions et centre des mailles.

Un carottage sur la hauteur du massif est alors réalisé qui permet après découpage d'obtenir une douzaine d'échantillons de 30 mm d'épaisseur chacun ; les mesures de teneur en eau qui sont effectuées permettent de tracer un profil en fonction de z dont on déduit également un profil de densités.

Le massif est alors détruit jusqu'au dégagement total des inclusions en vérifiant à l'avancement le contrôle de leur inclinaison. Les inclusions sont retirées, nettoyées avec beaucoup de soin. Le contrôle de la réponse des capteurs de force est effectué *a posteriori* et, au besoin, une nouvelle calibration est effectuée, inclusion non démontée, pour confirmer les coefficients retenus.

En dernier lieu le conteneur est à nouveau préparé avec les bouchons de fond de plaque pour pouvoir redémarrer la reconstitution d'un nouveau massif de sol ; les phases de consolidations sont reconduites comme précédemment.





Figure 22 – planche photographique

- Photo 1 – préparation des trous pour passage des inclusions rigides par le fond du conteneur
 Photo 2 - mise en place des bouchons étanches sur chacune des zones d'essais
 Photo 3 - repérage et implantation des 2 zones d'essais
 Photo 4 - mise en place de gabarit pour limiter le dépôt de sable drainant
 Photo 5 - coulage de la boue d'argile sur la couche de géotextile de protection.
 Photo 6 - remplissage par gravité à concurrence de la hauteur initiale nécessaire à la première couche
 Photo 7 - surfacage manuel de la couche finale avant pose du géotextile drainant et du piston
 Photo 8 -

5 - Programme expérimental

5.1 - Calendrier des essais en centrifugeuse

Pour ce type d'essai, l'organisation prévoit de les programmer en deux phases réparties sur une semaine ; elles peuvent enchaînées sans arrêter la centrifugeuse (conteneur C01) ou planifiées avec une période d'arrêt pour permettre la permutation des dispositifs de chargement quand cela est nécessaire (conteneur C02 à C05). Les périodes de repositionnement entraînent systématiquement des contrôles à ne pas sous estimés et qui pénalisent globalement la durée de la campagne.

Pour chacune des phases, c'est à dire un essai, la durée prévisionnelle globale du temps de rotation est de l'ordre de 10 à 11 heures ; celle-ci comprend la phase de consolidation en ayant pour objectif d'atteindre un degré de consolidation de 85% et la phase de chargement par paliers.

Tableau XI - organisation type d'une campagne de 2 essais consécutifs avec un arrêt de la centrifugeuse

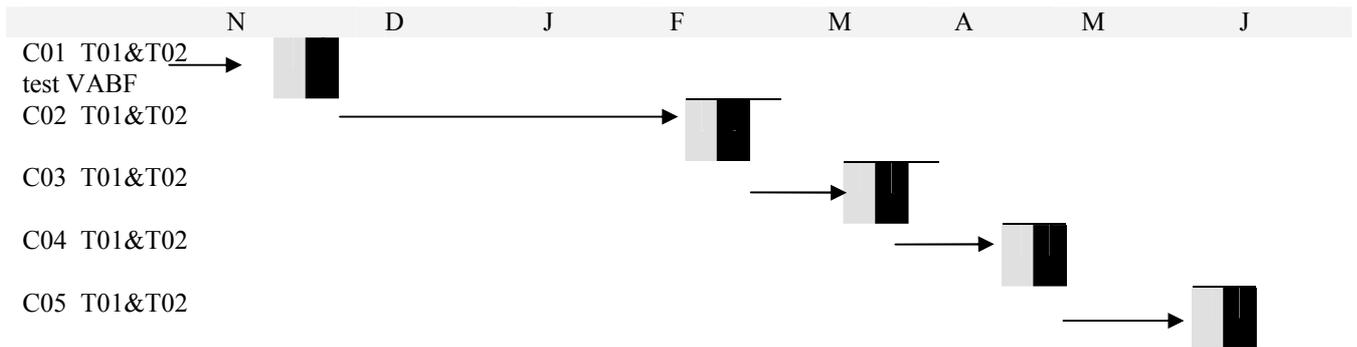
	L	M	M	J	V
Preparation globale (montage & démontage)					
Preparation C01-T01 (équipement & contrôle)					
Essai C01-T01 (consolidation & chargement)					
Preparation C01-T02 (équipement & contrôle)					
Essai C01-T02 (consolidation & chargement)					

En amont de l'essai, hors centrifugeuse, le temps d'équipement et de l'instrumentation du modèle est de l'ordre de 4 jours, et avant d'y arriver, il aura été nécessaire de prévoir un temps de reconstitution du massif de sol de l'ordre de 3 semaines pour la mise en œuvre de 3 couches.

Ce étant, l'optimisation du programme d'essai passe obligatoirement par un respect *a minima* du phasage présenté : à partir de ces éléments, et sur la base de la réception prévisionnelle de tous les dispositifs en instance de fabrication et d'approvisionnement, il est possible de proposer un programme général de réalisation des essais pour une seule hauteur de matelas : l'organisation générale est présentées sous forme du tableau planning suivant.

En temps masqué, hors centrifugeuse, n'apparaît pas le détail des opérations passées et nécessaires au contrôle des dispositifs instrumentaux, opérations récurrentes lorsqu'il s'agit notamment du calibrage de capteur enfouis. Les autres capteurs et les dispositifs connexes étant, autant que faire se peut, dédiés à ce montage particulier depuis le début du programme d'essais.

Dans la colonne faisant référence à l'essai, il n'est pas précisé si les 2 essais sont enchaînés avec ou sans phase d'arrêt de la centrifugeuse entre essais



5.2 – planning de préparation des massifs de sol

L'ensemble des massifs de sol préparés pour ce programme d'essai sont reconstitués à partir de la réutilisation de blocs déshydratés déjà préparés aux proportions requises. L'ajout d'eau pour obtenir le mélange parfait peut différer d'un conteneur à l'autre ; la teneur en eau initiale va donc être un facteur déterminant pour prolonger ou non la durée du premier palier appliqué. Ceci combiné avec les hasards du calendrier conduit à ne pas respecter *stricto sensus* les mêmes programmes de chargement d'un conteneur à un autre.

L'objectif final est cependant de viser des valeurs de contraintes aussi proches que possible pour les mêmes couches. La durée du dernier palier sur la couche considérée est maintenue au moins 24 heures de façon à l'homogénéiser ; cette information est donnée par la prise en compte de la mesure du tassement en surface. Si le massif doit rester plusieurs jours sous la même contrainte finale, on veille simplement que la surface soit toujours recouverte d'eau.

La figure 23 présente le programme de reconstitution du premier massif de sol, couche par couche. On rappelle que la numérotation des couches est incrémentée de la base du conteneur (première couche déposée) vers le haut.

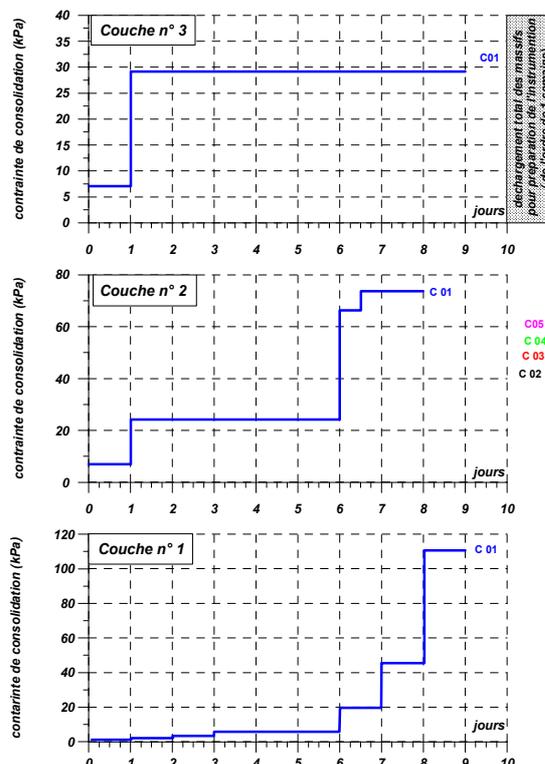


Figure 23 - planning de reconstitution du massif de sol C01

6 - Choix du matelas de transfert de charges

Le matelas de transfert de charge choisi pour les essais est en tous points identique à celui qui a déjà été utilisé pour les essais menés dans le cadre de la thèse de Baudouin (2010) et Okyay (2010). Son choix a été reconduit de façon à inscrire ces essais dans la continuité des programmes et, à la base, toujours pour les mêmes critères, notamment parce qu'il simule les matériaux fréquemment utilisés comme matelas de transfert de charge sur les chantiers d'inclusions rigides où les reports de charges par effet voûte ont pu être identifiés.

6.1 - Paramètres physiques

Les ouvrages renforcés par inclusions rigides mettent en œuvre généralement des graves B3 en tant que matelas granulaire de transfert de charges. Ces graves B3, caractérisées par la classification GTR, ont un diamètre des plus gros granulats de 31,5 mm.

Pour obtenir une granulométrie étalée et continue, cinq fractions de sable d'Hostun ont été mélangées, en proportions égales : HN 38, HN 34, HN 31, HN 0,4/0,8, et HN 0,6/1. Le choix de ce sable a été privilégié pour deux raisons :

- l'existence de 7 fractions granulométriques disponibles permet de faire varier les fractions utilisées et leur proportion au sein du mélange afin de faire correspondre la courbe granulométrique du mélange à la courbe granulométrique du matelas réel ;
- l'angularité élevée du sable d'Hostun favorise le développement d'efforts de cisaillement dans le matelas et représente mieux un matelas graveleux.

Le mélange des 5 fractions en proportions égales est réalisé dans un malaxeur, en versant toutes les fractions en même temps, afin d'améliorer l'homogénéité du mélange. La granulométrie du mélange obtenu est ensuite contrôlée par granulométrie laser. Ce contrôle permet de mesurer les écarts de granulométrie entre deux prises d'essai.

La figure 24 présente les résultats des courbes granulométriques ainsi que l'écart granulométrique entre deux prises d'essai afin d'évaluer l'homogénéité du mélange.

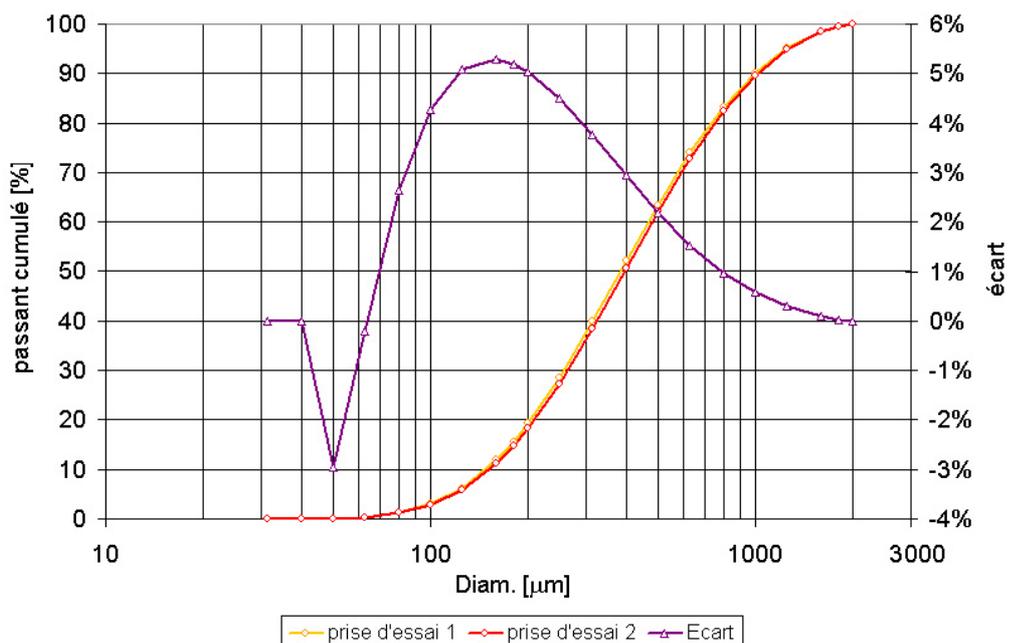


Figure 24 - Contrôle de l'homogénéité du mélange (Baudouin et al., 2008)

Les écarts mesurés restent inférieurs à 6 % entre deux échantillons d'une même gâchée. Ces valeurs sont plus faibles que celles obtenues par d'autres modes de mélange (brassage manuel, couches successives de chaque fraction par exemple).

Les caractéristiques physiques des différentes fractions et du mélange sont données dans le tableau XIV . Le tableau XV présente les principales caractéristiques du mélange de sables d'Hostun et les courbes granulométriques des fractions et du mélange de sables d'Hostun sont représentées sur la figure

Tableau XIV - Caractéristiques granulométriques du sable d'Hostun (Grosseau, 2007)

	HN 38	HN34	HN31	HN 0,4/0,8	HN 0,6/1,6	Mélange	d_x : diamètre de la maille du tamis (\square m) pour lequel on obtient x% de passant
d10	80	145	220	455	650	125	C_U : coefficient d'uniformité = d_{60}/d_{10}
d30	100	205	280	550	790	220	C_C : coefficient de courbure = $d_{30}^2/(d_{10}d_{60})$
d50	130	225	320	635	880	320	C_E : coefficient d'étalement = d_{90}/d_{10}
d60	145	235	345	680	905	440	C_S : coefficient de symétrie = $d_{50}^2/(d_{10}d_{90})$
d90	200	285	440	815	980	880	
Cu	1,81	1,62	1,57	1,49	1,39	3,52	
Cc	0,86	1,23	1,03	0,98	1,06	0,88	
Ce	2,50	1,97	2,00	1,79	1,51	7,04	
Cs	1,06	1,23	1,06	1,09	1,22	0,93	

Tableau XV - Principales caractéristiques du mélange de sables retenu (Dupla et al., 2008)

Matériau	d_{10} (mm)	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	c_U (-)	c_C (-)	ρ_{dmin} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	e_{min} (-)	e_{max} (-)	ρ_s (g/cm ³)
Mélange	0,125	0,320	0,880	3,52	0,88	1,40	1,73	0,532	0,893	2,65

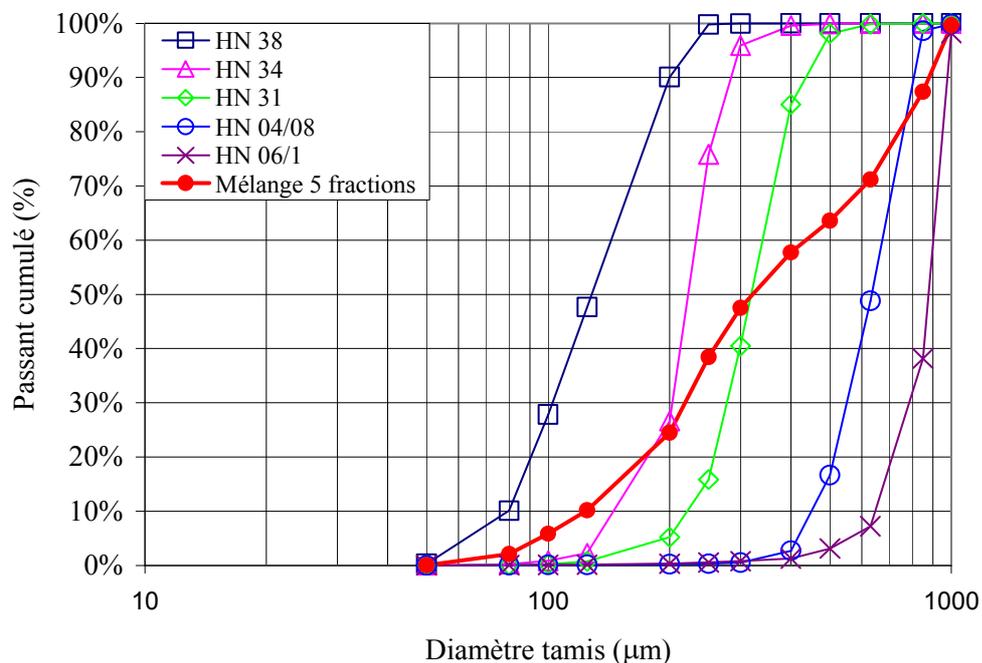


Figure 25 - Courbe granulométrique des fractions et du mélange de sable d'Hostun (Morgon, 2010)

7 - Préparation et caractéristiques des massifs de sol centrifugés.

7.1 - Notations

Δh	$h_i - h_f$
Δe	variation d'indice des vides pendant la consolidation à 1g
\square	pois volumique du sol
γ_{initial}	pois volumique déterminé pendant la consolidation à 1g
γ_{final}	pois volumique déterminé après les essais en centrifugeuse
γ_s	pois volumique des grains solides
\square_v	dernière contrainte verticale maximum appliquée lors de la consolidation à 1g
e_i	indice des vides initial (calculé à partir de w_i)
e_{f1}	indice des vides à la fin de la consolidation à 1g . $e_{f1} = e_i - \Delta e$
e_{f100}	indice des vides après essai en centrifugeuse (calculé à partir de w_f)
h_f	hauteur finale d'une couche de sol (après consolidation à 1g)
h_i	hauteur initiale d'une couche de sol (avant consolidation à 1g)
S_r	Degré de saturation
S_u	Cohésion non drainée
w_f	teneur en eau finale mesurée d'une couche de sol (après essai en centrifugeuse)
w_i	teneur en eau initiale mesurée d'une couche de sol (avant consolidation à 1g)

7.2 - Remarques préliminaires

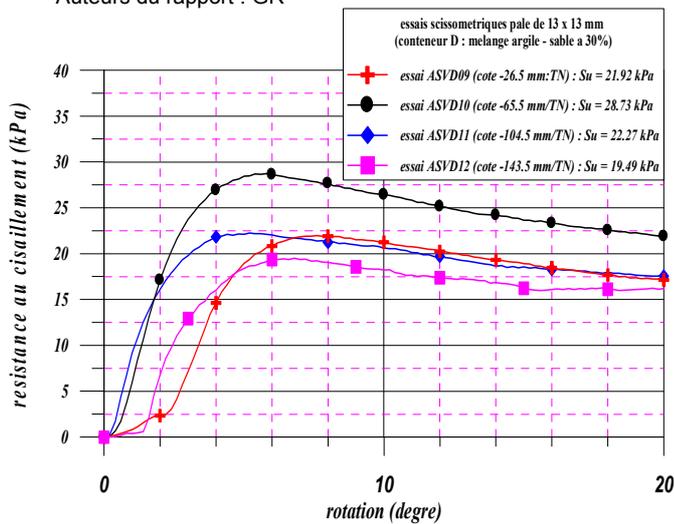
On rappelle que le choix de retenir un mélange agile-sable à 20% fait suite à une campagne d'essais réalisée en février et mars 2008 sur différents types de mélange ; l'objectif étant de comparer leur comportement en terme de compressibilité et de déterminer parallèlement une corrélation Qc-Su pour chacun d'eux.

En premier lieu, une caractérisation sur des éprouvettes en laboratoire a été réalisée afin d'en déterminer les paramètres intrinsèques utiles pour l'interprétation des essais en centrifugeuse (cf. travail de thèse de G. Baudouin).

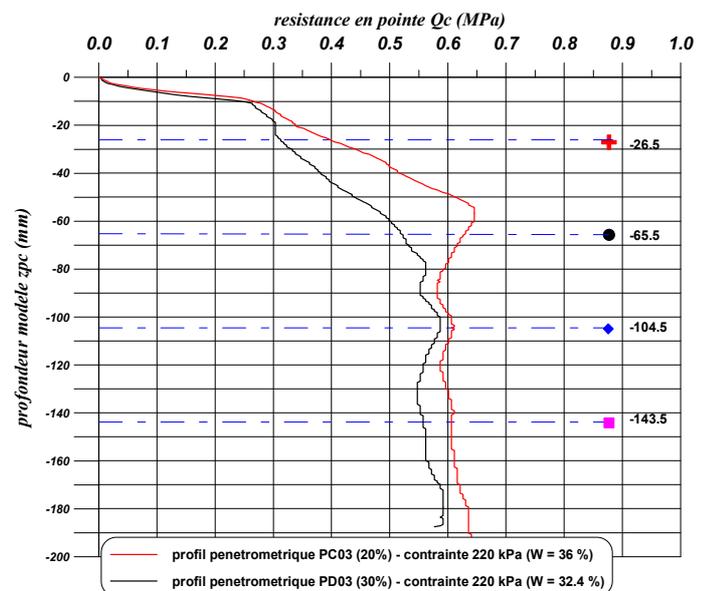
En second lieu, quatre échantillons de sol avaient ainsi été reconstitués dans des moules particuliers (ϕ 300mm) et soumis à un programme de chargement de type oedométrique,

- * 1 avec de la kaolinite pure,
- * 2 avec un mélange kaolinite-sable à 20% (échantillon doublé pour répétabilité),
- * 1 échantillon avec un mélange kaolinite-sable à 30%.

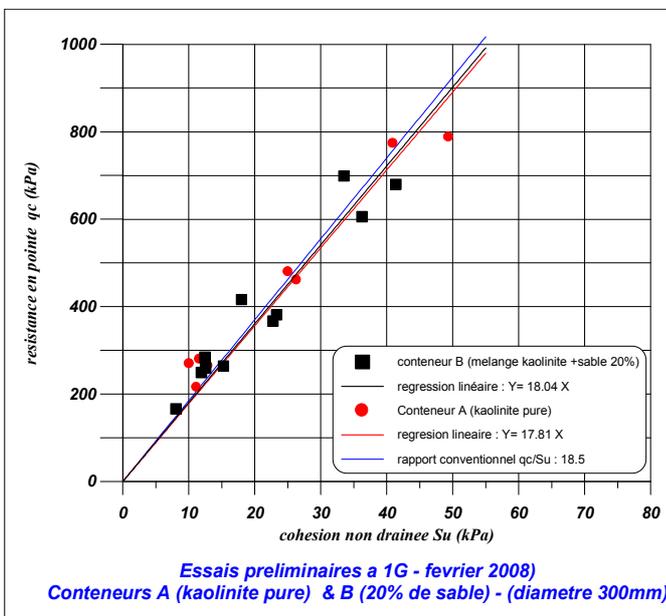
Dans chaque échantillon, plusieurs profils de reconnaissance au scissomètre et pénétromètre ont été exécutés sous différents états de chargement afin de déterminer une corrélation Qc-Su pour chaque type de mélange. Un exemple de reconnaissance type pour un chargement donné où les 2 méthodes d'investigation ont été mise en œuvre et les familles de courbes qui ont permis de tracer les corrélations présentées sont présentés dans la figure 26.



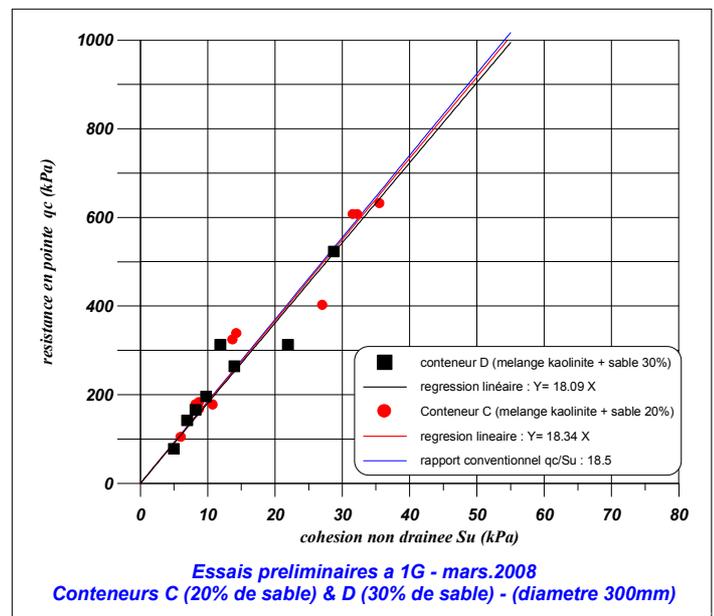
Exemple de profils scissométriques exécutés pour une charge de 220 kPa (source rapport ASIRI 2.07.3.08)



Exemple de profils pénétrométriques réalisés simultanément (source rapport ASIRI 2.07.3.08)



Essais préliminaires à 1G - février 2008
Conteneurs A (kaolinite pure) & B (20% de sable) - (diamètre 300mm)
Corrélation scisso-pénétro pour 2 types d'échantillons kaolinite pure et mélange kaolinite-sable à 20% (source rapport ASIRI 2.07.3.08)



Essais préliminaires à 1G - mars.2008
Conteneurs C (20% de sable) & D (30% de sable) - (diamètre 300mm)
Corrélation scisso-pénétro pour 2 types de mélange kaolinite-sable à 20% et 30% (source rapport ASIRI 2.07.3.08)

Figure 26 - campagne préliminaire et détermination d'une corrélation Q_c/S_u

7.3 – Eléments de la fiche signalétique d'un massif

Les massifs de sol reconstitués permettent une détermination *a posteriori* des paramètres intrinsèques de caractérisation qui leur sont propres ; dans les **tableaux** , on trouve ainsi pour chaque couche d'un massif les éléments qui en permettent la détermination :

- Le numéro de la couche (la couche n°1 correspond à la couche drainante de sable déposée à la base du conteneur, la couche n°2 correspond à la première couche d'argile déposée au dessus de la couche de sable).
- La hauteur initiale h_i , la hauteur finale h_f et les tassements mesurés Δh en millimètres.
- La teneur en eau initiale w_i % (à partir d'un prélèvement de la boue d'argile à la fin du mixage) et la teneur en eau finale w_f % après démoulage de l'échantillon.
- La dernière contrainte (maximum) appliquée sur la couche pendant la phase de consolidation (σ_v en kPa).
- L'indice des vides initial (e_i) calculé à partir de la teneur en eau initiale.

- La différence Δe est déterminée à partir du tassement mesuré rapporté à la hauteur initiale de chaque couche pendant la phase de consolidation à 1G.
- L'indice des vides final e_{f1} à la fin de la phase de consolidation à 1G en laboratoire et déterminé par $e_{f1} = e_i - \Delta e$.
- L'indice des vides final e_{f100} calculé à partir de la teneur en eau finale w_f mesurée obtenue à partir du prélèvement par carottage dans l'échantillon après les essais de caractérisation.
- Le poids volumique γ est déterminé selon 2 méthodes :
 - La valeur γ (kN/m^3) déterminée à partir des tassements observés pendant la phase de consolidation sous presse hydraulique en laboratoire : γ_{initial} correspond à l'indice des vides e_{f1} .
 - La valeur γ (kN/m^3) déterminée à partir de la teneur en eau finale w_f après les essais de reconnaissances : γ_{final} correspond à l'indice des vides e_{f100} .

Les relations utilisées, en faisant l'hypothèse que le sol est toujours saturé ($S_r=1$) pour déterminer ces différents paramètres, sont présentées ci-dessous (en utilisant pour γ_s la valeur de 26.5 kN/m^3) :

$$e_i = w_i (\gamma_s / \gamma_w) \quad \text{et} \quad e_f = w_f (\gamma_s / \gamma_w)$$
$$\Delta e = (1 + e_i) * \Delta h / h_i$$
$$\gamma = (e_f * \gamma_w + \gamma_s) / (1 + e_f)$$

7.4 – Procédure de reconstitution d'un massif d'argile en laboratoire (kaolinite-sable à 20%)

Cette annexe présente les différentes tâches exécutées pour préparer les massifs de sol destinés aux essais en centrifugeuse. Pour cela, on utilise des conteneurs en acier de 894mm de diamètre et de hauteur utile 360mm. Une réhausse additionnelle de 160mm sera mise temporairement au dessus du conteneur initial pour mener à terme la consolidation de la dernière couche supérieure du massif.

La base du conteneur est ceinturée par un tuyau qui assure, en premier lieu le drainage externe du massif pendant la phase de consolidation en laboratoire, en second lieu, pendant les essais en centrifugeuse, ce pipe sera relié à un tube extérieur rempli d'eau (hauteur équivalente à) celle du massif) afin d'imposer la charge hydraulique dans le massif d'argile.

- Le drainage à la base de l'échantillon est assuré par une plaque en aluminium nervurée connectée au pipe périphérique décrit ci-dessus et sur laquelle on a déposé, dans l'ordre :

- un film drainant en géotextile
- une couche de sable de Loire (appelée couche n°1)
- un second film drainant en géotextile pour éviter la pollution de l'argile

Le tout est saturé avant versement de l'argile dans le conteneur. Dans le cas de figure considéré, pour lequel les inclusions instrumentées seront introduites par la base du conteneur, on prend soin d'aménager des découpes carrées dans les géotextiles dont les dimensions sont égales aux 2 empreintes de fondations superficielles posées en surface ; Dans la couche de sable de Loire, 2 zones équivalentes à ces mêmes surfaces sont laissées libre dépourvue de sable ; elles sont limitées chacune par un cadre en bois qui retient le sable latéralement ; au dessus, le second film de géotextile drainant est aménagée avec le même type de fenêtre. Ainsi pendant l'opération de forage à la tarière, la mise en place des inclusions se fait sans risque d'entraîner du sable dans le trou de forage et évite une pollution locale autour du fût de l'inclusion (figure).

- le drainage en tête de l'échantillon est assuré radialement et axialement :

- au travers d'un film de géotextile posé sur la surface du massif
- au travers de la plaque du piston qui autorise l'application de la charge

7.5 – Procédure retenue pour la préparation d'un massif de sol

Pour mener à bien ces essais, le choix se porte sur la reconstitution de massifs de sol normalement consolidés. On rappelle que l'échelle de réduction choisie est de 18.9 (niveau d'accélération imposée au

modèle est de 18.9xG). La cote d'application de l'accélération se situe à l'interface du matelas de transfert et du massif de sol compressible.

On rappelle que la puissance du massif de sol compressible est de 360mm et qu'il est fabriqué en 3 couches ; les épaisseurs peuvent être non égales (difficulté de les rendre équivalentes) par contre à partir du second conteneur, sauf contre indication on tente de reproduire une distribution spatiale assez identique d'un conteneur à l'autre.

Le tableau présente les différents éléments géométriques et les caractéristiques retenus pour procéder à la reconstitution d'un massif de sol centrifugé idéalisé pour cette application ; la numérotation des couches respecte la chronologie de leur réalisation, croissante du bas vers le haut ; le calcul de la contrainte à appliquer pour la phase de reconsolidation en laboratoire est fait sur la base de masse volumique obtenue par prélèvement d'échantillons sur des massifs normalement consolidés équivalents (Thèse de G. Baudouin). La formulation de la similitude basique est appliquée :

$$\sigma_v = \gamma \times nG \times z/n \text{ (avec } n = 18.9)$$

Pour les sols normalement consolidés, le profil de cohésion en fonction de z est de la forme

$$Su = 1.2 \times z_p + 2.4$$

En utilisant la relation $Su = 0.19 \times \sigma'_v \text{ (OCR)}^{0.59}$ (relation obtenue à partir de campagne expérimentale réalisée dans le cadre d'affaires contractuelles utilisant l'argile, il est possible de vérifier la valeur de la contrainte σ_v à appliquer. Dans le cas présent, s'agissant d'une argile normalement consolidée, le rapport OCR (Over Consolidation Ratio est égal à 1). Pour cette argile, le rapport qc/Su est égal à 18.5 (sources expérimentales).

Tableau XVI- Détermination de la procédure de consolidation

Repérage	Epaisseur		Cote		γ	Contrainte (σ_v)		Su	Calcul (σ'_v)	
	modèle	proto	Interface	Milieu		théorique	appliquée		avec γ	avec Su
	(mm)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ³)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
Matelas de transfert	26.4	0.50	+0.50		17	+8.5	+8.5			
Couche n°1	120	2.27	-2.27	-1.134	18	20.4	28.9	1.36	9.07	7.15
Couche n°2	120	2.27	-4.54	-3.402	18	61.2	69.7	4.08	27.2	21.5
Couche n°3	120	2.27	-6.80	-5.670	18.25	103.57	112.0	6.10	46.8	35.8

L'ordre de présentation des couches du bas vers le haut suit la chronologie de leur préparation

Chaque conteneur fait l'objet d'une présentation spécifique qui rappelle les événements ayant marqués sa réalisation ; ceux-ci sont résumés sous forme de tableau où les différentes actions apparaissent ainsi que les relevés correspondants aux étapes caractéristiques de chargement (paliers).

Pour chacun de paliers, on trouve la contrainte appliquée, que la charge soit mécanique ou hydraulique, les prises de cotes du toit de l'échantillon avant l'application du palier et en fin de palier, les tassements cumulés intermédiaires.

7.6 - Préparation du massif centrifugé d'argile C01 (kaolinite-sable à 20%)

Le mélange kaolinite-sable à 20% provient du stockage de ce même mélange sous forme de blocs déshydratés précédemment utilisés dans le cadre de la thèse de G. Baudouin. Tous les conteneurs qui suivent seront préparés à partir de cette réserve qui s'autoalimentera par cycles de séchage et réhydratation après chaque essai.

Le premier conteneur C01 est préparé à partir d'une boue d'argile obtenue par malaxage de la préparation suivante :

- 102.7 kg de kaolinite en blocs secs sont déposés dans le malaxeur
- 92.4 litres d'eau sont ajoutés (mélange à 90%) pour déliter les blocs pendant 24 heures.
- A l'issue de cette période, la boue d'argile est mise en œuvre dans le conteneur ; un contrôle de la teneur en eau est effectuée qui donne une valeur de 89.7%.
- Il s'avère que le mélange est trop liquide pour pouvoir supporter la première charge de 7kPa (poids propre du piston) ; un chargement dit mécanique par pose de masses dont la charge est accrue

successivement est décidé pour atteindre le palier équivalent à la pose du piston (le tableau recense les différentes du chargement).

- Cette anomalie est levée est expliquée par le fait que le mélange aurait du être opéré à 75% d'eau, en effet :
 - $P + 0.2 \times P = 102.7\text{kg} \rightarrow P(1+0.2) = 102.7\text{kg} \rightarrow P = 85.88\text{kg}$
 - Il aurait fallu faire le mélange à 90% pour 85.88 kg soit un ajout de 77 litres d'eau
 - Dans ce mélange on aurait donc du rajouter 16.82kg de sable coloré
 - Et le mélange final aurait eu une teneur en eau de $77 / 102.7 = 74.9\%$
- Le premier mélange possède donc état très liquide qui favorise sa mise en place mélange, par contre les temps de préparation sont grandement pénalisés ; le choix d'un mélange à 75 % sera retenu pour la préparation de toutes les couches mises en œuvre pour la fabrication des massifs suivant afin d'optimiser les temps de consolidation.
- Le second mélange est préparé avec les quantités suivantes :
 - 132 kg d'argile en blocs séchés
 - Ajout de 99 litres d'eau pour obtenir in fine une boue d'argile à 75% (à vérifier).
- Le troisième mélange est préparé avec les quantités suivantes :
 - 116 kg d'argile en blocs séchés
 - Ajout de 87 litres d'eau pour obtenir in fine une boue d'argile à 75% (à vérifier).

Tableau XVII – conteneur ASIRI C01 : répétition de la préparation des couches

Couche	Argile à 20% (kg)	Eau (litres/ kg)	W initial (%)	W mesuré (%)
1	102.7	92.4	90	90
2	133	99	75	70.2
3	116	87	75	74.8

Sauf amélioration, à l'avenir, toutes les couches seront préparées selon cette procédure (la teneur en eau vérifiée sur le premier mélange donne 70.3%)

Le poids propre du piston est de 435 kg ; sa surface est de 6221 cm² (contrainte appliquée 7 kPa)

Le rapport entre les pistons des vérins S1 et des pistons S2 en contact avec l'échantillon est de 40.86.

La progression du chargement est présentée sur le tableau suivant ; des difficultés ont pu être rencontrées lors de la reconstruction du massif d'argile, si nécessaires, elles sont expliquées dans les alinéas qui suivent le tableau.

Tableau XVIII - Planning de préparation du massif d'argile conteneur ASIRI C01 (mélange à 20%)

N° du palier	1 ^{er} palier	2 ^{ème} palier	3 ^{ème} palier	4 ^{ème} palier	5 ^{ème} palier	6 ^{ème} palier	7 ^{ème} palier	8 ^{ème} palier	9 ^{ème} palier	10 ^{ème} palier	Contrainte maxima
couche n°1	Couche saturée drainante de sable = 15 mm (et aménagement des fen^tres pour passage des inclusions par le fond)										
couche n°2	Teneur en eau initiale w = 90 % ; hauteur initiale = 189 mm (cf. mode de préparation mélange kaolinite – sable à 20%)										
Date	18.10.11	19.10.11	20.10.11	21.10.11	24.10.11	25.10.11	26.10.11				26.10.11
Masse / ou pression	65 kg (1)	125 kg (1)	213 kg (1)	435 kg (1)	0.8 MPa (2)	1.8 MPa (2)	4.5 MPa (2)				4.5 MPa (3)
Contrainte	1 kPa	2 kPa	3.4 kPa	7 kPa	19.6 kPa	44 kPa	110 kPa				110 kPa
Hauteur initiale	189	185	178	161	143	134	128				
Hauteur finale	185	178	161	143	134	128	121				
Tassement	4	11	28	46	55	61	68				
couche n°2	Teneur en eau initiale w = 70.2% ; hauteur initiale = 186 mm ; hauteur finale = 132 mm										
Date	27.10.11	28.10.11	02.11.11	03.11.11							03.11.11
Masse / ou pression	435 kg (1)	1 MPa (2)	2.5 MPa (2)	2.8 MPa (2)							2.8 MPa (3)
Contrainte	7 kPa	25 kPa	63.6 kPa	68.5 kPa							68.5 kPa
Hauteur initiale	186	177	177	133							
Hauteur finale	177	142	133	132							
Tassement	9	44	53	54							
couche n°3	Teneur en eau initiale w = 74.8 % ; hauteur initiale = 143 mm ; hauteur finale = 102 mm										
Date	03.11.11	04.11.11	07.11.11								07.11.11
Masse / ou pression	435 kg (1)	1.2 MPa (2)	1.3 MPa (2)								1.3 MPa (2)

Contrainte	7 kPa	29 kPa	32 kPa									32 kPa
Hauteur initiale	143	132	103									
Hauteur finale	132	103	102									
Tassement	11	40	41									

- (1) Chargement mécanique : maintien du palier 24 heures
- (2) Chargement hydraulique
- (3) Maintien de la contrainte finale pendant 24 heures.

La dernière contrainte (29 kPa) est maintenue jusqu'à la date retenue (jj.mm.2011) pour enlever la contrainte finale appliquée sur la couche n°3 (dépose du piston); la phase d'équipement du conteneur nécessite au moins 3 demies journées : équipement préparatoire pour retournement du conteneur, introduction des inclusions par forage, mise en place des sondes de pression interstitielle, montage des dispositifs d'essais.

A la fin de cette phase de préparation, la puissance finale du massif est de **365 mm** dont **15mm** de couche drainante à la base (on rappelle que la hauteur finale à atteindre est de 360 mm) ; les caractéristiques du massif de sol sont les suivantes (tableau).

La puissance nominale du massif compressible doit être de 360mm ; le rabotage de l'excès d'argile est une opération qui est effectuée par passes successives de façon à ne pas endommager la surface de contact sur laquelle est déposé le matelas de transfert ; cette opération est la touche finale après forage des inclusions dans le massif.

Tableau XIX – Caractéristiques des couches dans le conteneur ASIRI C01

couche	Hauteur initiale (mm)	Hauteur finale (mm)	Tassement (mm)	Teneur en eau initiale (w_i %)	Teneur en eau finale (w_f %)	Contrainte appliquée σ_v (ka)	Indice des vides initial (e_i)	Indice des vides final (e_f)	Δe calculé	Indice des vides final (e_f mesuré)	$\gamma_{initial}$ (kN/m ³) calculé	γ_{final} (kN/m ³) mesuré
2	189	121	68	90	/	110	2.385	1.167	1.218	/	17.61	/
3	186	133	53	70.2	/	68.5	1.860	1.045	0.815	/	18.07	/
4	143	102	41	74.8	/	32	1.982	1.127	0.855	/	17.76	/

Après réalisation de l'essai de chargement sous 18.9G (jj.mm.2011), le conteneur C01 est débarqué .un prélèvement par carottage est effectué pour contrôler le profil de teneur en eau et déterminer la densité du massif ; la carotte est sectionnée en tronçons de 30mm (12 points) ce qui permet d'avoir une bonne appréciation du profil et de préciser les limites de couches.

Le massif est détruit avec méthode pour vérifier le positionnement des inclusions (verticalité et disposition géométrique des maillages) et *in fine* récupérer les inclusions.

L'argile est mise à sécher à l'étuve à 100° : 6 bacs sont ainsi recyclés.

7.7 – Comparaison des massifs après préparation en laboratoire

Comme il a été précisé précédemment, la règle de préparation veut que l'on essaie autant que faire se peut de reconstituer les massifs par couches de puissance équivalente de façon à minimiser des effets « opératoires » ; une vue en coupe de la répartition spatiale des couches de mélange sable-argile est présentée pour l'ensemble des conteneurs sur la figure 27.

En centrifugeuse, ces discontinuités vont s'atténuer dès la phase de mise en consolidation du massif à 18.9G. Pour mémoire sur ce graphe, est représentée la puissance du matelas déposé sur le massif compressible (26.4mm).

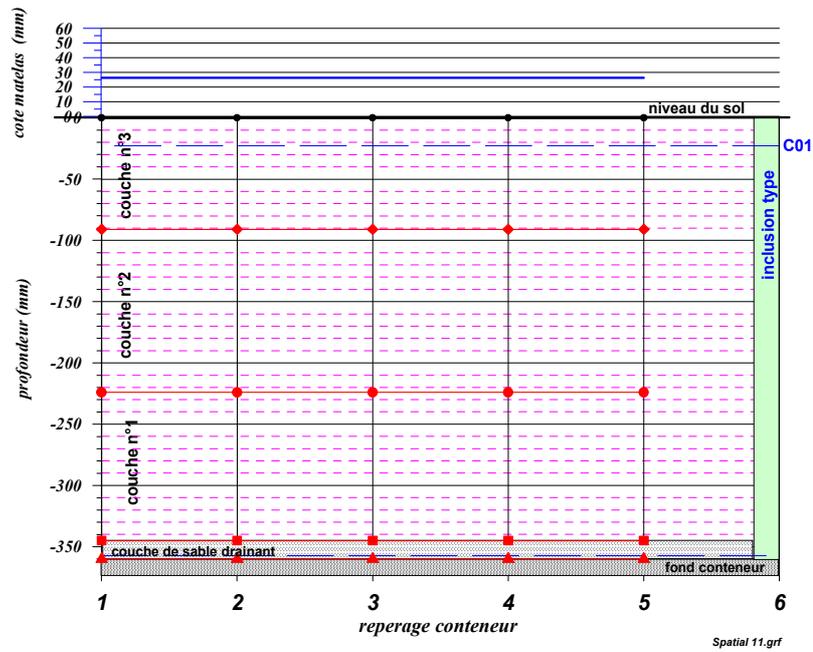


Figure 27 – répartition spatiale des couches d'argile dans chaque conteneur