



Projet National

Amélioration des Sols par Inclusions Rigides

Opération du Réseau Génie Civil et Urbain

OPERATION DU RESEAU GENIE CIVIL & URBAIN

**Comportement d'un groupe
élémentaire (3*3 inclusions) :
simulation en centrifugeuse du
chargement d'un dallage**

AUTEURS :

Luc THOREL, LCPC
Gérard RAULT, LCPC
Gaëlle BAUDOUIN, LCPC

VERIFICATEUR :

Bruno SIMON, Directeur Scientifique du PN ASIRI, Terrasol

Septembre 2009

A.S.I.RI/FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Comportement d'un groupe élémentaire (3*3 inclusions). Conception des montages

RAPPORT N° : 2-09-3-11

DATE D'ETABLISSEMENT : Septembre 2009

AUTEUR(S) : Luc THOREL, Gérard RAULT, Gaëlle BAUDOUIN

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : LCPC

THEME DE RATTACHEMENT : Thème 3 : Essais de laboratoire et en centrifugeuse

LETTRE DE COMMANDE : LC/07/ASI/49 du 15/09/07

Centre de Nantes

Route de Bouaye
BP 4129
44341 Bouguenais Cedex
Téléphone : 33 (0)2 40 84 58 00
Télécopie : 33 (0)2 40 84 59 99

Site Web : www.lcpc.fr

Division Reconnaissance et Mécanique des Sols

Division for Soil Mechanics
& Site Survey

Jacques.Garnier@lcpc.fr

Section Mécanique des Sols et Centrifugeuse

Centrifuge & Soil Mechanics
Unit

Luc.Thorel@lcpc.fr

Secrétariat :

rms.rms2@lcpc.fr

☎ 33 (0)2 40 84 58 16

📠 33 (0)2 40 84 59 97

*Etablissement public
à caractère scientifique
et technologique*



N° 9915173 pour les sites
de Paris et de Nantes

Comportement d'un groupe élémentaire (3*3 inclusions) : simulation en centrifugeuse du chargement d'un dallage

- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Paris - France

Projet National

Amélioration des Sols par Inclusions **RI**gides *Thème 3 : Essais en laboratoire et en centrifugeuse*

<http://www.irex-asiri.fr>

Opération de Recherche LCPC 11P071

Contrat n° 13P07171

Référence RMS/MS : 2009-3-13-1/1-a

Date d'origine	Date de la présente version	Rédacteur	Vérificateur
29 juin 2009	novembre 2010	Luc Thorel Gérard Rault Gaëlle Baudouin	B. Simon

LISTE DE DIFFUSION

NOM	ADRESSE
Auteurs, vérificateur	
IREX (2 exemplaires)	
Webmestre ASIRI	

Résumé

*Ce rapport récapitule les travaux réalisés dans le cadre de la tranche 2B du PN ASIRI, sur la modélisation physique en centrifugeuse de groupe (3*3) d'inclusions rigides. Sont présentés les principaux résultats d'essai concernant la simulation en centrifugeuse d'une surcharge par un dallage.*

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

TABLE DES MATIERES

1 - Introduction	10
2-Montage expérimental	11
2.1 – Reconstitution du massif de sol en laboratoire	11
2.2 – Equipement et préparation de l'instrumentation interne au massif	13
2.2.1 – La mise en place des inclusions dans le sol	14
2.2.2 – Mise en place du matelas granulaire	15
2.2.3 – Mise en place du dallage	16
2.2.4 – Mise place des compléments d'équipement	17
2.3 - Equipement et préparation du modèle sur la centrifugeuse	17
2.4 – Démontage des dispositifs d'essais	18
3- Programme expérimental	20
3.1- Calendrier des essais en centrifugeuse	20
3.2 – Déroulement d'un essai en centrifugeuse	21
4-Propriétés des massifs	23
4. 1 – Comparaison des massifs après préparation en laboratoire	23
4.2-Matelas granulaire	24
4-3 – Reconnaissance et profils géotechniques des massifs de sol centrifugés	24
4.5.1 Pénétromètre	24
4.5.1.1 – Présentation des graphes	25
4.5.1.2 – Résultats	26
4.5.2 - Prélèvement d'échantillons par carottage	33
4.5.2.1 - Profils de teneur en eau	34
4.5.2.2 - Profils de densités	35
5-Résultats des essais	37
5.1 – Mesures en fonction du temps	37
Conteneur C06 $H_M=0,6m$, $\alpha=3,1\%$	39
Conteneur C06 $H_M=0,6m$, $\alpha=4,9\%$	40
Conteneur C07 $H_M=1m$, $\alpha=3,1\%$	41
Conteneur C07 $H_M=1m$, $\alpha=4,9\%$	42
Conteneur C08 $H_M=1,5m$, $\alpha=3,1\%$	43
Conteneur C08 $H_M=1,5m$, $\alpha=4,9\%$	44
Conteneur C09 $H_M=0,3m$, $\alpha=3,1\%$	46
Conteneur C09 $H_M=0,3m$, $\alpha=4,9\%$	47
5.2 - Efficacité	49
6-Conclusions	53
Références bibliographiques	54

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I – Propriétés du dallage utilisé en modèle réduit	16
Tableau II - planning des essais réalisés en centrifugeuse en 2008 - 2009 (surcharge type dallage)	20
Tableau III - Déroulement des phases caractéristiques d'un essai	21
Tableau IV - Programme de chargement en centrifugeuse (conteneur C06)	21
Tableau V – Hauteur et poids volumiques des matelas	24
Tableau VI – Relevés des tassements à chaque phase caractéristique	26
Tableau VII – Echantillonnage des teneurs en eau après essai	34
Tableau VIII – Poids volumique par couche et par conteneur d'essai	35

Tableau IX – Géométrie et surcharge appliquée.....	37
Tableau X – Valeurs de l'efficacité pour les différents cas de recouvrement et de surcharge rigide, en fin de palier	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Planning de reconstitution des quatre massifs de sol.....	12
Figure 2 - Programme de chargement suivi pour chaque conteneur (temps modèle).....	22
Figure 3 – Répartition spatiale des couches d'argile dans chaque conteneur	23
Figure 4 – Zone dédiée pour les reconnaissances au pénétromètre	25
Figure 5 – Reconnaissance pénétrométrique dans le conteneur C06.....	27
Figure 6 – Reconnaissance pénétrométrique dans le conteneur C07.....	28
Figure 7 – Reconnaissance pénétrométrique dans le conteneur C09.....	29
Figure 8 – Reconnaissance pénétrométrique dans les conteneurs C06, C07, C09	30
(phase d'exécution : fin de la période de consolidation)	30
Figure 9 – Reconnaissance pénétrométrique dans les conteneurs C06, C07, C09 (phase d'exécution : fin du 1 ^{er} palier de chargement).....	31
Figure 10 – Reconnaissance pénétrométrique dans les conteneurs C06, C07, C09 (phase d'exécution : fin du 2 ^{ème} palier de chargement)	32
Figure 11 – Reconnaissance pénétrométrique dans les conteneurs C06, C07, C09 (phase d'exécution : fin du 3 ^{ème} palier de chargement)	33
Figure 12 – Profils de teneur en eau dans les conteneurs C06, C07, C08, C09 (prélèvement par carottage après essai en centrifugeuse).....	34
Figure 13 – Profils de poids volumiques les conteneurs C06, C07, C08, C09 (prélèvement par carottage après essai en centrifugeuse).....	36
Figure 14 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C06 $H_M=0,6m$, $\alpha=3,1\%$	39
Figure 15 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C06 $H_M=0,6m$, $\alpha=4,9\%$	40
Figure 16 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C07 $H_M=1m$, $\alpha=3,1\%$	41
Figure 17 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C07 $H_M=1m$, $\alpha=4,9\%$	42
Figure 18 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C08 $H_M=1,5m$, $\alpha=3,1\%$	44
Figure 19 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C08 $H_M=1,5m$, $\alpha=4,9\%$	45
Figure 20 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C09 $H_M=0,3m$, $\alpha=3,1\%$	46
Figure 21 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C09 $H_M=0,3m$, $\alpha=4,9\%$	48
Figure 22 – Variation de l'efficacité de l'inclusion centrale en fonction du temps pour $\alpha = 3,14 \%$	49
Figure 23 – Variation de l'efficacité de l'inclusion centrale en fonction du temps pour $\alpha = 4,91 \%$	50
Figure 24 – Variation de l'efficacité de l'inclusion de bord en fonction du temps pour $\alpha = 3,14 \%$	51
Figure 25 – Variation de l'efficacité de l'inclusion de bord en fonction du temps pour $\alpha = 4,91 \%$	51
Figure 26 – Variation de l'efficacité de l'inclusion d'angle en fonction du temps pour $\alpha = 3,14 \%$	51
Figure 27 – Variation de l'efficacité de l'inclusion d'angle en fonction du temps pour $\alpha = 4,91 \%$	52
Figure 28 – Efficacité dans le cas d'un chargement de type dallage	52

LISTE DES NOTATIONS

Convention de signe : **compressions positives**

Notation	Descriptif (en français)	Description (in english)	Unité
$()^m$	Grandeur relative au modèle (réduit)		
$()^p$	Grandeur relative au prototype (en vraie grandeur)		
a	longueur caractéristique de la dalle	Pile cap width	[m]
A	Aire d'une maille (une inclusion + sol alentour)		[m ²]
A _S	Aire du sol compressible		[m ²]
A _P	Aire de la tête d'inclusion (dalle)		[m ²]
C _U	facteur d'uniformité granulométrique (dit de Hazen) = d_{60}/d_{10}	Uniformity coefficient	[-]
C _C	facteur de courbure granulométrique = $d_{30}^2/(d_{10}d_{60})$	Coefficient of curvature	[-]
C _E	coefficient d'étalement = d_{90}/d_{10}		[-]
C _n	Couche numéro n du sol compressible		[-]
C _c	Indice de compression		
C _S	coefficient de symétrie = $d_{50}^2/(d_{10}d_{90})$		[-]
c'	Cohésion effective	Effective shear strength	[Pa]
c' _R	Cohésion résiduelle	Residual shear strength	[Pa]
c _u	Cohésion non drainée	Undrained shear strength	[Pa]
C _c	Indice de compression		
C _s	Indice de recompression		
c _{uu}	Cohésion d'un sol non saturé	Unsaturated soil shear strength	[Pa]
c _v	Coefficient de consolidation verticale		[m ² /s]
d _n	Diamètre à n % (n% des particules ont des dimensions inférieures à d _n)	n percent diameter	[mm]
D	Diamètre d'une inclusion	Pile diameter	[m]
d _n	Diamètre à n % (n% des particules ont des dimensions inférieures à d _n)	n percent diameter	[mm]
d _{max}	Diamètre maximum des grains		
e	Indice des vides	Void ratio	[-]
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)		
e _{max}	Indice des vides maximal	Maximum void ratio	[-]
e _{min}	Indice des vides minimal	Minimum void ratio	[-]
E	Efficacité		[-]
E _p	Module d'Young de l'inclusion		[Pa]
E	Module d'Young	Young's modulus	[Pa]
E _{oed}	Module œdométrique		[Pa]
g	Accélération de la pesanteur terrestre	Earth's gravity	[m/s ²]
G	Module de cisaillement	Shear modulus	[Pa]
h ₀	Hauteur du réservoir		[m]
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)		

h_w	Hauteur d'eau dans le réservoir		[m]
H_R	Hauteur du Remblai		[m]
H_M	Hauteur du matelas	Mat height	[m]
H_T	Hauteur d'une dalle		[m]
I_D	Indice de densité (ou de compacité)	Density index	[-]
I_C	Indice de consistance		[-]
I_L	Indice de liquidité		[-]
I_p	Indice de plasticité		[-]
L	Longueur d'une inclusion		[m]
m_0	Masse à vide du réservoir		[kg]
n	Porosité	Porosity	[-]
N	Intensité de la macrogravité	Gravity level	[-]
q_0	contrainte appliquée sur le remblai (surcharge)	Surface overload	[Pa]
q^*	contrainte verticale s'exerçant sur le sol compressible non renforcé (sans inclusion)		[Pa]
q_p^*	contrainte appliquée à l'emplacement où se trouverait la tête d'inclusion si elle était en place		[Pa]
q_s^*	contrainte appliquée sur le sol compressible (sans inclusion)		[Pa]
q_p^+	contrainte reprise par l'inclusion rigide		[Pa]
q_s^+	contrainte reprise par le sol compressible		[Pa]
Q^*	force reprise par la surface totale (sans inclusion)		[N]
Q_p^*	force reprise par la tête d'inclusion (sans inclusion)		[N]
Q_s^*	force reprise par l'aire du sol compressible (sans inclusion)		[N]
Q_p^+	force reprise par les inclusions		[N]
Q_s^+	force reprise par le sol compressible		[N]
R_N	Rayon sur lequel est appliquée l'accélération centrifuge	Centrifuge acceleration radius	[m]
R_S	rayon d'application de g à la surface du modèle		[m]
s	entre-axe entre 2 inclusions adjacentes	Pile spacing	[m]
S_0	Section du réservoir		[m ²]
S_r	Degré de saturation	Saturation ratio	[-]
SRR	Taux de réduction de contrainte	Stress Reduction Ratio	[-]
S_u	Cohésion non drainée	Undrained cohesion	[Pa]
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)		
W	Teneur en eau	Water content	[-]
w_L	Limite de liquidité		[-]
w_P	Limite de plasticité		[-]
w_R	Limite de retrait		[-]
U	Degré de consolidation	Consolidation ratio	[-]
z_m	profondeur modèle en mètre		
Z_{pc}	Profondeur prototype		[m]
α	Taux de couverture	Capping ratio	[-]
Δe	variation d'indice des vides pendant la consolidation à 1g		
Δh	$h_i - h_f$		
ϕ_M	Anle de frottement interne du matelas granulaire	Mat internal friction angle	[°]
ϕ'	Angle de frottement effectif	Friction angle	[°]
ϕ'_R	Angle de frottement résiduel	Residual Friction angle	[°]

\varnothing	diamètre divers	Miscellaneous diameter	[m]
\varnothing_0	Diamètre du réservoir		[m]
γ	Poids volumique du sol		[kN/m ³]
γ_{initial}	poids volumique déterminé pendant la consolidation à 1g		
γ_{final}	poids volumique déterminé après les essais en centrifugeuse		
ν	Coefficient de Poisson	Poisson's ratio	[-]
ρ	Masse volumique d'un sol	Soil Density	[kg/m ³]
ρ_d	Masse volumique sèche d'un sol	Soil Dry Density	[kg/m ³]
$\rho_{d\text{max}}$	masse volumique sèche maximale du matériau	Maximum Soil Dry Density	[kg/m ³]
$\rho_{d\text{min}}$	masse volumique sèche minimale du matériau	Minimum Soil Dry Density	[kg/m ³]
ρ_h	Masse volumique du sol humide		[kg/m ³]
ρ_s	Masse volumique des particules solides	Soil grain density	[kg/m ³]
ρ_w	Masse volumique de l'eau : 1.0019.10 ⁻³ Pa.s (ou cP) à 20°C	Water density	[kg/m ³]
ψ	Angle de dilatance	Dilatancy angle	[°]
σ	contrainte		[Pa]
σ_v	dernière contrainte verticale maximum appliquée lors de la consolidation à 1g		

1 - Introduction

Parmi les activités du thème 3 « essais en laboratoire et en centrifugeuse » du Projet National ASIRI se trouve la modélisation physique en centrifugeuse d'un système de sol renforcé par inclusions rigides, comportant 9 inclusions installées selon une maille carrée. Ces travaux de recherche, expérimentaux, s'inscrivent dans la 2^{ème} tranche du Projet National ASIRI. Ils ont été réalisés en 2008 et 2009 et concernent la simulation en centrifugeuse d'un chargement de type dallage sous charge répartie.

Le principe d'un essai consiste à réaliser, dans un conteneur qui sera soumis à la macrogravité en centrifugeuse, un modèle réduit géotechnique comportant un sol compressible renforcé par inclusions rigides, surmonté d'un matelas granulaire, le tout coiffé d'un réservoir à fond rigide permettant d'appliquer une surcharge répartie uniformément simulant un dallage.

Dans chaque conteneur sont testés :

- deux groupes d'inclusions rigides (dont certaines sont instrumentées), dont les taux de recouvrement (différents pour les groupes : 4,91% et 3,14%) sont identiques d'un conteneur à l'autre,
- une hauteur de matelas.

Une instrumentation spécifique a été mise en œuvre [Rault et al., 2007, 2008] afin de :

- mesurer les tassements : par opposition au montage réalisé pour les essais simulant le chargement d'un remblai (surcharge dite souple), la pose d'un fond rigide au contact du matelas de transfert de charges ne permet pas cette fois de mesurer les tassements au droit des têtes d'inclusion ; les seules mesures accessibles sont le déplacement global vertical du dallage et le tassement en zone neutre non renforcée,
- mesurer les efforts dans trois inclusions par groupe à quatre cotes,
- identifier le profil de cohésion du sol compressible par l'intermédiaire d'essais pénétrométriques.

Les paramètres étudiés sont le taux de recouvrement (2 valeurs) et la hauteur du matelas granulaire H_M (4 valeurs), soit 8 valeurs du rapport H_M/s : 0, 12 ; 0,15 ; 0,23 ; 0,25 ; 0,29 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 et 0,75.

2-Montage expérimental

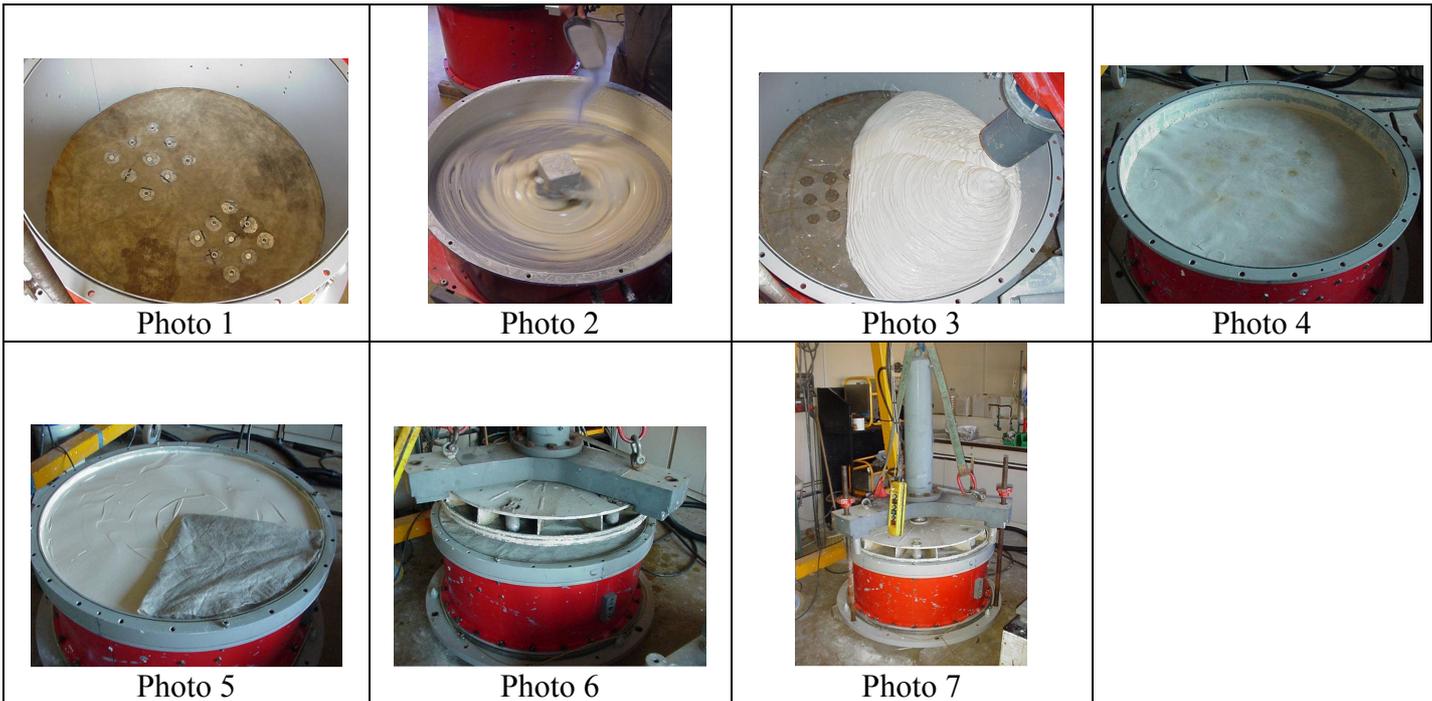
La réalisation d'un essai passe par cinq phases chronologiques qui s'accompagnent d'un ensemble de relevés et de contrôles :

- la reconstitution du massif de sol en laboratoire ;
- l'équipement et la préparation de l'instrumentation interne au massif ;
- l'équipement et la préparation du modèle sur la centrifugeuse ;
- l'expérimentation en centrifugeuse ;
- le démontage des dispositifs d'essais.

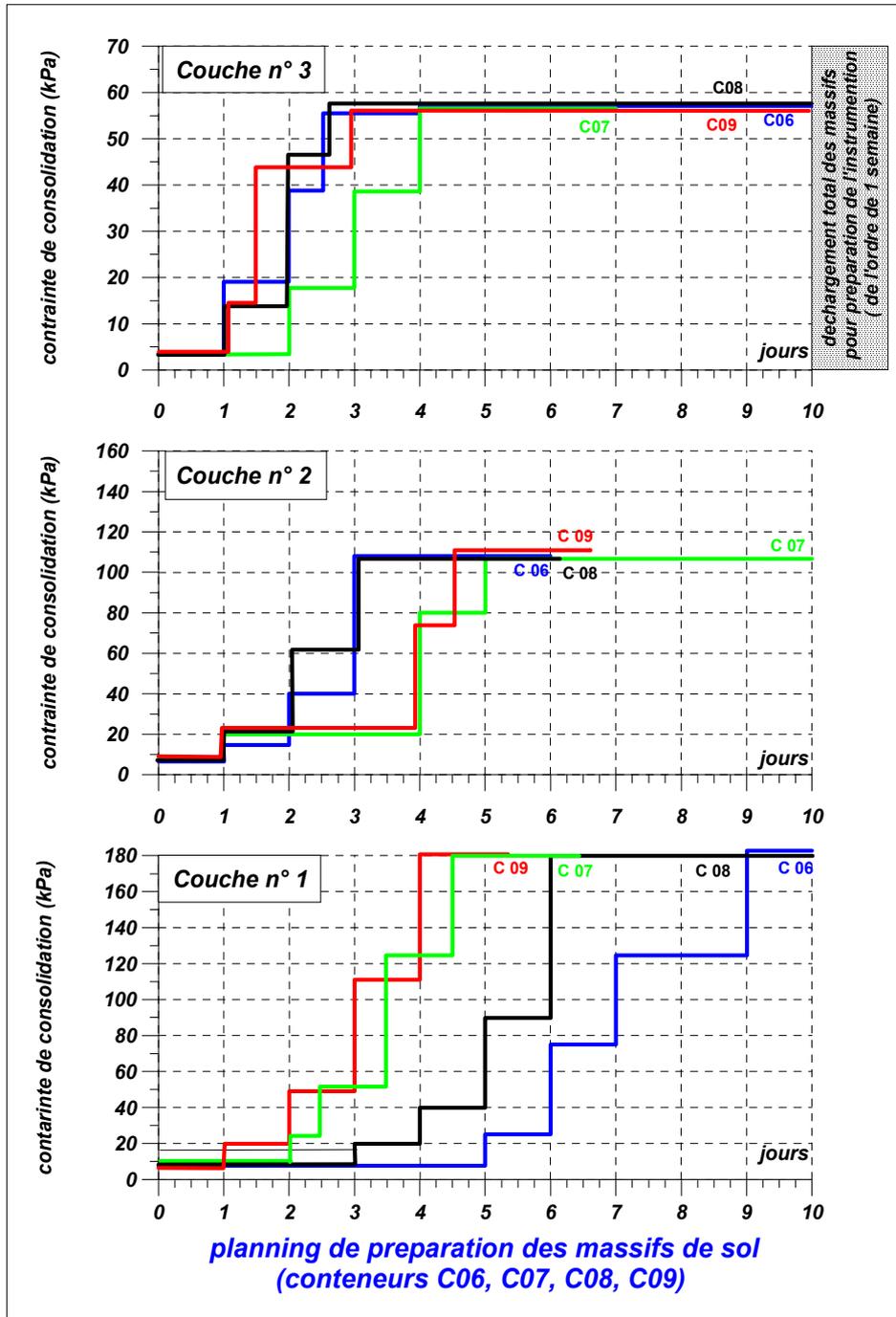
Dans cette partie, on présente ces différentes phases, à l'exclusion de celle concernant l'expérimentation en centrifugeuse, qui est détaillée plus loin.

2.1 – Reconstitution du massif de sol en laboratoire

Le massif de sol est préparé en 3 couches en laboratoire (cf. annexe : préparation des massifs de sol). Cette méthode de préparation est rodée : un double lit de géotextile drainant est posé sur le fond du conteneur (photo 1) ; des fenêtres circulaires ont été aménagées dans le fond du conteneur et dans le géotextile pour pouvoir introduire par la suite les inclusions lorsque la reconstitution du massif sera achevée. La boue de mélange 80% argile - 20% sable (teneur en eau visée de 75 à 80%) préparée (photo 2) dans un malaxeur, est ensuite versée dans le conteneur par l'exutoire placé sous le malaxeur (photo 3) : 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 réitérée identiquement pour les 3 couches (photo 4). 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 sensu* les mêmes programmes de chargement d'un conteneur à un autre.



La procédure de consolidation couche par couche consiste à appliquer des paliers croissants de chargement selon un programme prédéfini (figure 1), 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.



prepar 02.grf

Figure 1 - Planning de reconstitution des quatre massifs de sol.

Les contraintes sont, d'un conteneur à l'autre, 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.

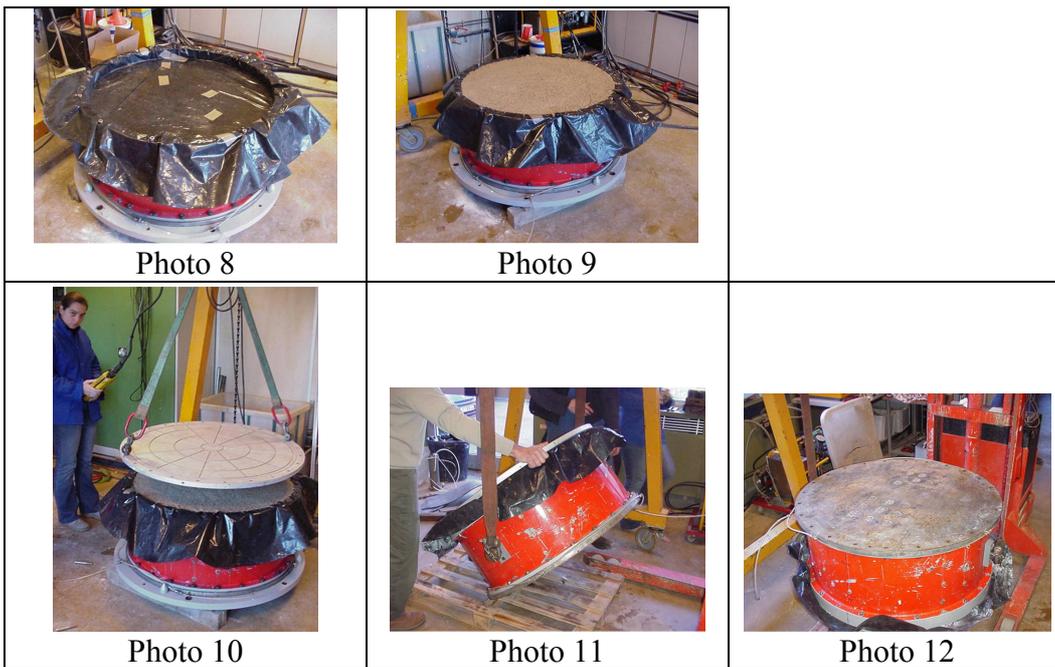
La contrainte est appliquée au moyen d'une presse hydraulique (photo 6) qui est autorégulée en fonction du tassement sous charge. Le drainage en haut (photo 5) et à la base de l'échantillon est imposé pendant cette phase préparatoire.

Le conteneur (photo 7) utilisé pour cette opération a une hauteur de 360mm (correspondant à la longueur des inclusions) ; un anneau additionnel de 60mm 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.

2.2 – 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 finale du sol est impérativement comprise entre 360mm et 420mm. Un film en plastique souple débordant largement les parois du conteneur est alors déposé en épousant au mieux les congés circulaires intérieurs du conteneur (photo 8) ; 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 (photo 9).



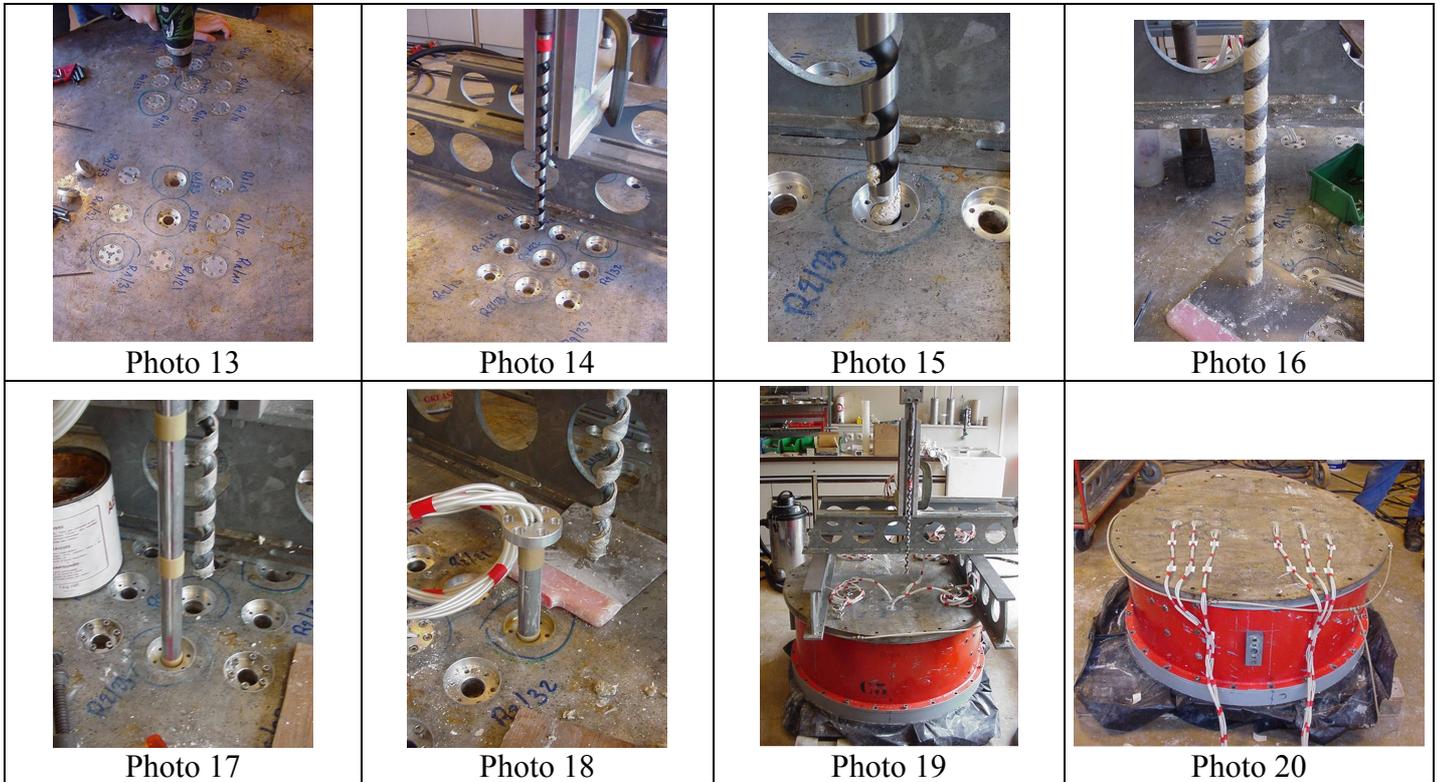
La couche de sable est surfacée pour pouvoir poser un fond circulaire en aluminium qui est solidarisé par vissage au conteneur de sol (photo 10). Le massif étant alors emprisonné, il peut être procédé au retournement du conteneur par suspension au moyen d'un système à tourillons (photo 11).

L'introduction des inclusions va se faire par le fond du conteneur (photos 12) après la phase délicate de retournement (poids du conteneur de l'ordre de 520 kg) ; une telle procédure évite tout risque de drainage parasite par des câbles de liaison des capteurs de force.

2.2.1 – 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 (photo 13), le dispositif de forage est posé sur le conteneur (photo 14) : il est équipé d'une tarière (mèche à bois au diamètre légèrement supérieur au diamètre de l'inclusion) guidée verticalement par un système à coulisseau.



Deux types de tarières de longueur 560mm sont utilisés aux diamètres respectifs de 18.8 mm et 19.8 mm (18mm pour les inclusions non instrumentées et 19 mm pour les inclusions instrumentées) ; en effet, on assure 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 (photo 15) 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 (photo 16); la tarière est nettoyée de ses copeaux d'argile et l'opération est réitérée 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 peut alors être introduite dans le forage (photo 17). La dernière opération consiste à visser l'embase de l'inclusion dans son logement (photo 18).

L'opération de mise en place des 18 inclusions (photo 19) dure une dizaine d'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 (photo 20).

2.2.2 – Mise en place du matelas granulaire

Une deuxième phase de retournement (photo 21) peut alors être envisagée pour rendre accessible le plan supérieur du massif. Le faux fond de conteneur est alors enlevé (photo 22 & 23), le sable évacué et le film plastique retiré (photo 24). L'opération consiste à désolidariser l'anneau additionnel (photo 25) qui laisse apparaître (photo 26) 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 (photo 27).



L'anneau additionnel peut alors être repositionné (photo 28) : un repérage circulaire interne permet de contrôler la dépose du matériau granulaire (matelas de 11, 21, 36 ou 54mm – photo 29). Grâce à ce repère, le contrôle de la masse volumique du matelas peut être confirmé (photo 30). Pour les cinq conteneurs réalisés, la consigne était d'atteindre une densité du matelas de transfert de charge correspondant à un indice de densité $I_D=85\%$. Une boîte de densité est positionnée dans une zone neutre pour un contrôle après essai (photo 31).

Pendant cette phase, les sondes de pression interstitielle destinées à suivre la phase consolidation en centrifugeuse sont mises en place (photo 32) ; 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 groupes d'inclusions et de la zone affectée à la reconnaissance au pénétromètre.

2.2.3 – Mise en place du dallage

L'interface rigide simulant un dallage entre le matelas de sable et le système de chargement est modélisé à l'aide d'une plaque de forme cylindrique posée à même le matelas de transfert de charges.

Le matériau choisi est une plaque de Divinycell™ H d'épaisseur 55mm (photo 33). Les caractéristiques mécaniques de ce matériau sont données par le constructeur, elles sont déterminées à partir des normes américaines ASTM :

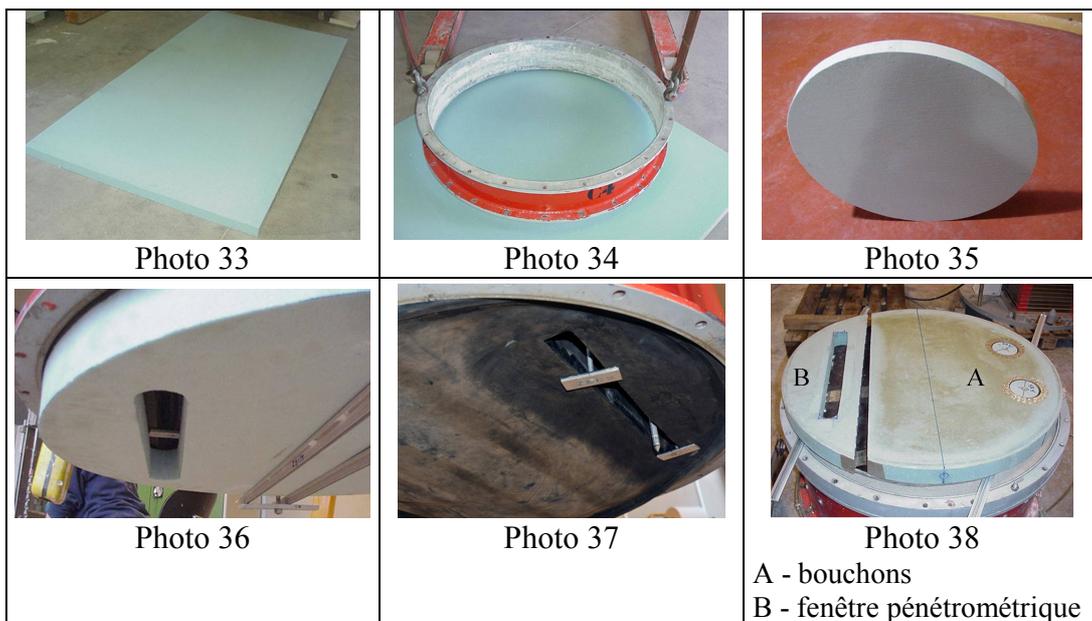
Tableau I – Propriétés du dallage utilisé en modèle réduit

Densité	48 – 60 kg/m ³
Résistance en compression	0,6 – 0,9 MPa
Module en compression	50 – 70 MPa
Résistance en traction	1,4 – 1,8 MPa
Module en traction	55 – 75 MPa
Résistance en cisaillement	0,56 – 0,76 MPa
Module en cisaillement	15 – 20 MPa
Déformation en cisaillement	12 – 20 %

Le dallage est découpé au diamètre nominal de 888 mm afin de ne pas être trop ajusté au diamètre du conteneur (894mm) et autoriser un libre jeu de 3mm au rayon (photos 34 & 35). Une fenêtre est spécialement aménagée (photo 36) de telle façon à permettre la reconnaissance pénétrométrique (photo 37) à travers la baudruche et le dallage dans le massif sous jacent.

Deux bouchons de forme circulaire (photo 38) situées en zone non renforcée sont aménagés pour désolidariser la zone neutre du reste du dallage. Les palpeurs des capteurs de déplacements sont localisés au centre de ces deux zones pour suivre le tassement du sol.

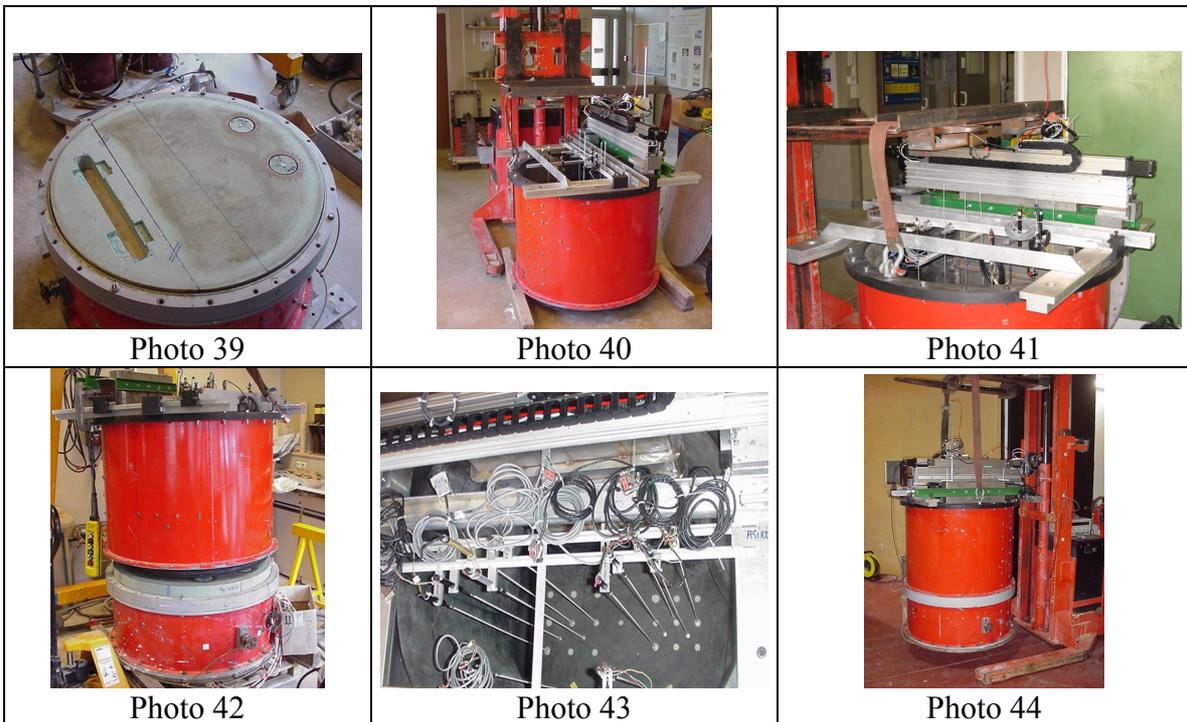
Le masse du dallage est de 1,83 kg, ce qui ne représente qu'une contrainte initiale de 0,82kPa à 27,8×g sur le massif de sol.



2.2.4 – Mise place des compléments d'équipement

Après ajustement du dallage sur le matelas de sable (photo 39), l'appareillage du conteneur d'essai est poursuivi par la préparation du tube-enveloppe dans lequel est montée la baudruche-réservoir (photo 40) et l'ajustement de la poutre-support du pénétromètre mobile (photo 41) : ajustement de la cote de la pointe pour rattraper l'épaisseur du dallage ; parmi toutes ces opérations, la plus délicate consiste à positionner correctement l'enveloppe en caoutchouc en contact avec le dallage sans risque de la blesser (photo 42). La poutraison-support des capteurs de déplacement est réglée essentiellement pour suivre les mouvements du dallage ; seuls, les capteurs de déplacements qui permettent de suivre les tassements en zone neutre sont positionnés avec précision à l'aplomb des bouchons aménagés dans le dallage (photo 43).

Tous les équipements connexes étant pré-installés et réglés (fourreau pour la reconnaissance au pénétromètre, pénétromètre électrique, capteurs de déplacement LVDT équipés de leur tige-allonge), le montage ainsi constitué (photo 44) est alors acheminé vers la centrifugeuse ; le poids total de l'équipage embarqué est de l'ordre de 1590 kg.

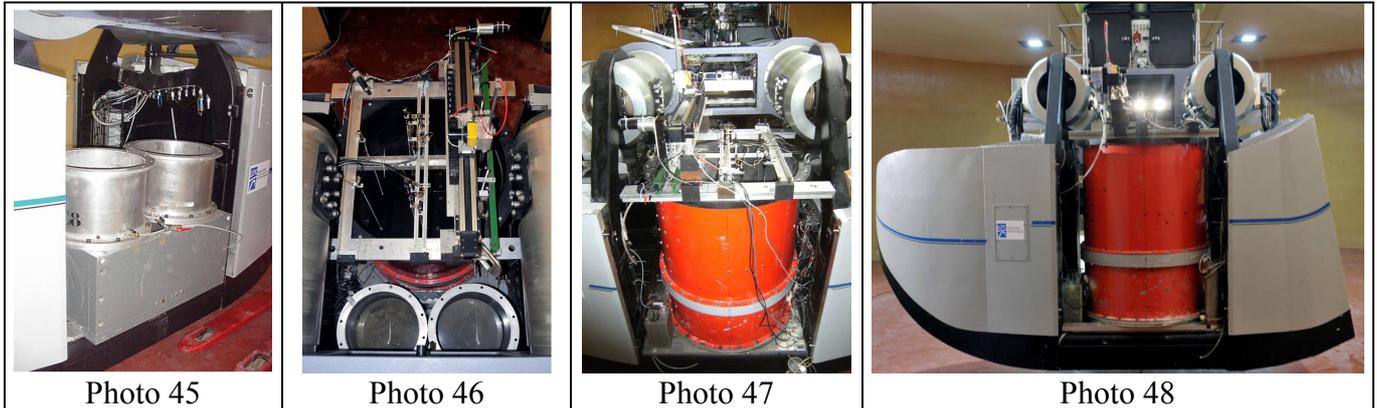


2.3 - Equipement et préparation du modèle sur la centrifugeuse

Sur la centrifugeuse, des dispositions particulières sont à prendre, compte tenu du remplissage en vol de la baudruche-réservoir qui assure le chargement sur le matelas placé au-dessus du sol compressible. Pour simuler une hauteur de remblai sur dallage de 10mètres à 27,8×g (360mm en modèle), il est nécessaire d'ajouter un volume d'eau équivalent à la contrainte générée (160kPa) ; la hauteur d'eau équivalente est de l'ordre de 580mm ce qui représente 365 litres d'eau (et donc une surcharge variable en vol de 99,5kN à 27,8×g).

Pour éviter un déséquilibre trop important qui nuirait à la pérennité de la centrifugeuse, on choisit d'embarquer un équipement constitué de 3 réservoirs (photo 45) pouvant accueillir 200 litres d'eau ; des vannes pneumatiques pilotées permettent d'expulser ce volume dès l'application du premier palier de chargement en remplissant la baudruche-réservoir ; un déséquilibre négatif acceptable imposé pendant la phase de consolidation est alors compensé graduellement au fur et à mesure du déroulement du

programme d'essai pour tendre *in fine* vers un déséquilibre positif acceptable en fin de chargement.



La base du conteneur est équipée d'un collecteur de canaux drainants radiaux qui est connecté à un vase positionné tout près du conteneur. La nappe à la surface du massif et le gradient de pression hydrostatique dans l'échantillon de sol sont imposés par ce vase rempli d'eau dont on maintient le niveau constant grâce à un exutoire.

Tous les capteurs sont connectés, réglés (course des capteurs de tassement) et contrôlés ; toutes les mesures seront initialisées à zéro à $1 \times g$ quelques heures avant le démarrage du programme de consolidation afin de s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble (photos 46 & 47) ; le dispositif d'essai prêt (photo 48), la mise montée à $27.8 \times g$ peut être envisagé.

2.4 – Démontage des dispositifs d'essais

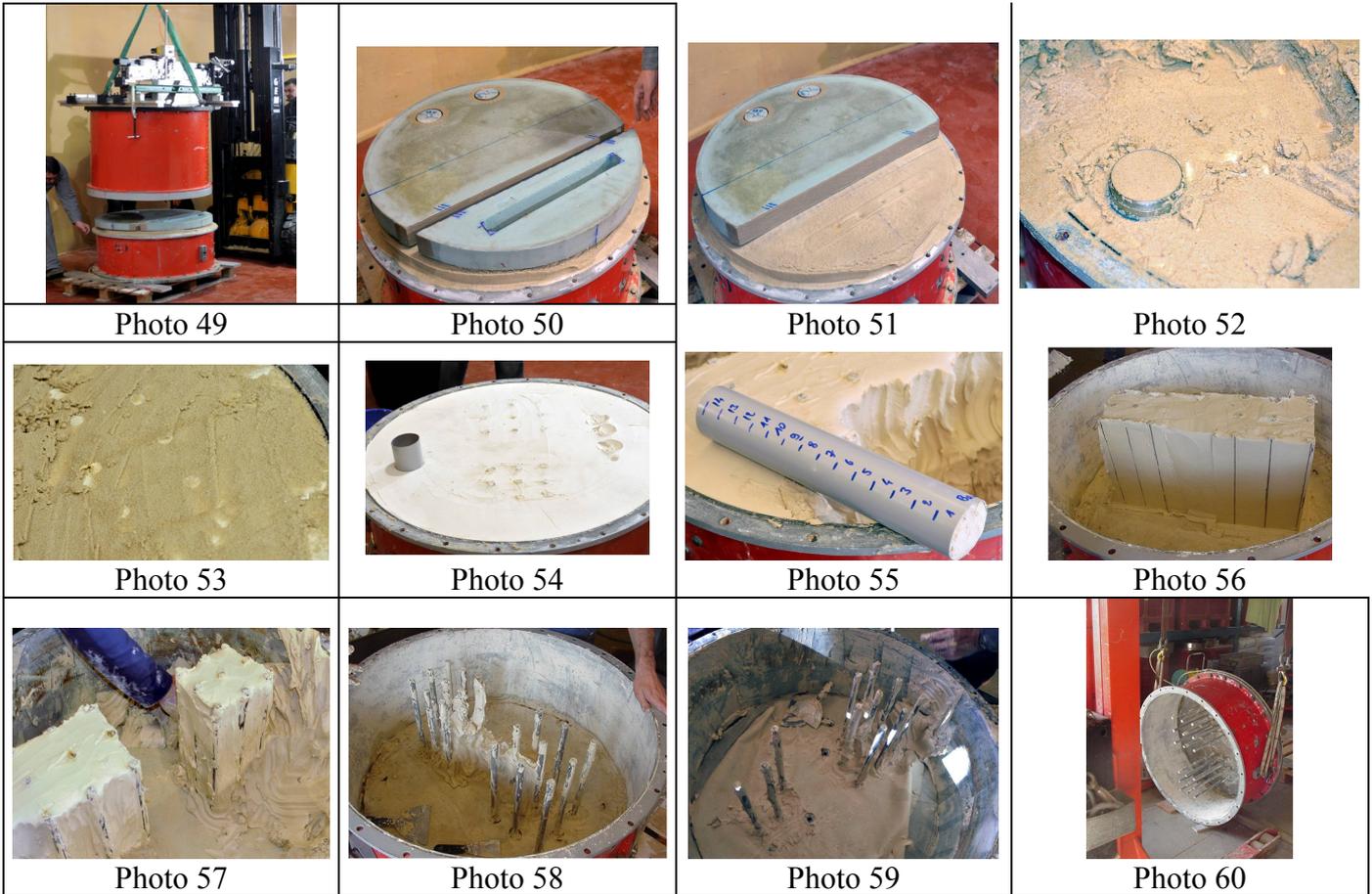
La phase de démontage est une phase importante pour le « retour d'expérience » où l'on va pouvoir faire un ensemble d'observations visuelles et de contrôles qui seront utiles pour la suite du programme d'essai. Le démontage du conteneur s'effectue d'abord par le retrait (photo 49) de tous les dispositifs annexes (élément supérieur de conteneur avec la baudruche-réservoir).

Le conteneur de massif de sol étant alors accessible, on procède d'abord au retrait du dallage (photo 50 & 51), du matelas de sable dont on vérifie la teneur en eau (photo 52). 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 (photo 53 & 54).

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 (photo 55); 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 verticalité (photo 56 & 57). Les inclusions sont retirées, nettoyées avec beaucoup de soin (photo 58 & 59). Le conteneur est retourné pour l'extraction des inclusions instrumentées par le fond du conteneur (photo 60). 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.



3- Programme expérimental

Le programme expérimental est présenté dans ses grandes lignes, puis en détaillant le programme de chargement des massifs lors de leur préparation et enfin en explicitant la surcharge appliquée qui simule d'une part une charge habituellement appliquée au cas de dallage sur inclusions rigides et d'autre part des charges semblables à celles appliquées dans l'étude de l'interface souple (cf. rapport ASIRi 2-07-3-08, Thorel et al., 2008).

3.1- Calendrier des essais en centrifugeuse

Pour ce type d'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 l'ordre de 85% et la phase de chargement par paliers.

Ce temps est court au regard des temps nécessaires aux phases préparatoires pré-essai (montage et contrôle) et post-essai (démontage et repli) dans la centrifugeuse : par expérience, ce temps est évalué à 2 fois 2 jours.

En amont de l'essai, hors centrifugeuse, le temps d'équipement et d'instrumentation du modèle est de l'ordre de 4 jours. 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 : le bilan fait état des 4 conteneurs réalisés avec le dallage (8 essais) dont on peut représenter l'organisation générale sous forme du tableau II.

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 capteurs 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, on rappelle la hauteur de matelas retenue pour l'essai cité.

Tableau II - planning des essais réalisés en centrifugeuse en 2008 - 2009 (surcharge type dallage)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M
Asiri 06 H _M =21 mm									
Asiri 07 H _M =36 mm									
Asiri 08 H _M =54 mm									
Asiri 09 H _M =11 mm									

3.2 – Déroulement d'un essai en centrifugeuse

L'ensemble des programmes d'essais suivis pour les 5 conteneurs sont présentés figure 2 ou Tableau III.

Tableau III - Déroulement des phases caractéristiques d'un essai.

Réf.	Hauteur de matelas		Durée de consolidation [minute]	Surcharge Palier n°0 [kPa]	Durée du palier n°0 [minute]	Surcharge Palier n°1 [kPa]	Durée du palier n°1 [minute]	Surcharge Palier n°2 [kPa]	Durée du palier n°2 [minute]
	modèle [mm]	prototype [m]							
C06	21	0,60	341	50,3	49	112,1	51	163,4	105
C07	36	1,00	302	49,5	56	115,0	62	163,8	121
C08	54	1,50	300	50,4	65	115,0	62	Fuite	Fuite
C09	11	0,30	346	50,0	62	115,0	120	155,0	12

Pour l'essai C06, le programme global de l'essai a été défini selon les critères suivants :

Le temps de consolidation de 350 minutes a été observé pour obtenir un degré de consolidation de 94%.

Considérant la similitude sur le critère de la diffusion, l'échelle de réduction des temps respecte le carré de l'accélération appliquée soit

$$t^* = 1/N^2 = 1/27,8^2 = 1,3 \times 10^{-3}$$

le temps de consolidation correspond alors à une période prototype de 160 jours (5,3 mois)

On peut imaginer que la surcharge totale de 100% (164kPa) soit atteinte après l'application de la surcharge en 4 paliers d'amplitude décroissante.

Tableau IV - Programme de chargement en centrifugeuse (conteneur C06)

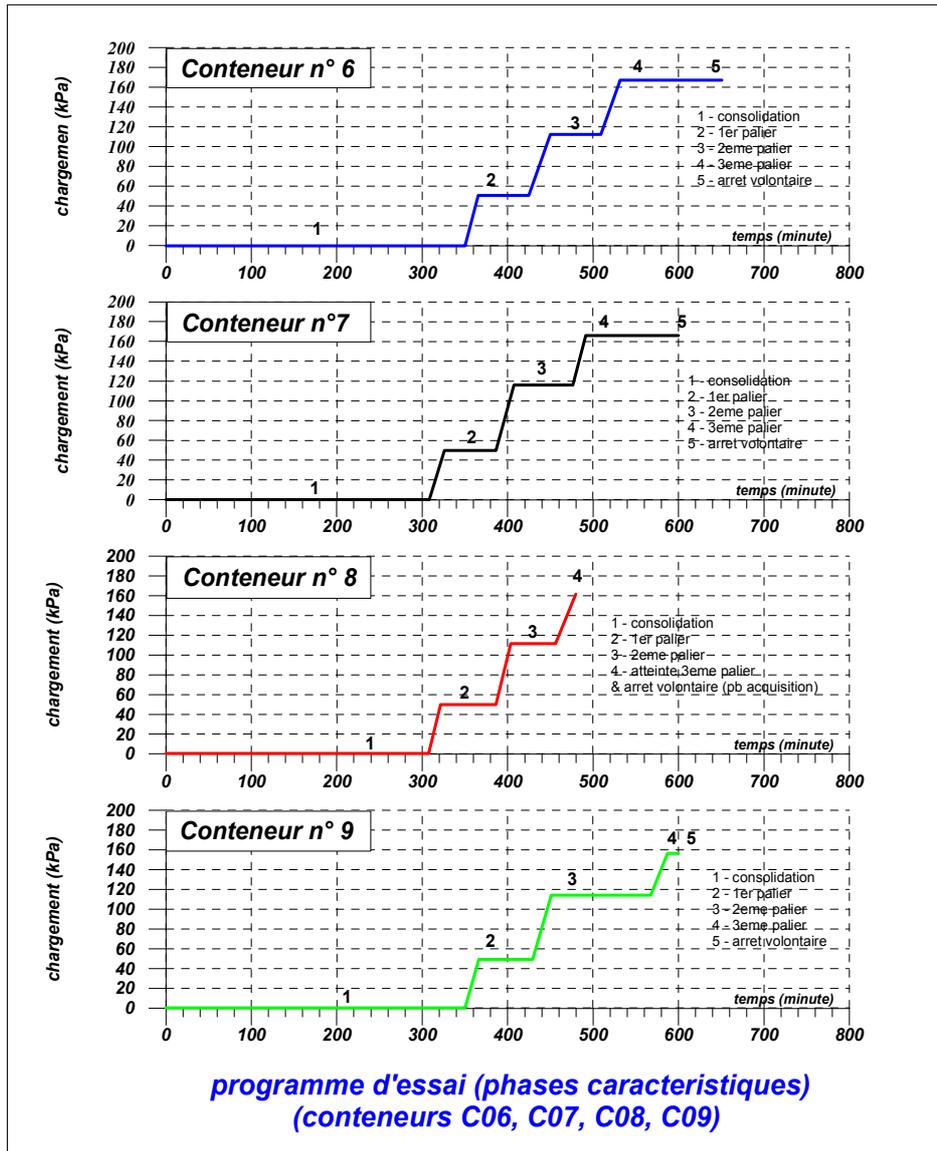
	Surcharge (%)	Contrainte (kPa)	Hauteur prototype (m)	Hauteur d'eau modèle (mm)
1 ^{er} palier	40	50	4.00	236
2 ^{ème} palier	70	115	7.00	413
3 ^{ème} palier	90	160	9.00	531

Dans la même logique, on considère que sur site, les temps de réalisation et de stabilisation peuvent être de l'ordre de 8 jours ; ramenée en temps modèle, la période choisie pour le maintien du palier a été estimée à 15minutes.

Le degré moyen de consolidation visé est toujours de l'ordre de 85% ; pour l'atteindre, les temps de consolidation se situent autour de 300minutes.

Les 3 paliers retenus sont les chargements à 50 kPa, 115kPa (70%) et 163kPa (100%) ; le premier palier est maintenu au moins 1 heure (temps moyen 63 minutes soit 34 jours prototype). Pour le second palier, la charge est maintenue pendant une heure également. Pour le dernier palier, il est intéressant de pousser la

consolidation un peu plus loin pour tendre vers une stabilisation des tassements dans la zone non affectée par les renforcements ; les temps moyens sont de 120 minutes (60 jours prototype) et le degré de consolidation tend vers une valeur supérieure à 80%. Ce dernier palier n'a pas pu être maintenu pour les conteneurs C08 (fuite et arrêt de l'enregistrement des données) et C09.



prog02.grf

Figure 2 - Programme de chargement suivi pour chaque conteneur (temps modèle)

4-Propriétés des massifs

Le sol compressible utilisé est un mélange de 80% de kaolin et de 20% de sable (Thorel et al., 2008). Le détail de la préparation des 4 conteneurs est donné en *ANNEXE 1*.

4.1 – Comparaison des massifs après préparation en laboratoire

A partir des éléments donnés dans les tableaux de préparation il est possible de confirmer une bonne reproductibilité dans la préparation des massifs de sol à la fois en termes de contrainte appliquée qu'en termes de répartition spatiale (figure 3).

Il est intéressant de noter que le plan de mesure des capteurs d'effort (C_n à C_{n+3}) se trouve localisé dans des zones non-discontinues et que, à l'inverse, quand il y a discontinuité (interface entre 2 couches), celle-ci est située au milieu d'un tronçon.

En centrifugeuse, ces discontinuités sont d'ailleurs atténuées dès la phase de mise en consolidation du massif à $27,8 \times g$.

Pour mémoire, sont aussi représentées les puissances de matelas optées pour chaque conteneur d'essai (18mm, 36mm, 54mm et 11mm).

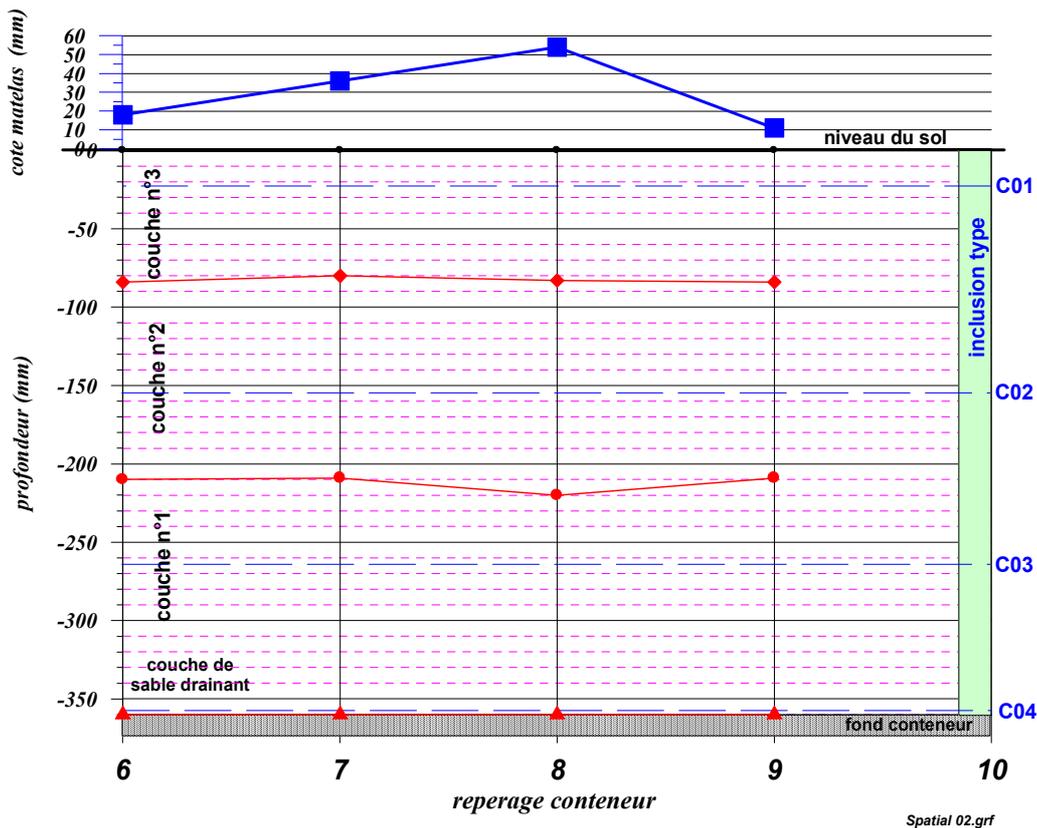


Figure 3 – Répartition spatiale des couches d'argile dans chaque conteneur

4.2-Matelas granulaire

Le matelas granulaire est reconstitué à partir de plusieurs fractions de sable d'Hostun (Thorel et al., 2008). Le tableau V récapitule sa géométrie et son poids volumique pour chacun des conteneurs.

Tableau V – Hauteur et poids volumiques des matelas

Conteneur	C06	C07	C08	C09
H_M [mm] modèle	$20 < H_M^m < 22$	$35 < H_M^m < 37$	$53 < H_M^m < 55$	$9,8 < H_M^m < 11,8$
H_M [m] prototype	$0,56 < H_M^p < 0,61$	$0,97 < H_M^p < 1,03$	$1,47 < H_M^p < 1,53$	$0,27 < H_M^p < 0,33$
γ_d [kN/m ³]	$16,6 < \gamma_d < 18,3$	$16,2 < \gamma_d < 17,1$	$16,1 < \gamma_d < 16,8$	$15,0 < \gamma_d < 18,0$
Contrainte générée par le matelas [kPa]	$10,1 < \gamma_d \cdot H_M < 10,2$	$16,6 < \gamma_d \cdot H_M < 16,7$	$24,6 < \gamma_d \cdot H_M < 24,7$	$4,8 < \gamma_d \cdot H_M < 4,9$

4-3 – Reconnaissance et profils géotechniques des massifs de sol centrifugés

Dans cette partie sont présentés les résultats obtenus au pénétromètre en cours d'essai centrifugé, ainsi que les profils de teneur en eau et de densité obtenus après démontage du conteneur.

4.5.1 Pénétrromètre

Tous les massifs de sol centrifugés font l'objet d'une reconnaissance à différentes étapes de l'avancement du programme d'essais; ici uniquement au pénétromètre parce que le secteur dédié est très limité (figure 4).

Le pénétromètre, équipé d'un capteur de force interchangeable de 25 daN, possède une pointe de 12 mm de diamètre. L'enfoncement (axe Z) est assuré par un système électrique à crémaillère qui permet de faire une reconnaissance sur 200mm. Il peut être déplacé en vol (axe Y) sur sa poutre support de façon à réaliser plusieurs profils sans arrêter la centrifugeuse.

Il eut été intéressant de combiner des reconnaissances a la fois au T-bar ($\varnothing=5\text{mm} \times l=20\text{mm}$) [Gaudin et al., 2008] et au pénétromètre, mais cette idée a été abandonnée compte tenu de l'étroitesse du secteur dédié à la reconnaissance et au regard des conditions limites entre essais. De plus la traversée du matelas granulaire aurait présenté des difficultés.

Le fourreau étanche disposé sur l'un des bords du conteneur, loin des groupes d'inclusions, permet d'effectuer la reconnaissance dans le massif de sol sous jacent au dispositif de chargement (baudruche remplie d'eau). La fenêtre ainsi aménagée (500mm \times 50mm) autorise l'exécution de 5 profils pénétrométriques (au plus 6) si l'on veut respecter une distance minimum de 7,5 diamètres entre chaque profil. La figure 4 permet de visualiser la configuration générale du conteneur en vol. Cette partie de l'interface rigide est désolidarisée du reste du dallage afin ne pas perturber la zone renforcée pendant les essais pénétrométriques.

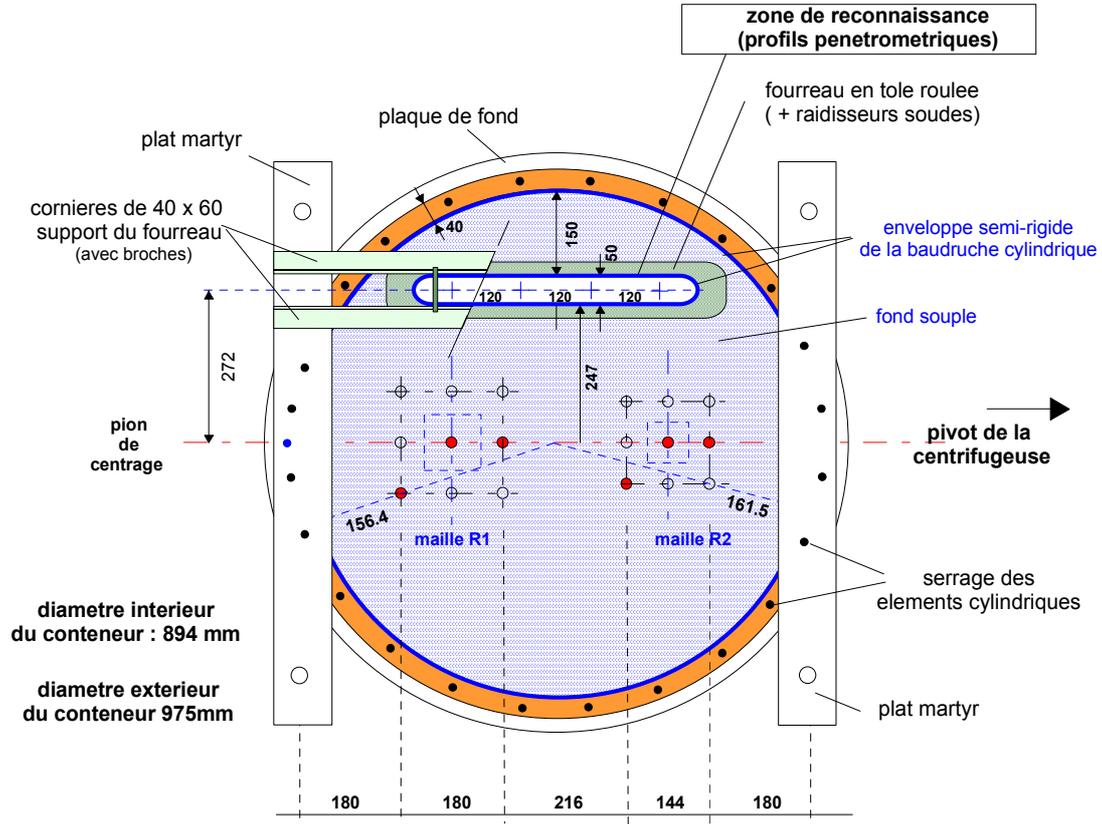


Figure 4 – Zone dédiée pour les reconnaissances au pénétromètre

Compte tenu du nombre limité de profils réalisables, on a choisi, autant que faire se peut de les exécuter lors de séquences caractéristiques :

- à la fin de la période de consolidation ;
- à la fin de chaque palier de chargement.

4.5.1.1 – Présentation des graphes

Chaque conteneur fait l'objet d'une présentation qui lui est propre ;

- le graphe supérieur présente en fonction du temps le déroulement de l'essai avec l'enchaînement des différentes étapes ; la première étape étant la phase de consolidation où aucune surcharge n'est appliquée, les étapes suivantes sont essentiellement les paliers de chargement.

Le profil de reconnaissance est repéré à la fois par son nom et le temps auquel il a été exécuté (temps précisé dans le cadre en bas de page).

La position du profil en Y est également rappelée en tête du graphe.

- le graphe inférieur présente les profils de reconnaissance aux différentes étapes d'avancement de l'essai. ; toutes les courbes pénétrométriques q_c sont tracées en fonction de la profondeur prototype Z_{pc} corrigée du gradient de G sur la hauteur du conteneur selon la formulation :

$$z_{pc} = N \cdot z_m \cdot \left(1 + \frac{z_m}{2R_S} \right) \quad 1.$$

où: $N = 27,8$;

$z_m =$ profondeur modèle en mètre ;

$R_S =$ rayon d'application de g à l'interface sol compressible-matelas (5,099 m).

Sur ce graphe, pour chaque conteneur d'essai, on rappelle également le positionnement des couches d'argile (répartition spatiale en valeur prototype) et la hauteur de matelas de recouvrement

associée ; la cote des capteurs d'effort qui équipent les inclusions est mentionnée.

La représentation graphique ne tient pas compte du tassement mesuré à chaque étape considérée. Par contre, la valeur de q_c initialisée à zéro correspond à la mesure au contact de la pointe avec le matelas; en effet, on note qu'il est difficile de dissocier le tassement seul du massif d'argile du tassement propre du matelas pour chaque phase d'essai. La cote de l'interface matelas-argile est difficile à évaluer avec précision.

Le tableau VI recense les tassements globaux mesurés en secteur neutre, aux étapes caractéristiques où sont exécutés les profils de reconnaissance au pénétromètre : les relevés sont la moyenne entre les 2 capteurs de déplacement dédiés à cette information.

Tableau VI – Relevés des tassements à chaque phase caractéristique

Phase d'essai	Conteneur C06		Conteneur C07		Conteneur C08		Conteneur C09	
	temps (min)	Δh mm	temps (min)	Δh mm	temps (min)	Δh mm	temps (min)	Δh mm
Fin de la consolidation (U%)	341' (93.6%)	0.73	302' (89%)	0.91	300' (89.7%)	0.72	346' (98%)	0.69
Début palier 1 (50 kPa)		2.21		2.16		1.49		1.43
Fin palier 1 (50 kPa)	+49'	2.94	+56'	2.84	+60'	2.19	+60'	2.27
Début Palier 2 (115 kPa)		4.04		3.87		2.76		3.07
Fin palier 2 (115 kPa)	+51'	5.04	+62'	5.03	+60'	3.73	+120'	3.74
Début palier 3 (163 kPa)		5.54		5.58	/(1)	/	(2)	4.05
Fin palier 3 (163 kPa)	+105'	5.74	+121'	5.94	/	/	+12'(1)	4.07

(1) arrêt volontaire de l'essai

(2) début palier 3 à 155 kPa

4.5.1.2 – Résultats

Deux présentations graphiques sont proposées :

- D'une part l'ensemble des profils de reconnaissance exécutés au fur et à mesure du déroulement de l'essai.
- D'autre part, le regroupement des courbes correspondantes aux mêmes étapes caractéristiques de chargement (consolidation, 1^{er} palier, 2^{ème} palier et dernier palier).

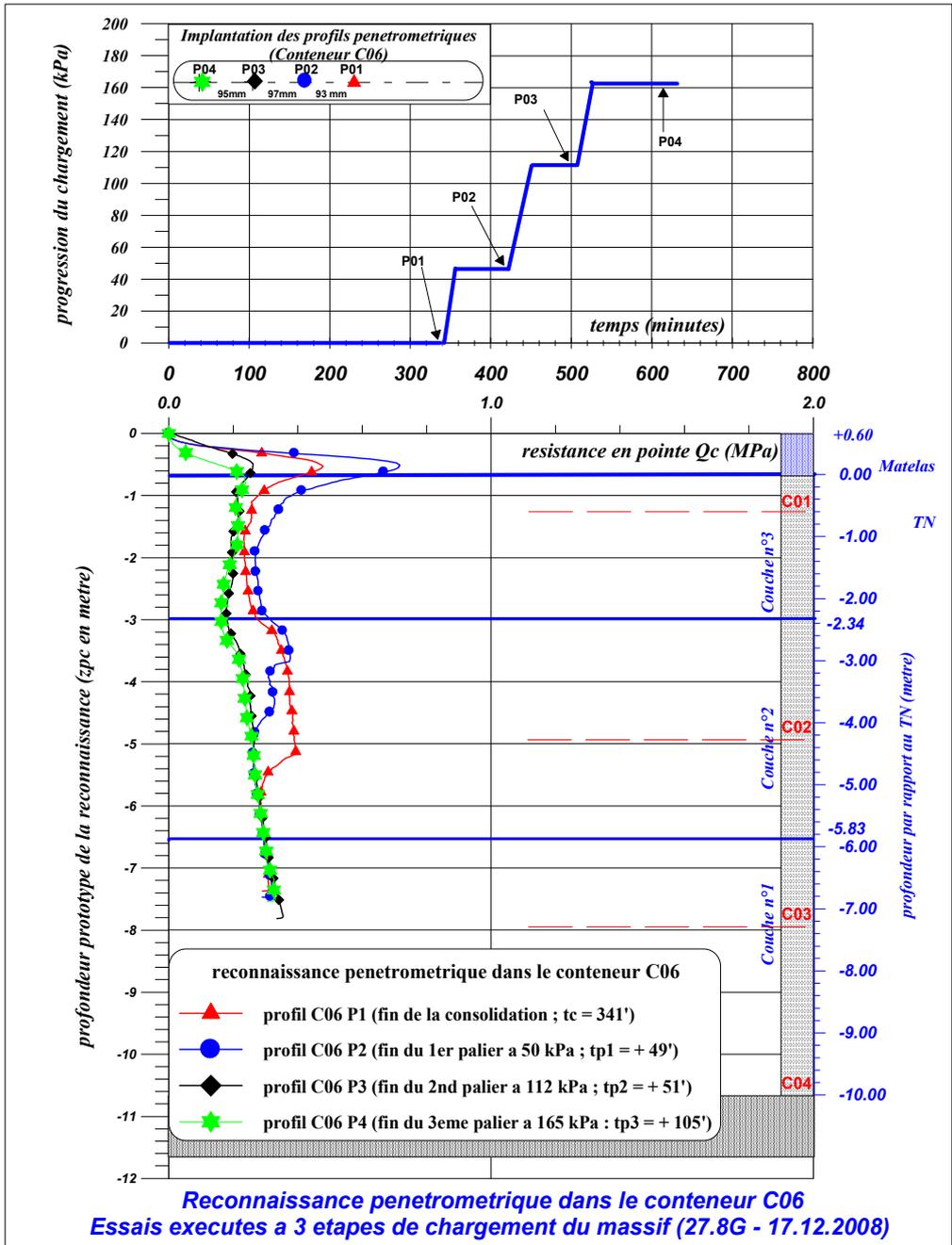
Seul le conteneur C08 n'a fait l'objet d'aucune reconnaissance pénétrométrique pour cause de panne du pilotage du dispositif.

En fin de période de consolidation (U% proche de 90%), les valeurs max de q_c mesurées sur les profils pénétrométriques de C09 (0,16 MPa), C06 (0,45MPa), C07 (0,75MPa) sont dans bien dans l'ordre de grandeur du rapport des hauteurs de matelas, même si pour la hauteur de matelas de $H_M = 0,3m$, on atteint les limites géométriques pour l'utilisation de ce type de pointe ($\varnothing=12mm$, angle de cône=60°).

On remarque que les interfaces entre chaque couche sont ressenties par le CPT même entre les couches n°2 et n°3 quelles que soient les amplitudes de chargement; l'effet de chargement se fait sentir dans la couche supérieure n°3 avec une diffusion progressive dans la couche n° 2 sous-jacente. La tendance laisse à penser qu'en deçà de 7m de profondeur (couche n°1), l'influence de la surcharge ne soit plus perceptible. Les limitations mécaniques du système embarqué n'ont pas permis de poursuivre les investigations au-delà de la base de la couche n°2.

Plus précisément, on constate une croissance logique des profils entre les étapes de consolidation et le 1^{er} palier de chargement à 50kPa pour les 3 massifs de sol qui ont pu être contrôlés.

Pour le conteneur C07, cet accroissement se manifeste encore jusqu'à la fin du 2^{ème} palier (115kPa), par contre on observe une sensible décroissance (de 1,6 à 1,2 MPa) sous le 3^{ème} palier de 163 kPa.



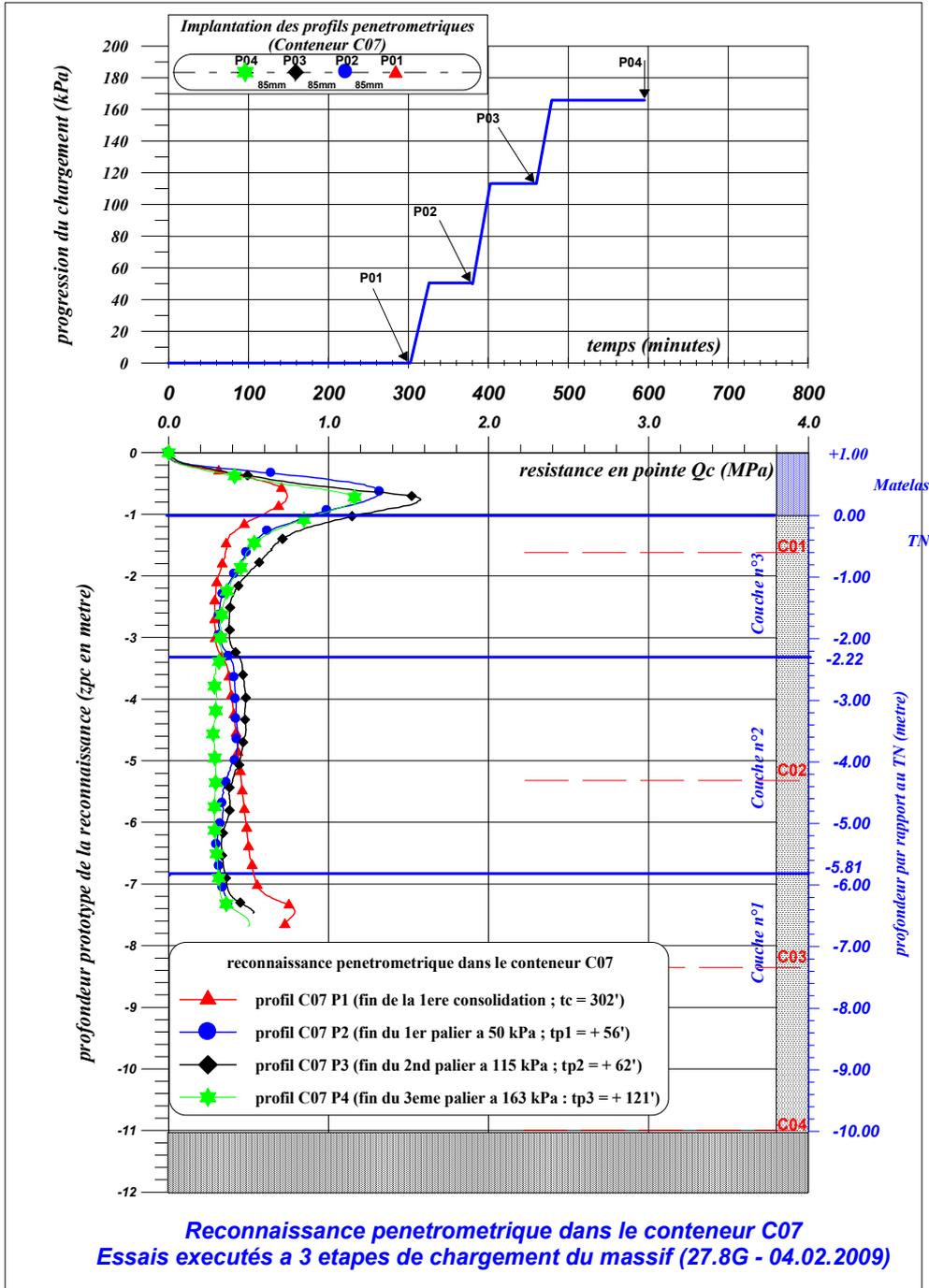
ASIRI C06.grf

Figure 5 – Reconnaissance pénétrométrique dans le conteneur C06,

Cette même observation peut être faite pour les conteneurs C06 et C09 au-delà de 115 kPa (perte de 0,5 pour C06 à 0,8 MPa pour C09). Cette différence de comportement peut être mise en parallèle avec la hauteur du matelas de transfert qui est de 0,6m pour C06 et 0,3 pour C09. Le report d'effort avec le dallage sur la tête des inclusions est manifestement plus important et par voie de conséquence plus sensible à la réduction de l'épaisseur du matelas de transfert ;

Une réduction du profil q_c traduit un effet de report qui est, quant à lui, moins sensible pour une épaisseur de matelas de 1m.

La tendance à la diminution des profils pénétrométriques devrait corroborer avec l'observation des efforts dans la tête et sur le fût des inclusions qui devrait se traduire par un accroissement des efforts ; l'effet de report d'effort entre le sol et les inclusions est à ce niveau purement qualitatif, les profils pénétrométriques étant réalisés « loin » de la zone renforcée.



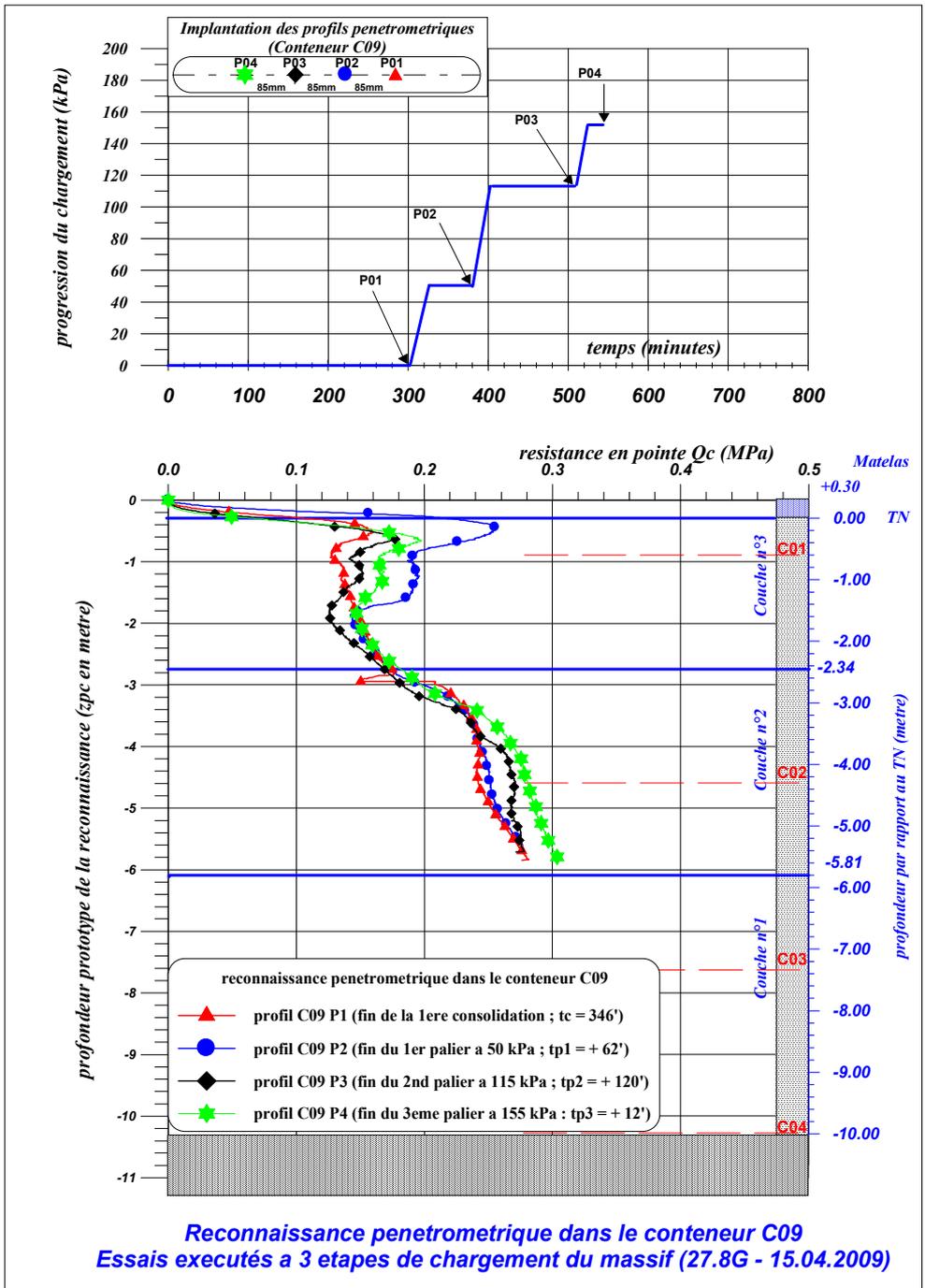
ASIRI C07.grf

Figure 6 – Reconnaissance pénétrométrique dans le conteneur C07

Par ailleurs, la variation des profils pénétrométriques au fur et à mesure de l'avancement des programmes de chargements pourrait peut-être s'expliquer ainsi :

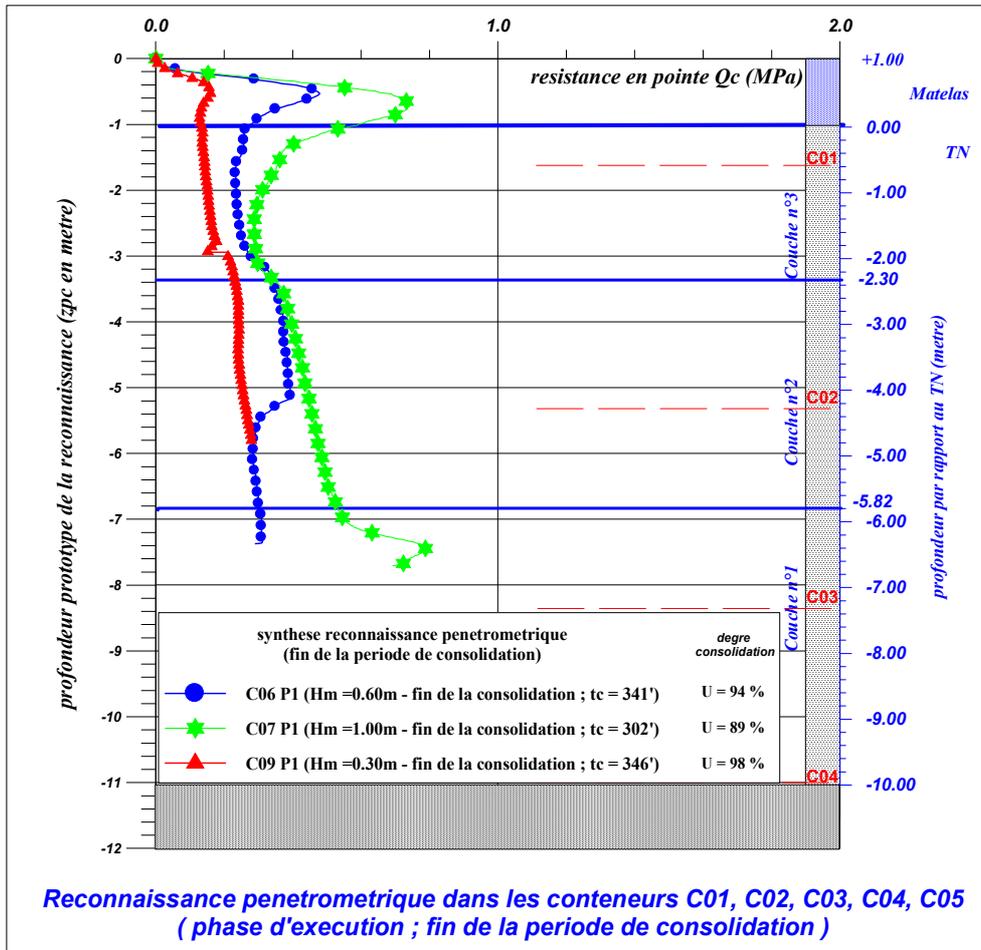
- si le report de charge s'effectue correctement sur les inclusions, on comprend que les profils de résistance dans le sol diminuent : ils devraient tendre vers une stabilisation, or, on observe notamment sur le conteneur C06 ($H_M = 0.60m$) une sensible réduction entre P3 et P4. Cette observation permet de confirmer que la consolidation propre du massif de sol se poursuit.
- Par contre, pour le conteneur C09, la faiblesse de l'épaisseur du matelas ($H_M = 0.30m$) autorise le report de charge jusqu'à 115kPa, mais au-delà, on assiste probablement à un léger poinçonnement du dallage qui redistribue également la charge sur le sol d'où la manifestation d'un accroissement entre P3 et P4.

Concernant, la comparaison des profils entre essais aux mêmes états de chargement la logique est respectée ; l'accroissement d'effort observé au travers du matelas de transfert d'épaisseur ($H_M = 1m$) signifie que le remblai joue bien son rôle répartiteur.



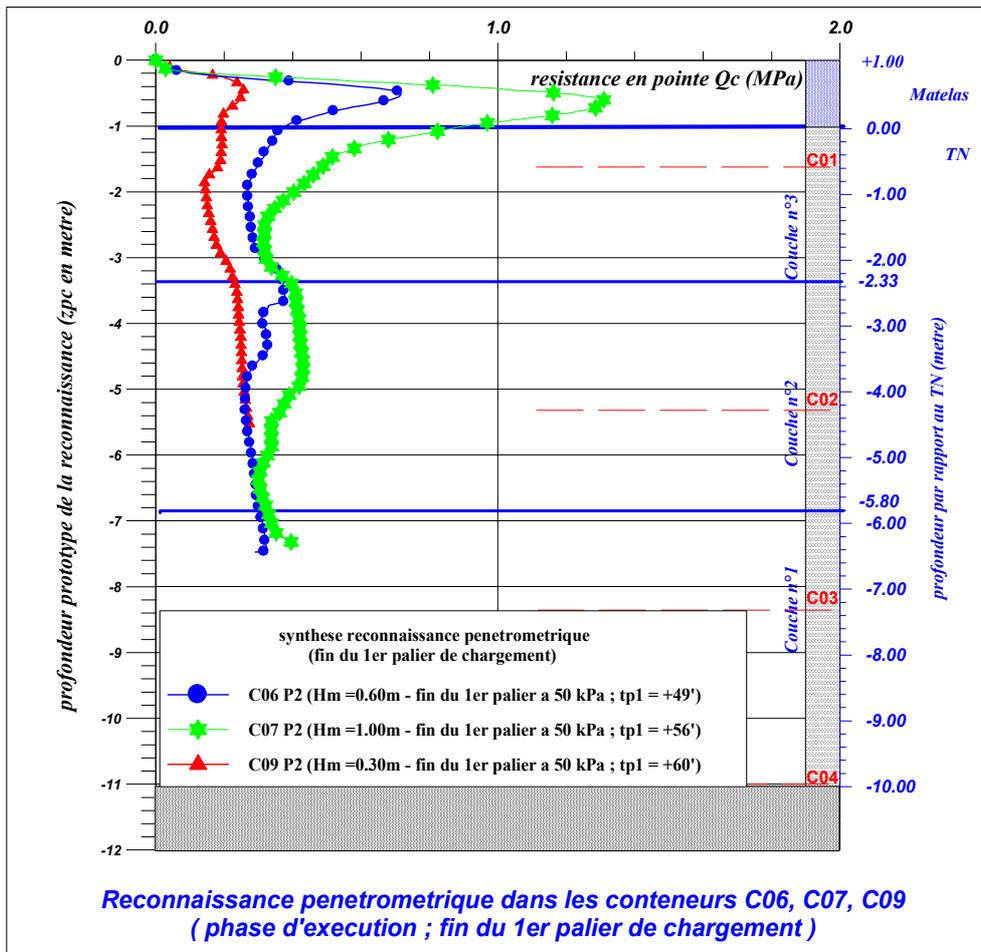
ASIRI C09.grf

Figure 7 – Reconnaissance pénétrométrique dans le conteneur C09



ASIRI-Y1.grf

Figure 8 – Reconnaissance pénétrométrique dans les conteneurs C06, C07, C09 (phase d'exécution : fin de la période de consolidation)



ASIRI-Y2.grf

Figure 9 – Reconnaissance pénétrométrique dans les conteneurs C06, C07, C09 (phase d'exécution : fin du 1^{er} palier de chargement)

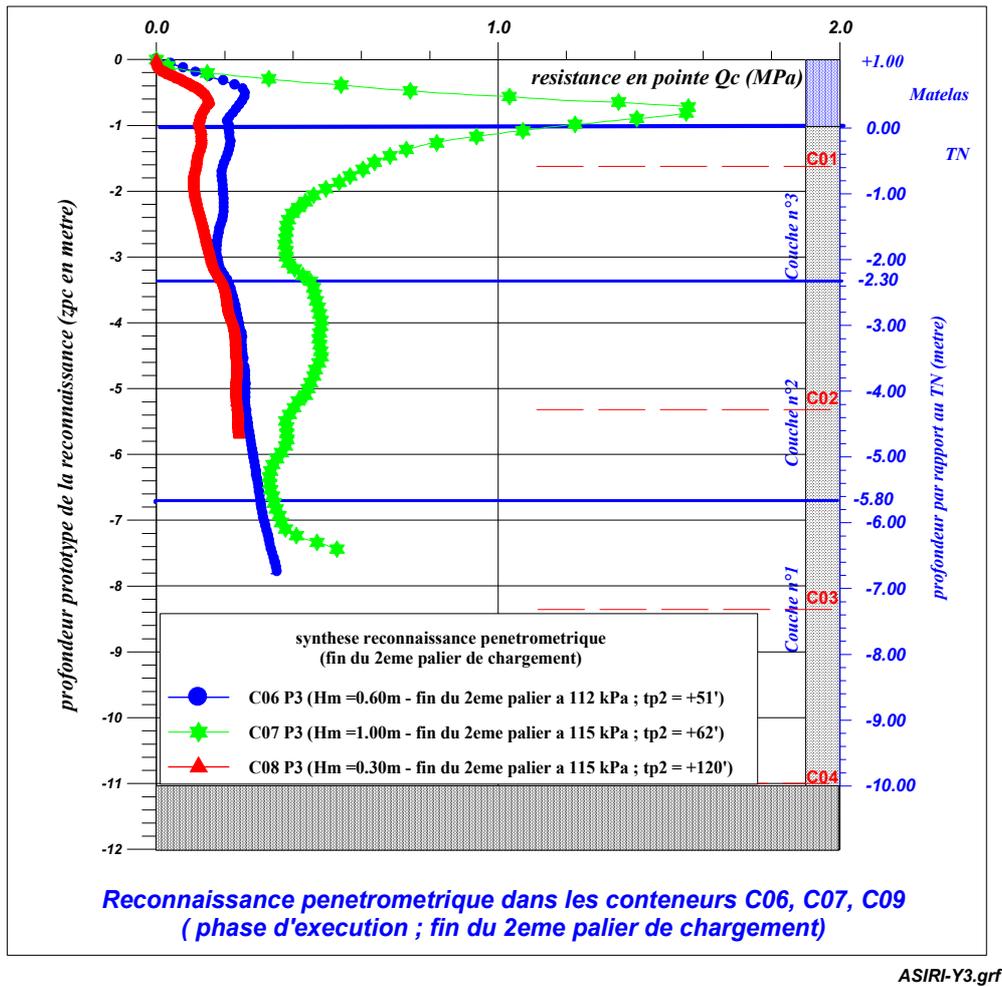
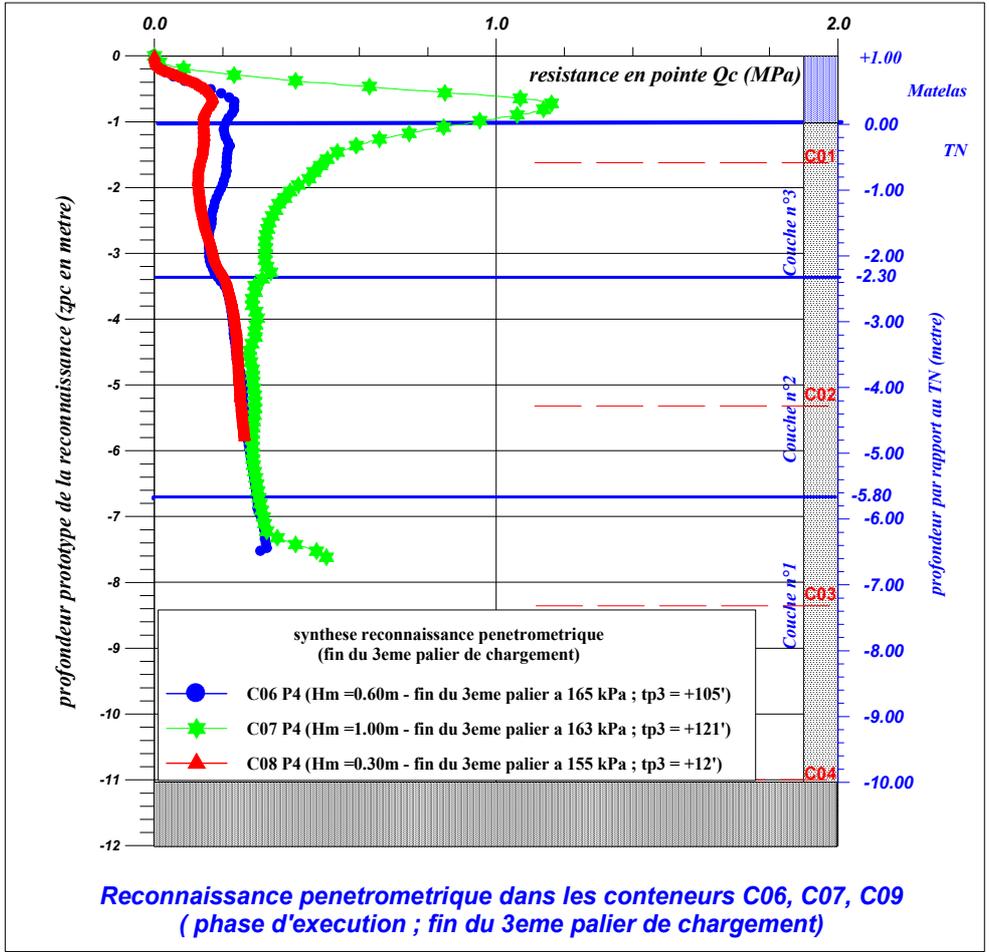


Figure 10 – Reconnaissance pénétrométrique dans les conteneurs C06, C07, C09 (phase d'exécution : fin du 2^{ème} palier de chargement)



ASIRI-Y4.grf

Figure 11 – Reconnaissance pénétrométrique dans les conteneurs C06, C07, C09 (phase d'exécution : fin du 3^{ème} palier de chargement)

4.5.2 - Prélèvement d'échantillons par carottage

Après chaque expérimentation en centrifugeuse, un sondage carotté est effectué à 1×g dans le conteneur d'argile ; le temps écoulé entre l'exécution de ce sondage et la fin de l'essai en centrifugeuse est de l'ordre de 24 heures (temps nécessaire à « désarmer » le conteneur placé dans la nacelle de la centrifugeuse).

L'opération consiste à enfoncer un tube en PVC (Ø 80 mm) dans le massif, sur toute sa hauteur, pour prélever une carotte de sol qui est ensuite découpée en tronçons de l'ordre de 20 à 30 mm. Les mesures initiales (juste après prélèvement) et finales (après une période d'étuvage) des poids respectifs permettent de déterminer la teneur en eau en fonction de la profondeur, ce qui permet d'avoir une bonne idée de la valeur moyenne de la teneur en eau finale, w_f , par couche.

A partir de ces éléments expérimentaux, on déduit les valeurs de densités correspondantes. La méthode de détermination de la densité à partir de la mesure de la teneur en eau finale moyenne par couche est présentée en annexe. Pour l'ensemble des conteneurs, les profils w_f et γ_h en fonction de la profondeur modèle z_m peuvent ainsi être tracés.

Pour déterminer la résistance nette en pointe, cette valeur de poids volumique moyen γ_h doit être introduite dans les formulations suivantes :

$$q_{cn} = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \tag{2}$$

avec
$$\sigma_{v0} = N \cdot g \cdot \rho_h \cdot z_m \left(1 + \frac{z_m}{2R_s} \right) \quad \text{et} \quad \sigma'_{v0} = N \cdot g \cdot (\rho_h - \rho_w) \cdot z_m \left(1 + \frac{z_m}{2R_s} \right) \quad 3.$$

4.5.2.1 - Profils de teneur en eau

Le tableau VII et la figure 12 recensent l'ensemble des mesures de teneur en eau effectuées ; pour chaque conteneur, il est possible de tracer un profil de teneur en eau en fonction de la profondeur.

Tableau VII – Echantillonnage des teneurs en eau après essai

N°	Profondeur Modèle & Proto (mm) (m)		N° couche	C06 w %	C06 w _{mov} %	C07 w %	C07 w _{moy} %	C08 w %	C08 w _{mov} %	C09 w %	C09 w _{moy} %
1	-15	-0.418	3	40.14	40.05	41.11	40.60	40.66	40.45	41.06	40.87
2	-45	-1.257		40.14		41.11		40.66		41.06	
3	-75	-2.100		39.87		39.58		40.04		40.51	
4	-105	-2.949	2	39.22	39.21	39.27	39.16	39.28	39.18	39.47	39.30
5	-135	-3.803		39.36		39.33		39.23		39.38	
6	-165	-4.661		39.59		39.47		39.25		39.48	
7	-195	-5.525		38.67		38.56		38.94		38.86	
8	-225	-6.393	1	38.52	38.12	37.81	36.64	37.37	36.83	36.95	36.91
9	-255	-7.266		37.98		37.27		37.18		36.99	
10	-285	-8.144		38.05		37.09		37.42		3.94	
11	-315	-9.027		37.85		36.28		36.81		36.89	
12	-345	-9.515		38.20		34.73		35.35		36.79	

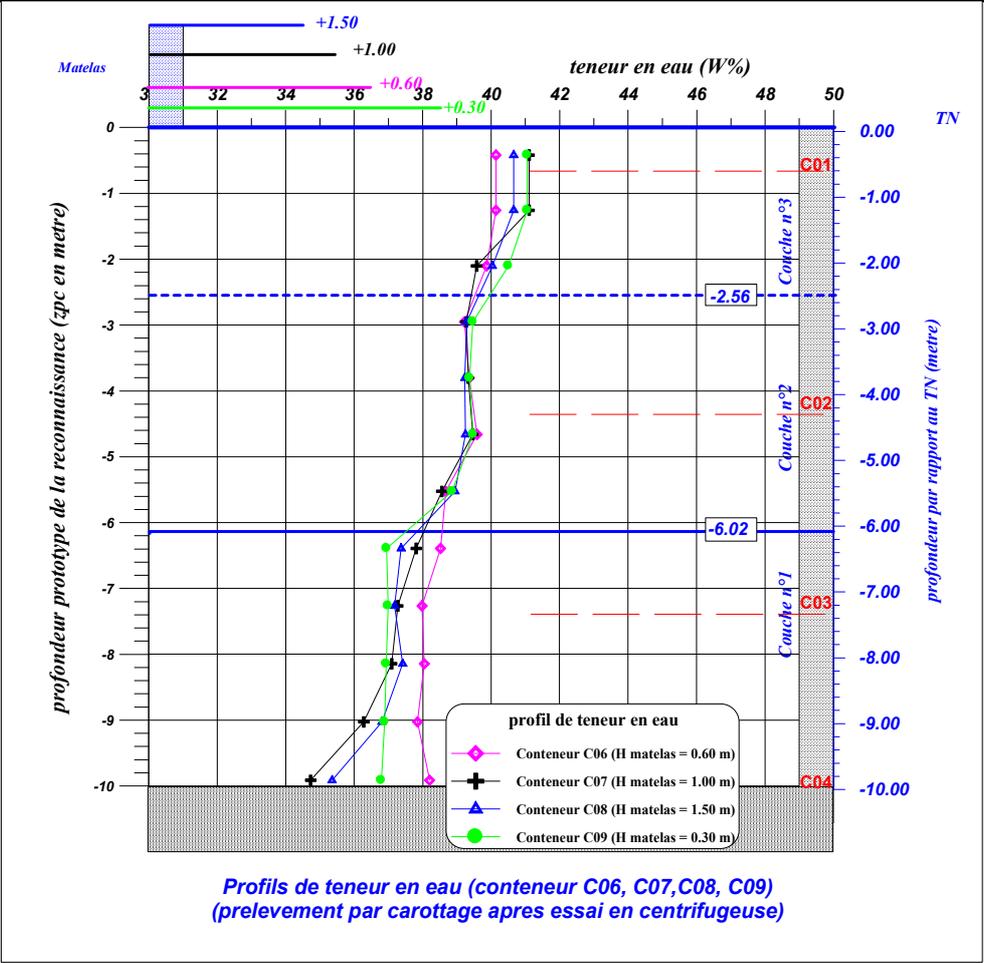


Figure 12 – Profils de teneur en eau dans les conteneurs C06, C07, C08, C09 (prélèvement par carottage après essai en centrifugeuse)

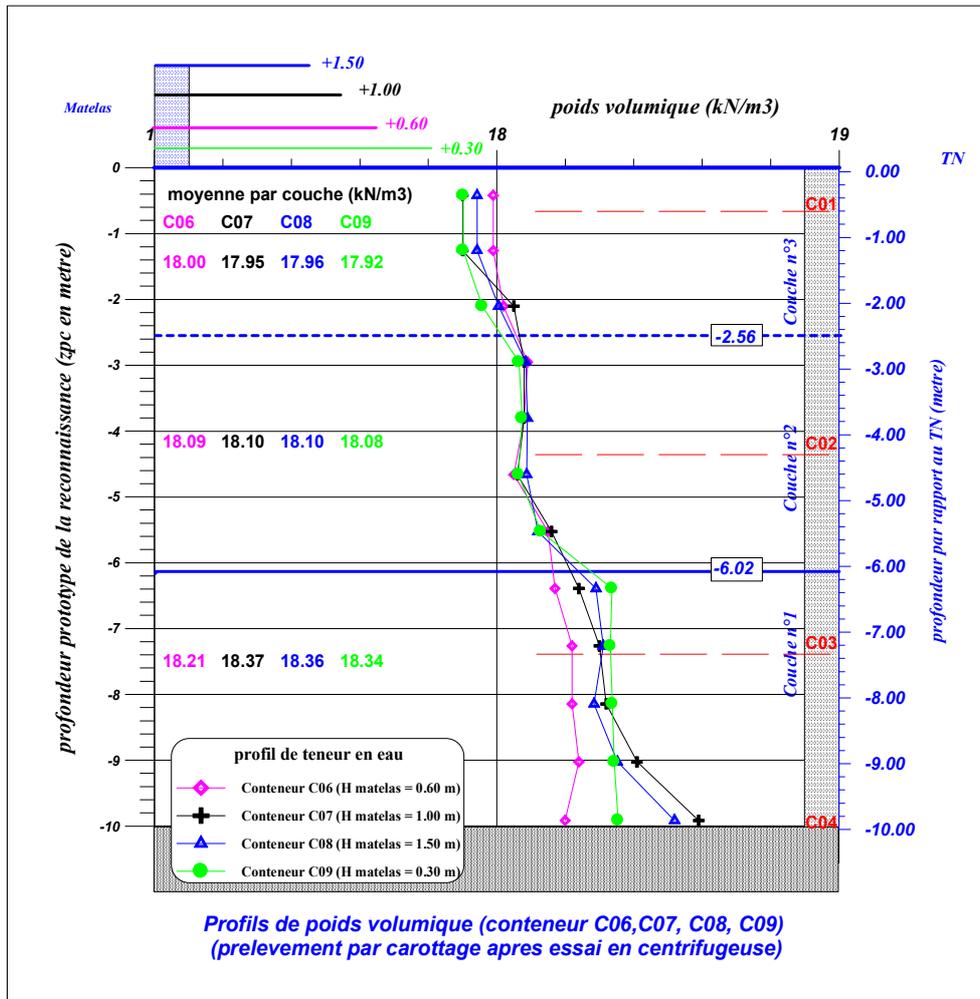
Pour identifier chaque couche de sol, on pratique une moyenne sur les résultats pour chacune d'elles. Ces résultats, après essais en centrifugeuse, permettent de compléter, pour chaque conteneur, les tableaux où sont présentées par ailleurs les caractéristiques du massif en fin de la phase préparatoire de consolidation en laboratoire.

4.5.2.2 - Profils de densités

Les profils de densités sont obtenus directement à partir des moyennes des teneurs en eau w % pour chaque couche (figure 13). Les résultats, après essais en centrifugeuse, sont recensés dans le tableau VIII et permettent de compléter, pour chaque conteneur, les **tableaux** où sont présentées par ailleurs les caractéristiques du massif en fin de la phase préparatoire de consolidation en laboratoire.

Tableau VIII – Poids volumique par couche et par conteneur d'essai

N°	Profondeur		N° couche	C06	C06	C07	C07	C08	C08	C09	C09
	Modèle & Proto (mm)	Proto (m)		γ_h kN/m ³							
1	-15	-0.418	3	17.99	18.00	17.90	17.95	17.94	17.96	17.90	17.92
2	-45	-1.257		17.99		17.90		17.94		17.90	
3	-75	-2.100		18.02		18.05		18.00		17.96	
4	-105	-2.949	2	18.09	18.09	18.08	18.10	18.08	18.10	18.06	18.08
5	-135	-3.803		18.08		18.08		18.09		18.07	
6	-165	-4.661		18.05		18.06		18.09		18.06	
7	-195	-5.525		18.15		18.16		18.12		18.13	
8	-225	-6.393	1	18.17	18.21	18.24	18.37	18.29	18.36	18.34	18.34
9	-255	-7.266		18.22		18.30		18.31		18.33	
10	-285	-8.144		18.22		18.32		18.28		18.34	
11	-315	-9.027		18.24		18.41		18.35		18.34	
12	-345	-9.515		18.20		18.59		18.52		18.35	



gamma6.grf

Figure 13 – Profils de poids volumiques les conteneurs C06, C07, C08, C09 (prélèvement par carottage après essai en centrifugeuse)

5-Résultats des essais

Les résultats détaillés sont présentés en annexe. Dans cette partie sont montrés les résultats des mesures relativement au début de la consolidation (une remise à zéro est faite dès l'arrivée à l'accélération centrifuge de $27,8 \times g$). Puis une analyse est présentée en termes d'efficacité. La géométrie des essais et les charges appliquées sont récapitulées dans le tableau IX. L'analyse des efforts dans les pieux et des frottements sera présentée dans un rapport ultérieur.

Tableau IX – Géométrie et surcharge appliquée

Conteneur	Matelas			Surcharge		
	H_M prototype [m]	γ_d [kN/m ³]	Contrainte sous le matelas [kPa]	q_0 palier 0 [kPa]	q_1 palier 1 [kPa]	q_2 palier 2 [kPa]
C06	0,6	16,4	16,1	50,3	112,1	163,4
C07	1	16,4	22,6	49,5	115,0	163,8
C08	1,5	16,4	30,8	50,4	115,0	-
C09	0,3	16,4	11,2	50,0	115,0	155,0

La contrainte sous le matelas est due au matelas de sable, au dallage ainsi qu'à la baudruche ce qui représente respectivement 5,45kPa pour la membrane et 0,82kPa pour le dallage. Les efforts « à l'échelle du modèles » théoriques transmis aux inclusions sans phénomène de report devraient être :

- entre 2,8N et 7,8N lors de la consolidation ;
- entre 15,6 et 20,7N lors de l'application du palier q_0 ;
- entre 32,1 et 37,1N lors de l'application du palier q_1 ;
- entre 42,3 et 47,4N lors de l'application du palier q_2 ;

5.1 – Mesures en fonction du temps

Dans cette partie sont présentées les mesures des différents capteurs en fonction du temps après une remise à zéro effectuée lorsque l'accélération centrifuge a été atteinte. Il s'agit donc de variations par rapport à l'état initial, qui s'affranchit des effets parasites liés à la montée en accélération du modèle. Les expérimentations sont présentées par conteneur en distinguant les deux groupes de neuf inclusions ($\alpha=3.14\%$ et 4.92%).

Ces résultats permettent d'illustrer l'effet de la surcharge sur la réponse des inclusions et sur les tassements mesurés au-dessus du dallage.

Les variations de tassements sont influencées par l'application de la surcharge, mais sont toujours incluses dans un fuseau assez resserré. Il n'est pas aisé de conclure sur l'éventuel tassement différentiel entre les mesures au droit des inclusions et celle entre les inclusions.

Sans frottement du sol compressible sur les inclusions, ces variations d'effort devraient être nulles lors de la phase de consolidation, et identiques dans chaque inclusion sous l'effet de la surcharge. Les variations d'effort dans les inclusions montrent :

- qu'elles sont généralement négligeables dans la phase de consolidation au regard des phases de chargement (à l'exception du capteur C02 de l'inclusion d'angle R1/31 du conteneur C09, $H_M=0,3m$, $\alpha=3,1\%$) ;
- qu'elles sont supérieures de plusieurs ordres de grandeur aux efforts estimés dans le cas théorique où il n'y aurait pas de report, ce qui indique un bon fonctionnement de la fondation composite ;
- que l'application d'une surcharge engendre une augmentation des efforts dans les inclusions ;

- que lors des paliers de chargement, les efforts évoluent, preuve d'une évolution des reports d'effort au cours du temps probablement liée à la poursuite du tassement du sol compressible sous l'action du chargement ;
- que l'application du palier q_0 de 50kPa environ montre un accroissement des efforts dans les inclusions dans tous les cas ;
- que l'application du palier q_1 de 115kPa environ entraîne une diminution des efforts (signe probable d'une rupture dans le matelas) dans le cas du matelas le moins épais (0,3m en prototype), mais pas dans les autres ;
- que l'application du palier q_2 de 115kPa environ entraîne aussi une diminution des efforts (signe probable d'une rupture dans le matelas) dans le cas des matelas d'épaisseur intermédiaire (0,6m et 1m en prototype) ; pour le matelas le plus épais, l'essai n'a pas pu être mené à son terme.

Conteneur C06 $H_M=0,6m$, $\alpha=3,1\%$

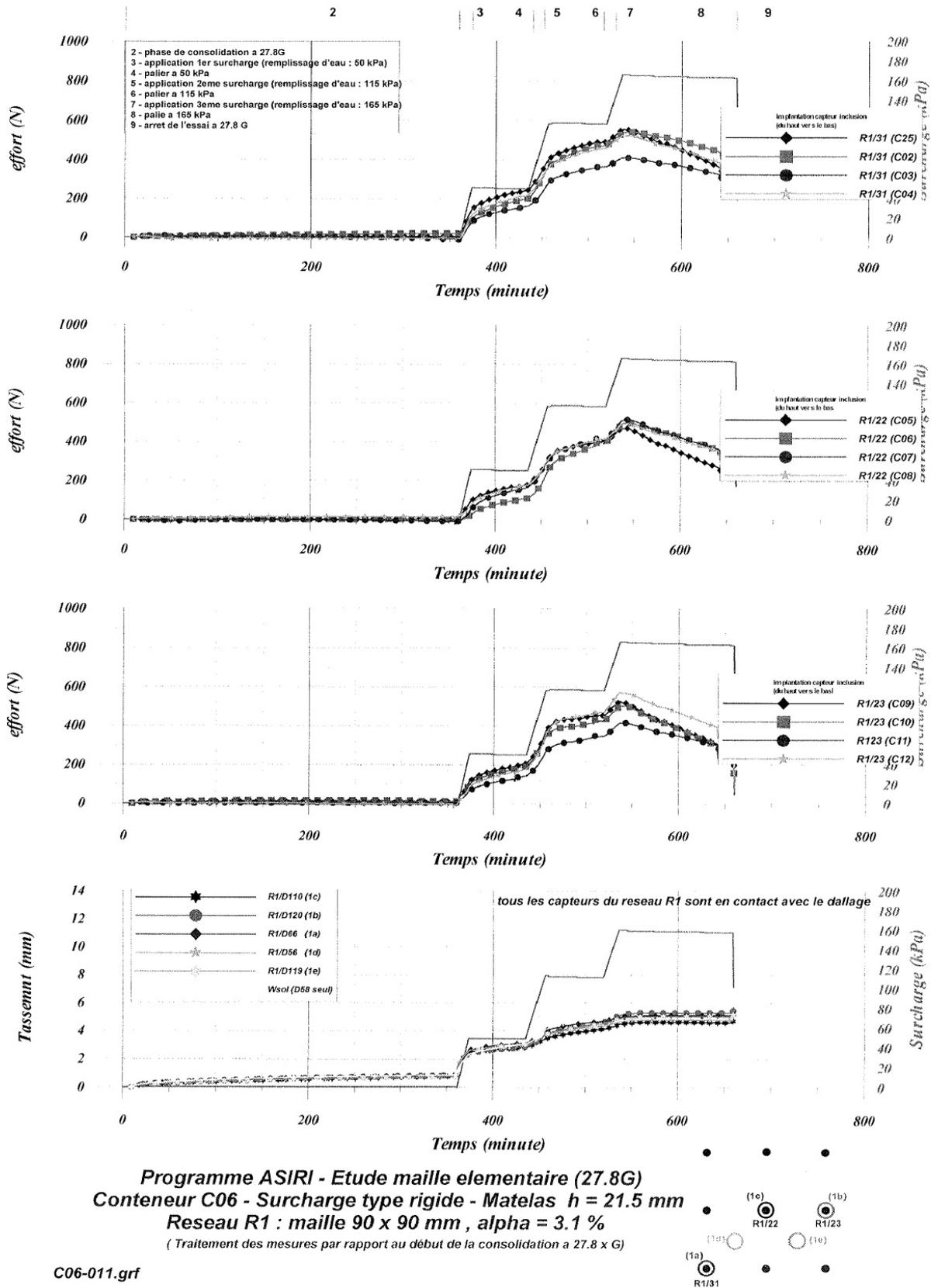
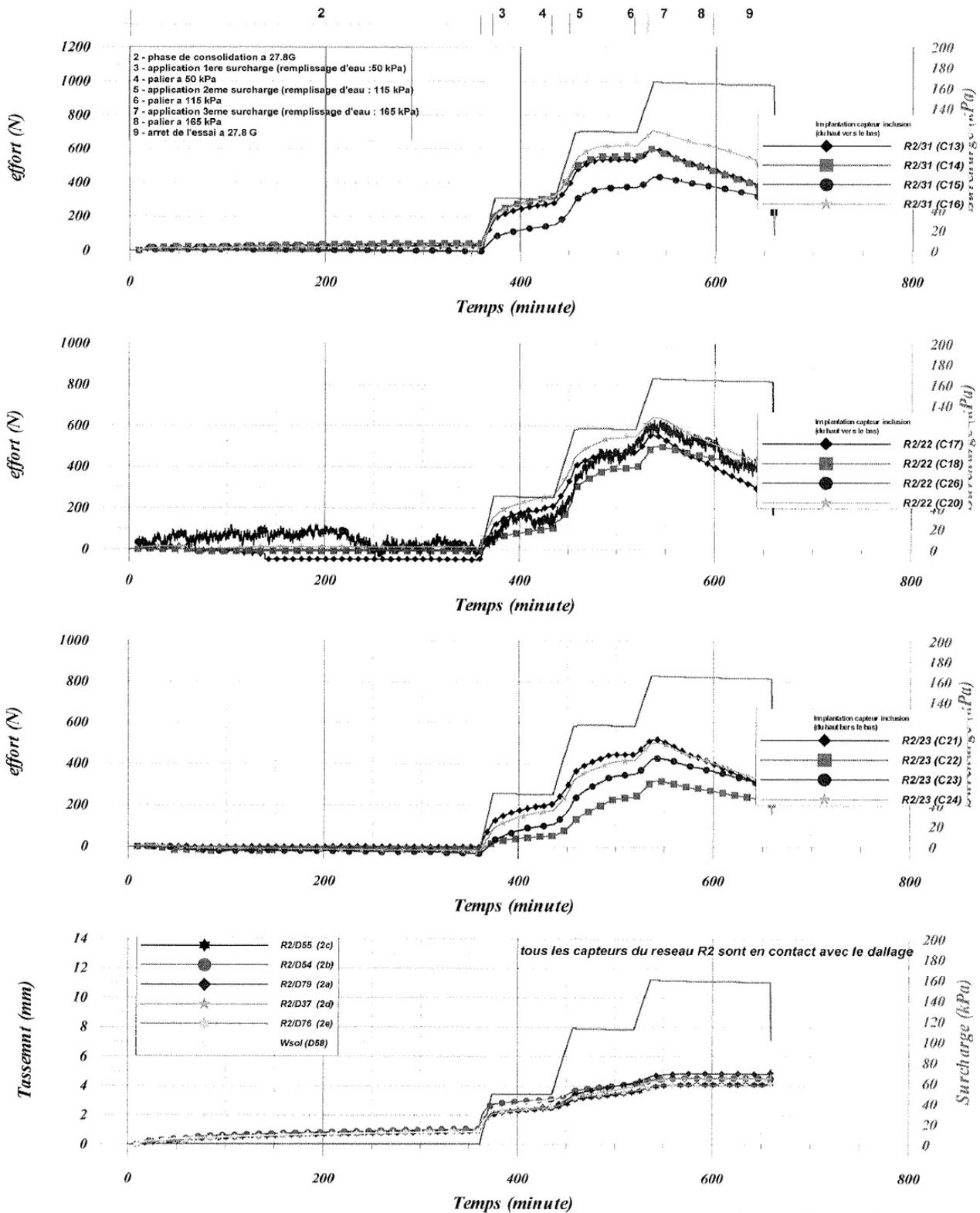


Figure 14 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C06 $H_M=0,6m$, $\alpha=3,1\%$

Conteneur C06 $H_M=0,6m$, $\alpha=4,9\%$



Programme ASIRI - Etude maille elementaire (27.8G)
 Conteneur C06 - Surcharge type dallage - Matelas $h = 21.5$ mm
 Reseau R2 ; maille 72×72 mm , $\alpha = 4.9$ %
 (Traitement des mesures par rapport au debut de la consolidation a $27.8 \times G$)
 C06-021.grf

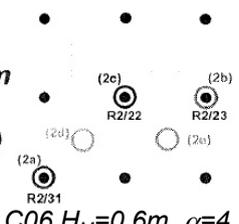
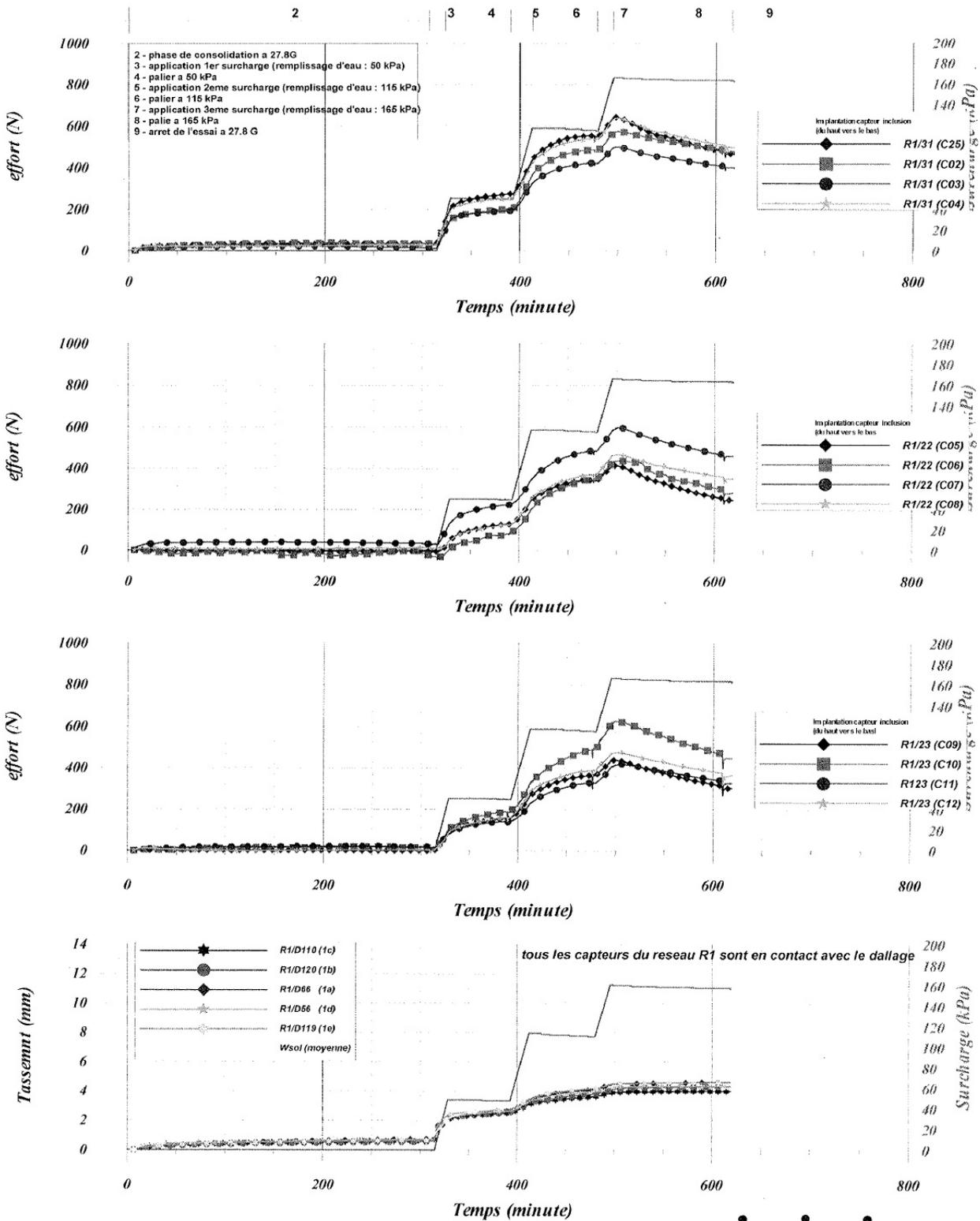
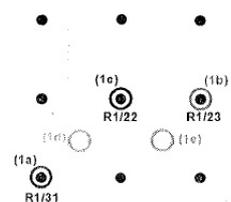


Figure 15 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C06 $H_M=0,6m$, $\alpha=4,9\%$

Conteneur C07 $H_M=1m$, $\alpha=3,1\%$



Programme ASIRI - Etude maille elementaire (27.8G)
Conteneur C07 - Surcharge type rigide - Matelas h = 36 mm
Reseau R1 : maille 90 x 90 mm , alpha = 3.1 %
 (Traitement des mesures par rapport au début de la consolidation a 27.8 x G)



C07-011.grf

Figure 16 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C07 $H_M=1m$, $\alpha=3,1\%$

Conteneur C07 $H_M=1m$, $\alpha=4,9\%$

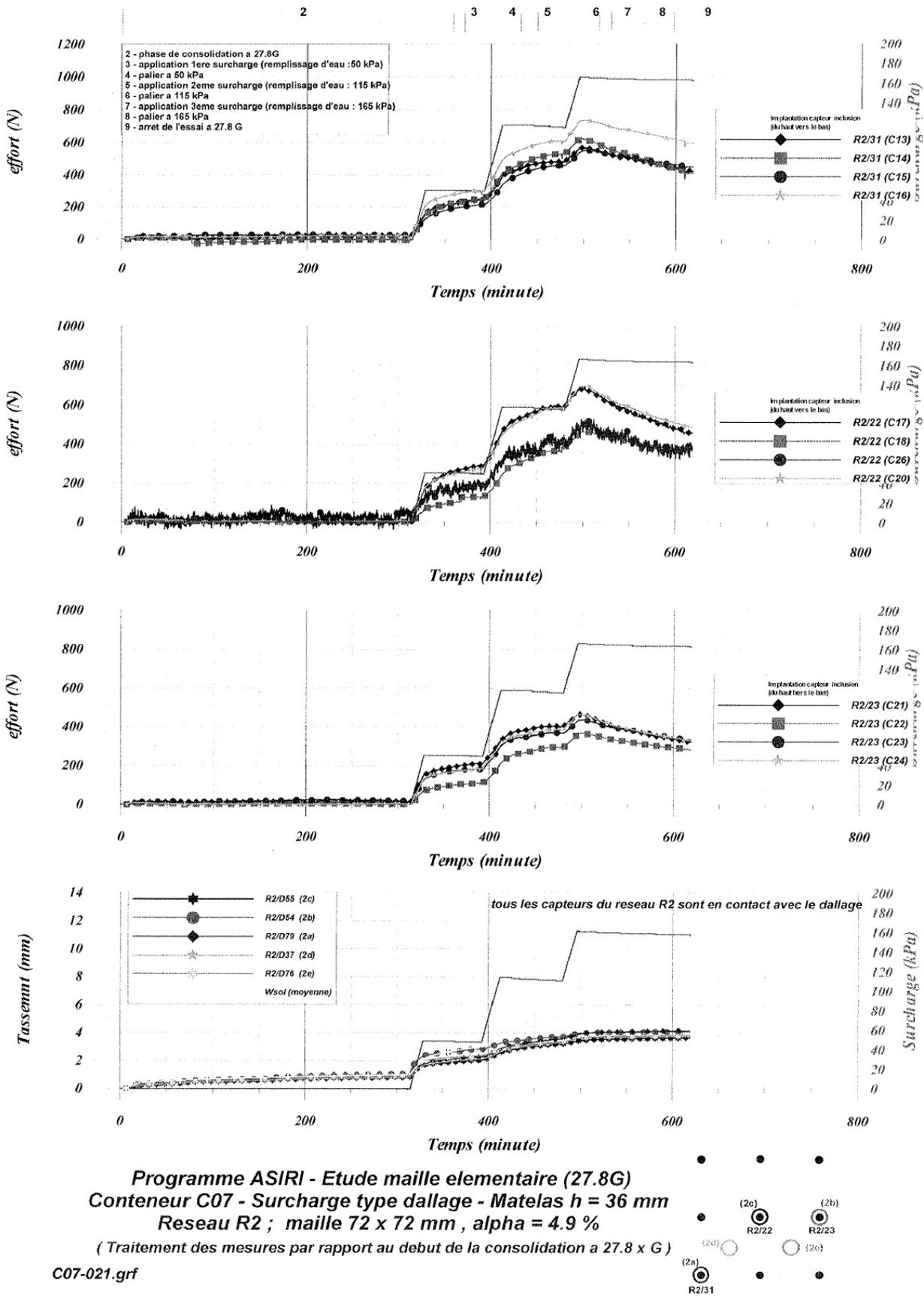
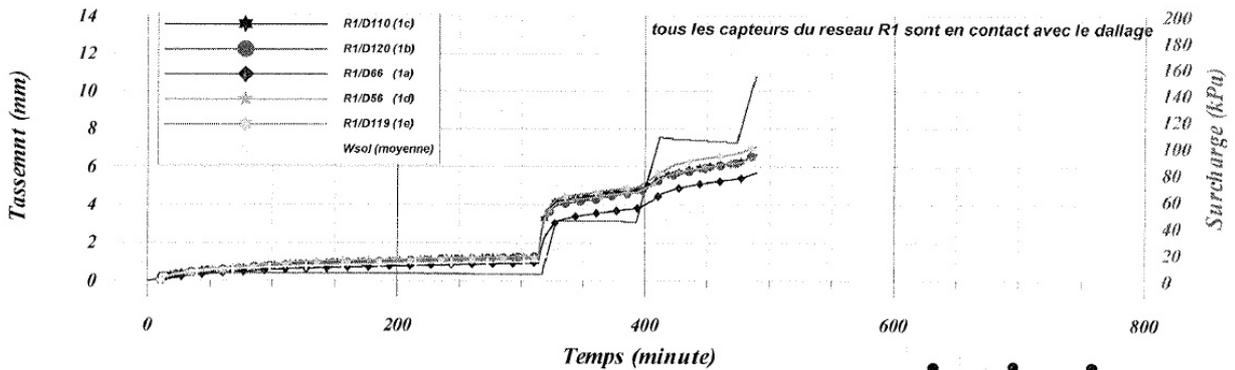
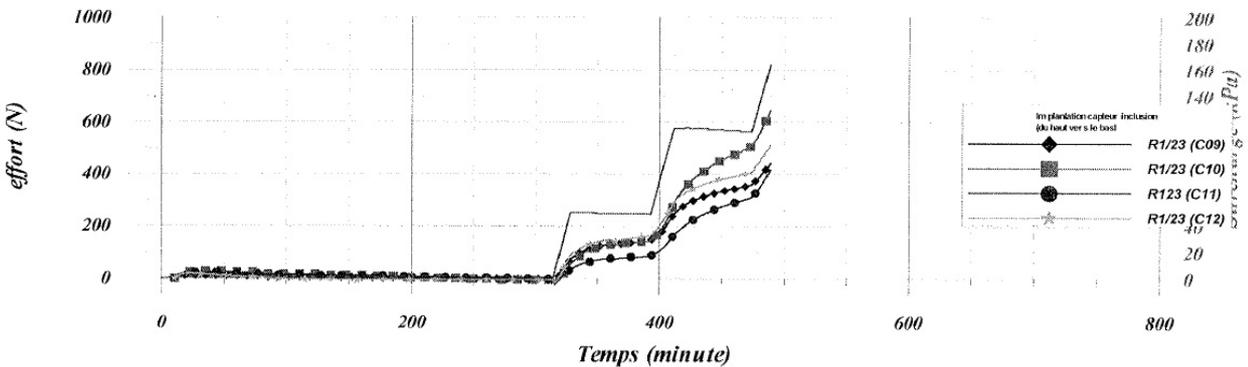
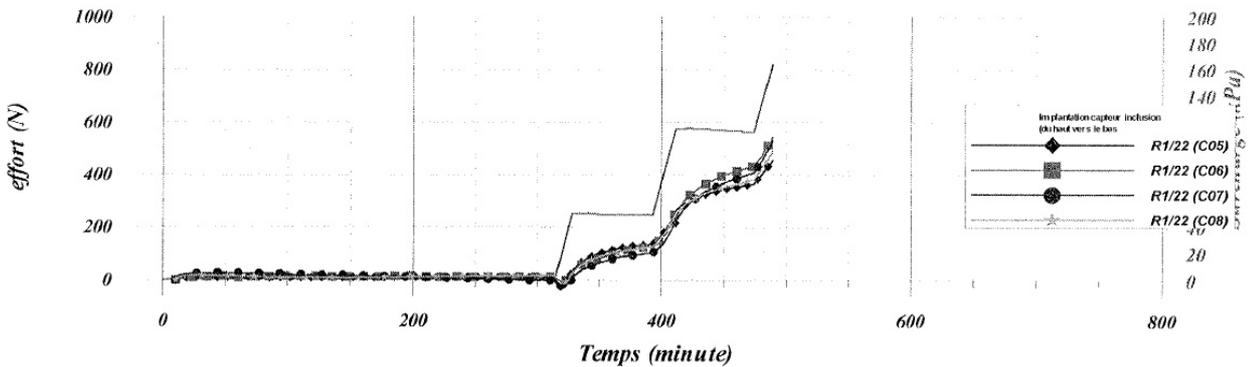
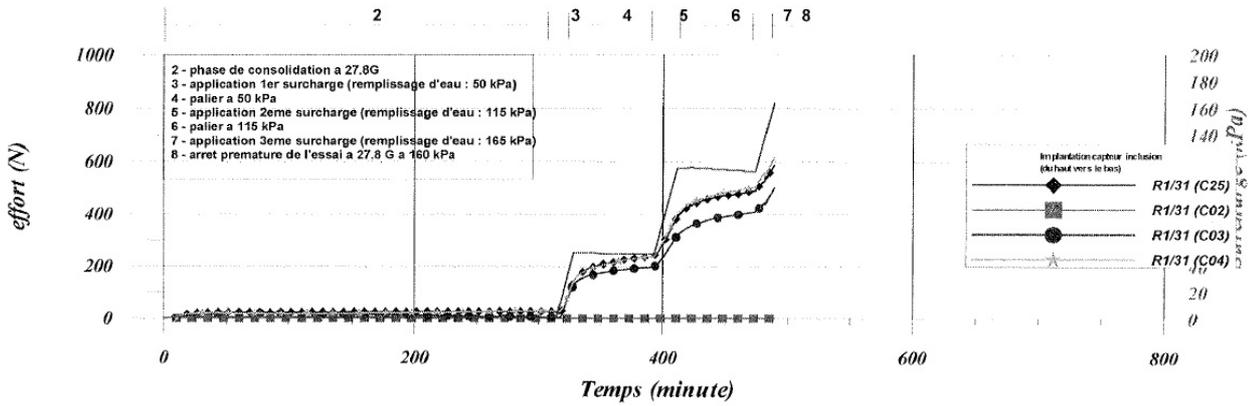


Figure 17 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C07 $H_M=1m$, $\alpha=4,9\%$

Conteneur C08 $H_M=1,5m$, $\alpha=3,1\%$



Programme ASIRI - Etude maille elementaire (27.8G)
 Conteneur C08 - Surcharge type rigide - Matelas $h = 54 \text{ mm}$
 Reseau R1 : maille $90 \times 90 \text{ mm}$, $\alpha = 3.1 \%$
 (Traitement des mesures par rapport au debut de la consolidation a $27.8 \times G$)

C08-011.grf

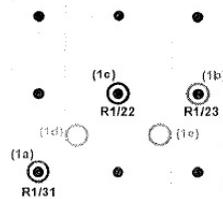


Figure 18 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C08 $H_M=1,5m$, $\alpha=3,1\%$

Conteneur C08 $H_M=1,5m$, $\alpha=4,9\%$

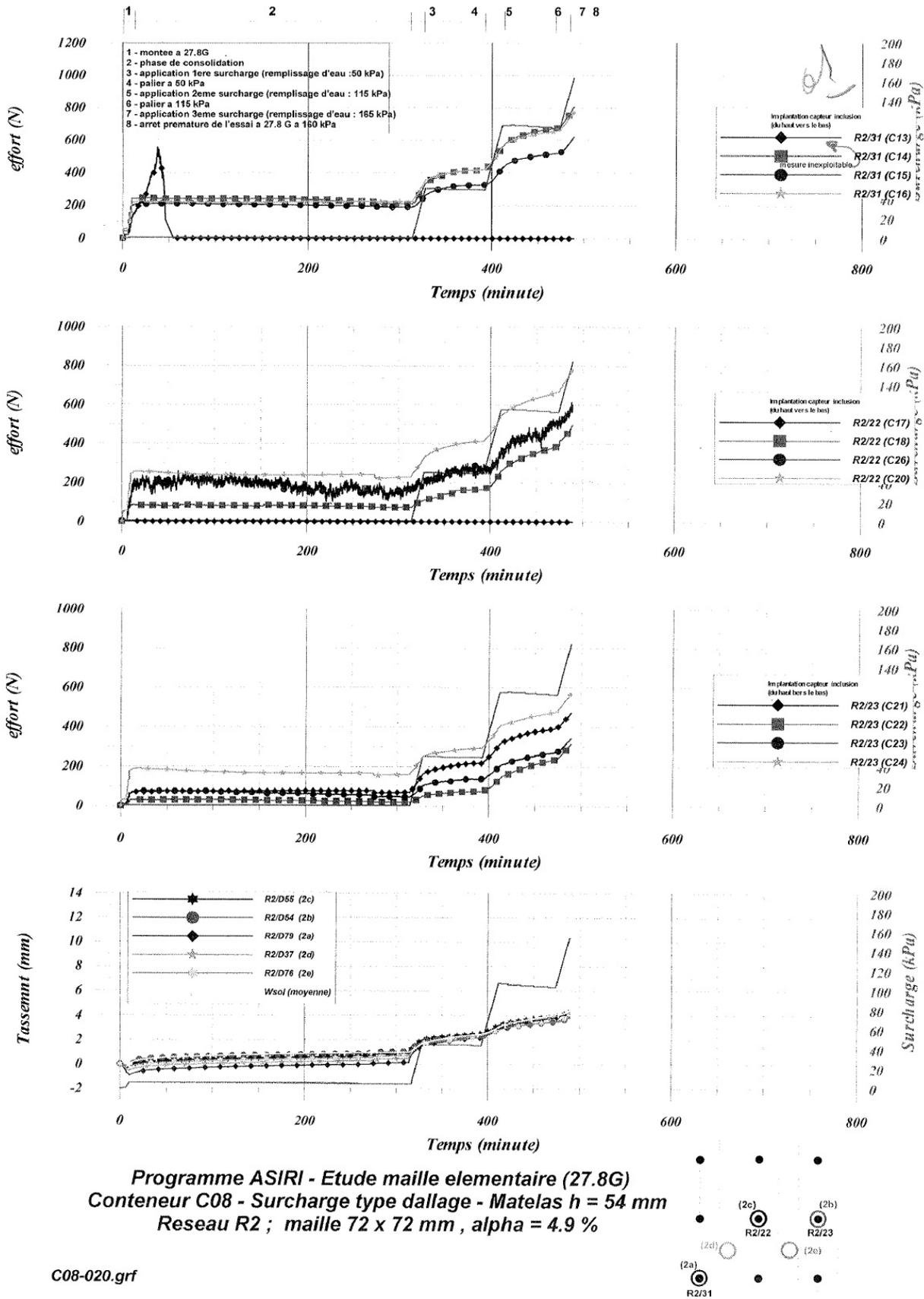


Figure 19 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C08 $H_M=1,5m$, $\alpha=4,9\%$

Conteneur C09 $H_M=0,3m$, $\alpha=3,1\%$

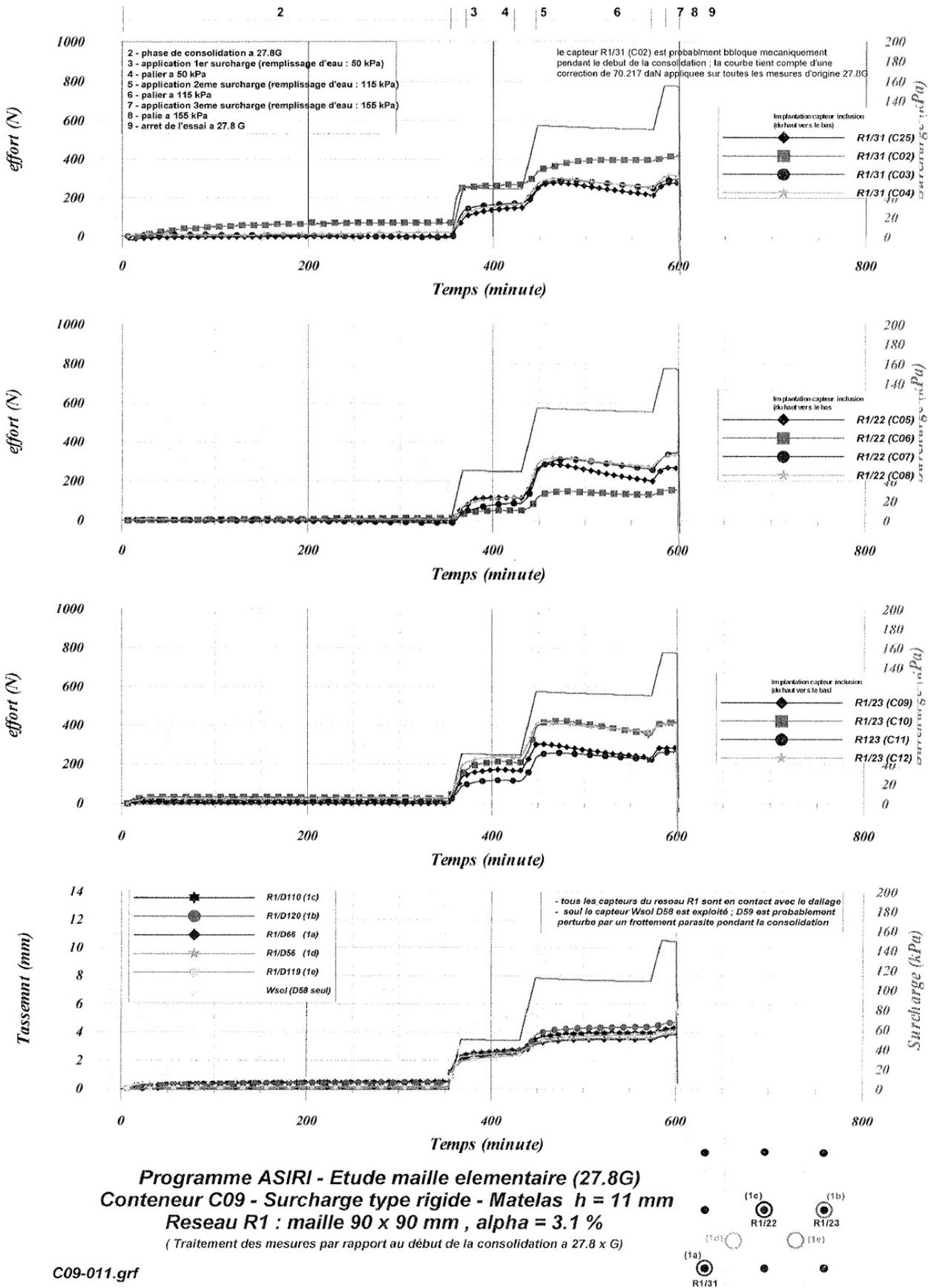
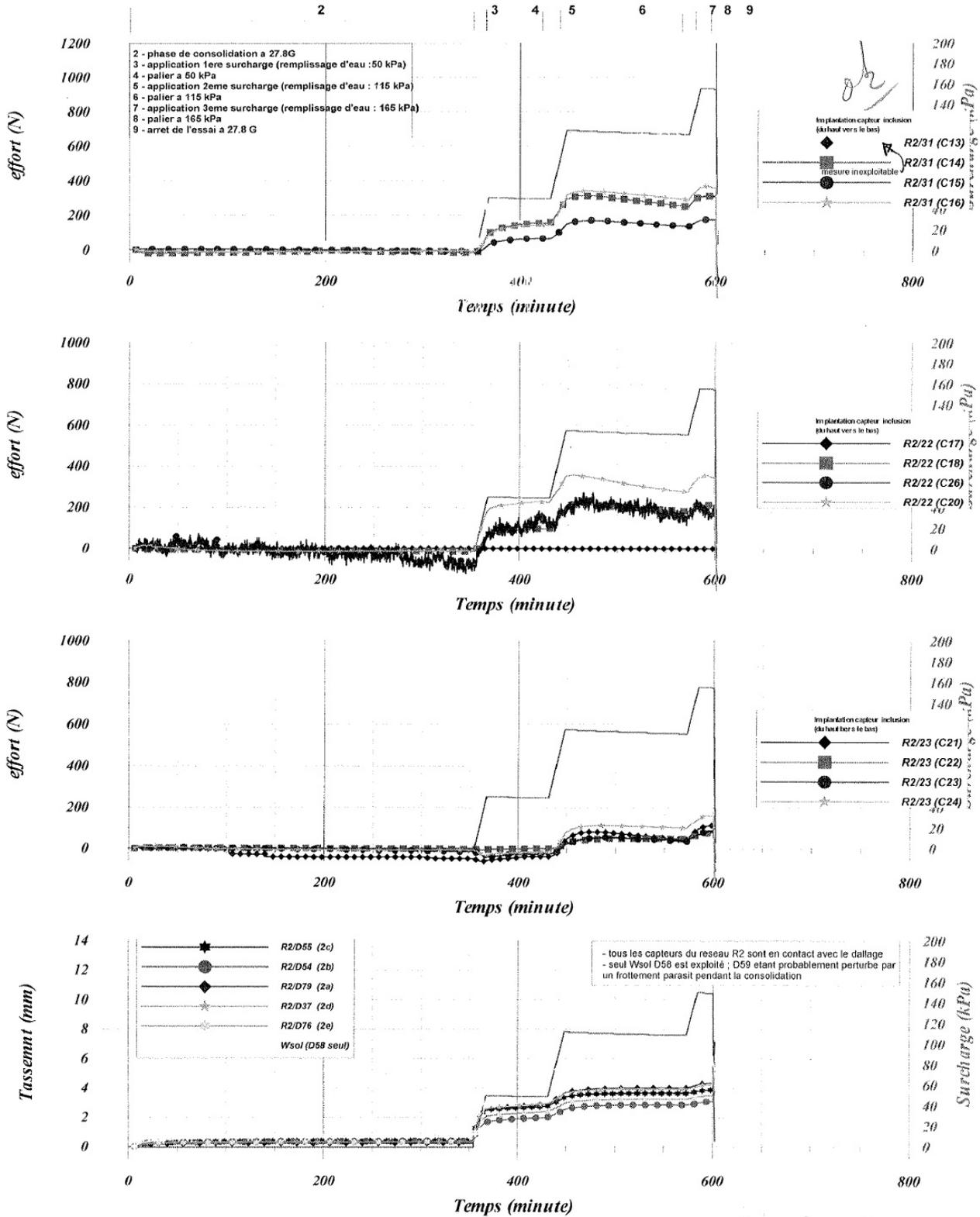


Figure 20 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C09 $H_M=0,3m$, $\alpha=3,1\%$

Conteneur C09 $H_M=0,3m$, $\alpha=4,9\%$



Programme ASIRI - Etude maille elementaire (27.8G)
Conteneur C09 - Surcharge type dallage - Matelas h = 11 mm
Reseau R2 ; maille 72 x 72 mm , alpha = 4.9 %
 (Traitement des mesures par rapport au debut de la consolidation a 27.8 x G)
 C09-021.grf

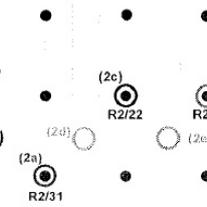


Figure 21 – Variations des efforts et des tassements Conteneur C09 $H_M=0,3m$, $\alpha=4,9\%$

5.2 - Efficacité

L'efficacité, E, pour l'amélioration des sols par inclusions rigides s'écrit $E = \frac{Q_p^+}{Q^*}$ avec Q_p^+ l'effort repris par l'inclusion et Q^* effort appliqué sur le sol compressible non renforcé sur la zone d'influence de l'inclusion.

Tableau X – Valeurs de l'efficacité pour les différents cas de recouvrement et de surcharge rigide, en fin de palier

	H _M = 0,3 m	H _M = 0,6 m	H _M = 1 m	H _M = 1,5 m
	C09	C06	C07	C08
q ₀ , α = 3,14 %	0,19	0,37	0,29	0,30
q ₀ , α = 4,91 %	-	0,51	0,67	-
q ₁ , α = 3,14 %	0,18	0,40	0,34	0,36
q ₁ , α = 4,91 %	-	0,51	0,62	-
q ₂ , α = 3,14 %	0,18	0,18	0,19	-
q ₂ , α = 4,91 %	-	0,23	0,37	-

On présente également la variation de l'efficacité en fonction du temps pendant les durées de mise en charge et les paliers q₀, q₁ et q₂.

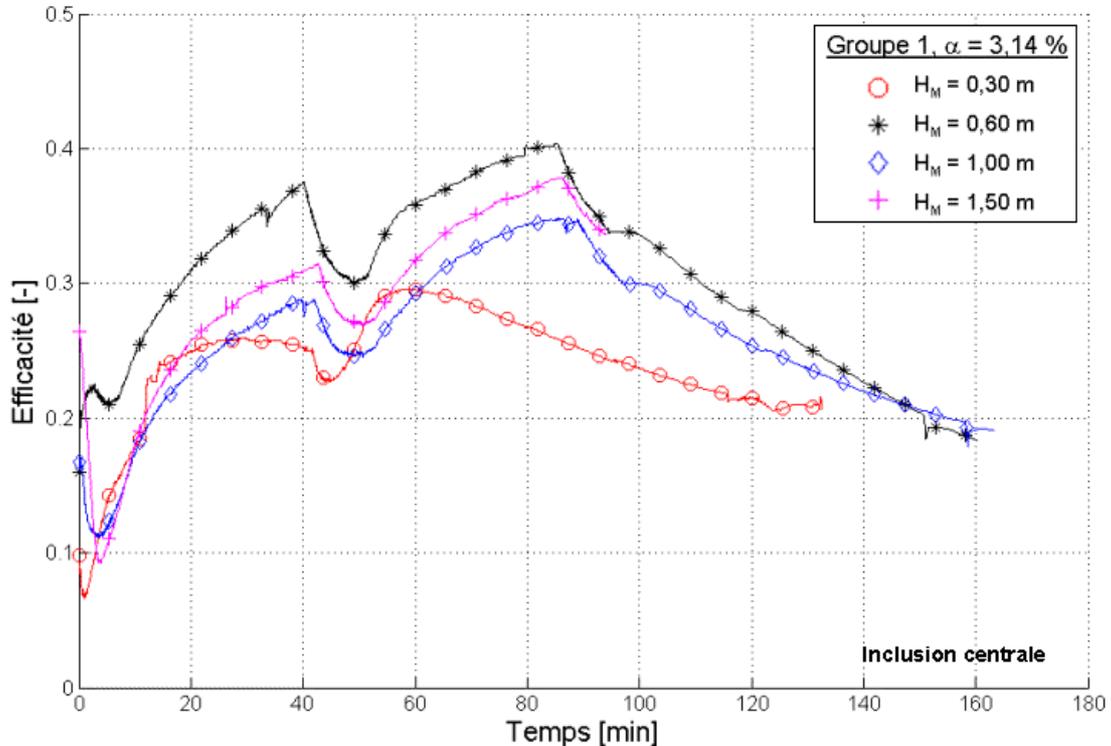


Figure 22 – Variation de l'efficacité de l'inclusion centrale en fonction du temps pour α = 3,14 %.

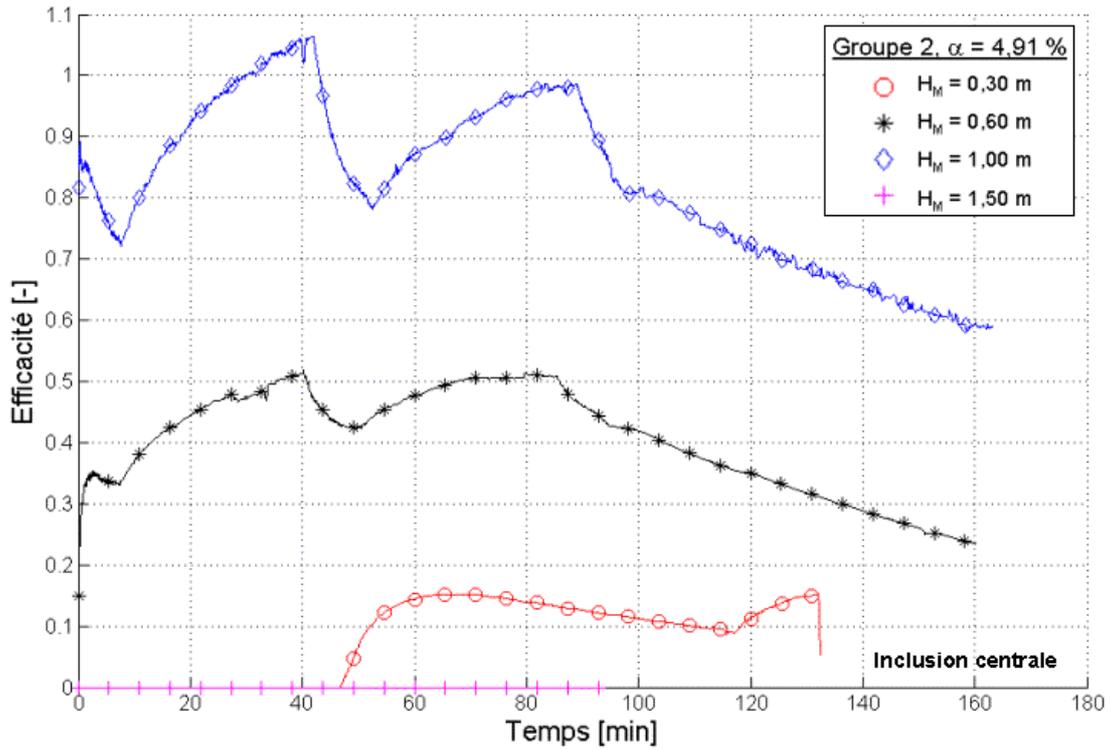


Figure 23 – Variation de l'efficacité de l'inclusion centrale en fonction du temps pour $\alpha = 4,91 \%$.

En observant l'évolution de l'efficacité en fonction du rapport du temps, on voit que l'efficacité varie de façon significative pendant les paliers de charge constante. L'efficacité diminue pendant les phases de chargement puis augmente pendant les paliers de charge constante lorsque la charge ne dépasse pas q_1 (de l'ordre de 115 kPa). Au-delà de cette valeur, l'application de charge supplémentaire provoque une diminution de l'efficacité. On observe le même phénomène pour les inclusions situées en périphérie de la zone renforcée. Pour les inclusions de bord et les inclusions d'angle, l'efficacité est évaluée de la même façon que pour l'inclusion centrale.

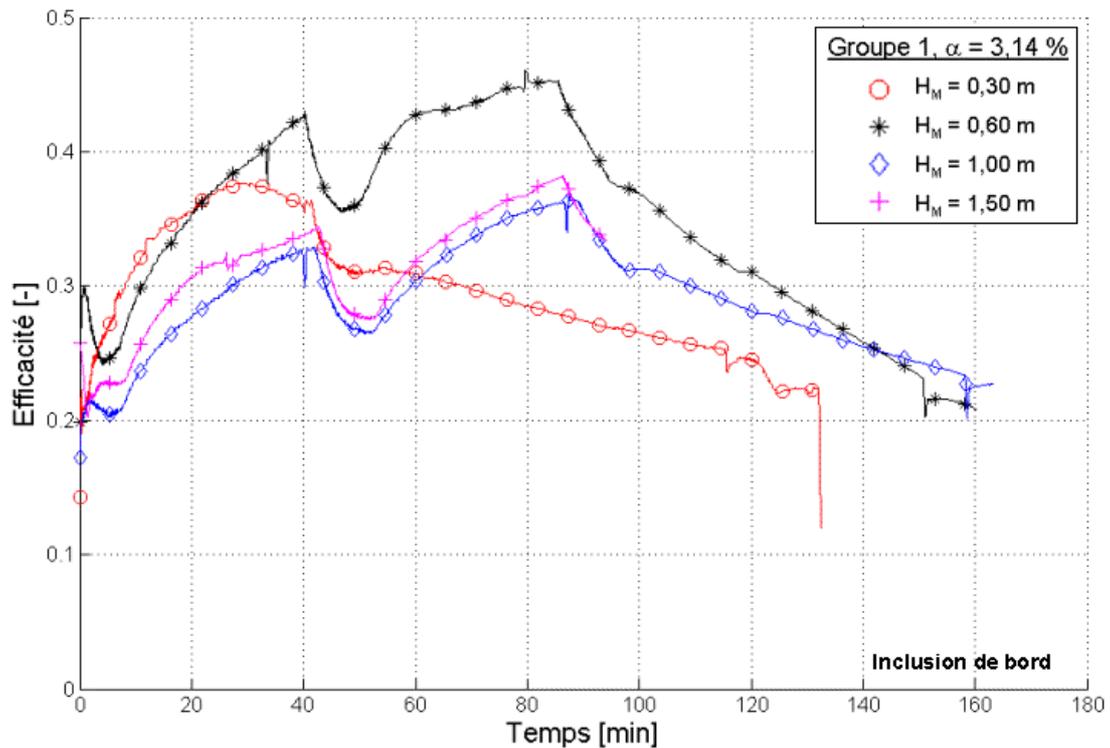


Figure 24 – Variation de l'efficacité de l'inclusion de bord en fonction du temps pour $\alpha = 3,14 \%$.

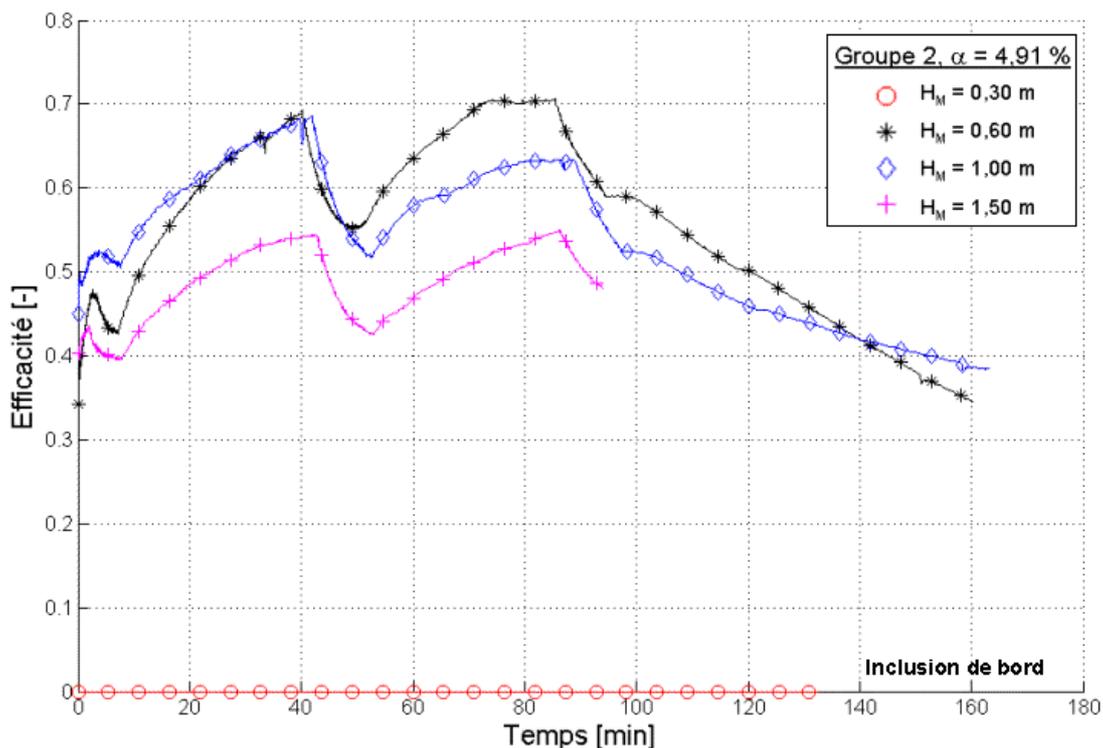


Figure 25 – Variation de l'efficacité de l'inclusion de bord en fonction du temps pour $\alpha = 4,91 \%$.

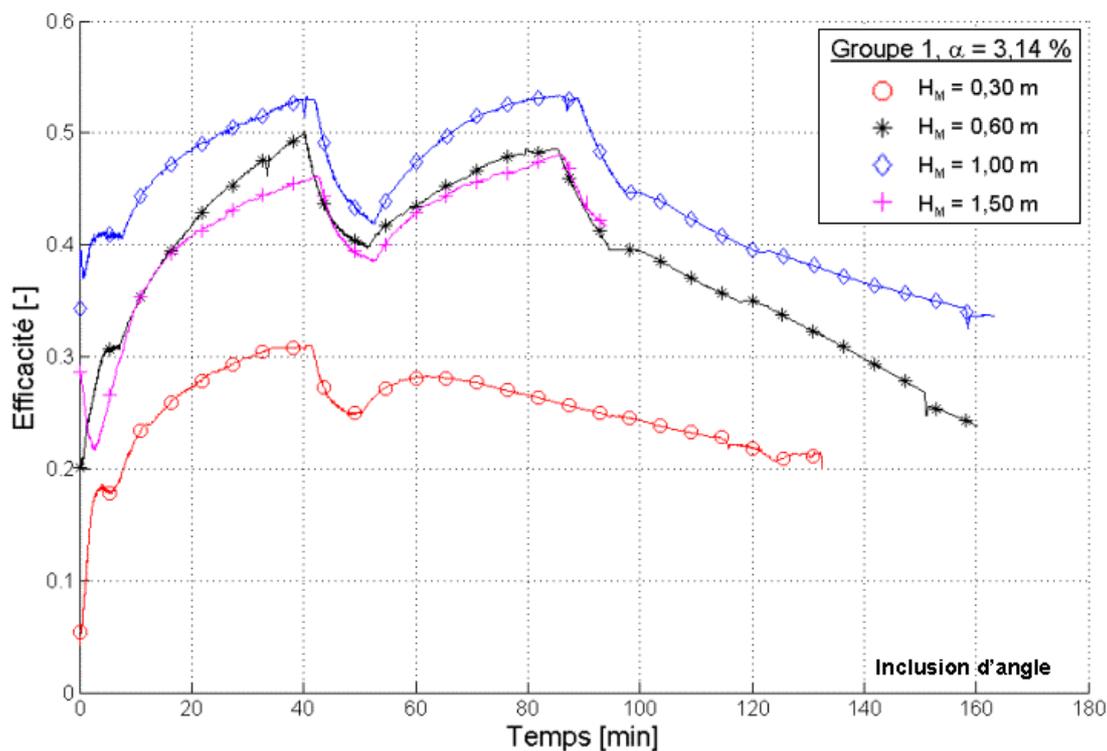


Figure 26 – Variation de l'efficacité de l'inclusion d'angle en fonction du temps pour $\alpha = 3,14 \%$.

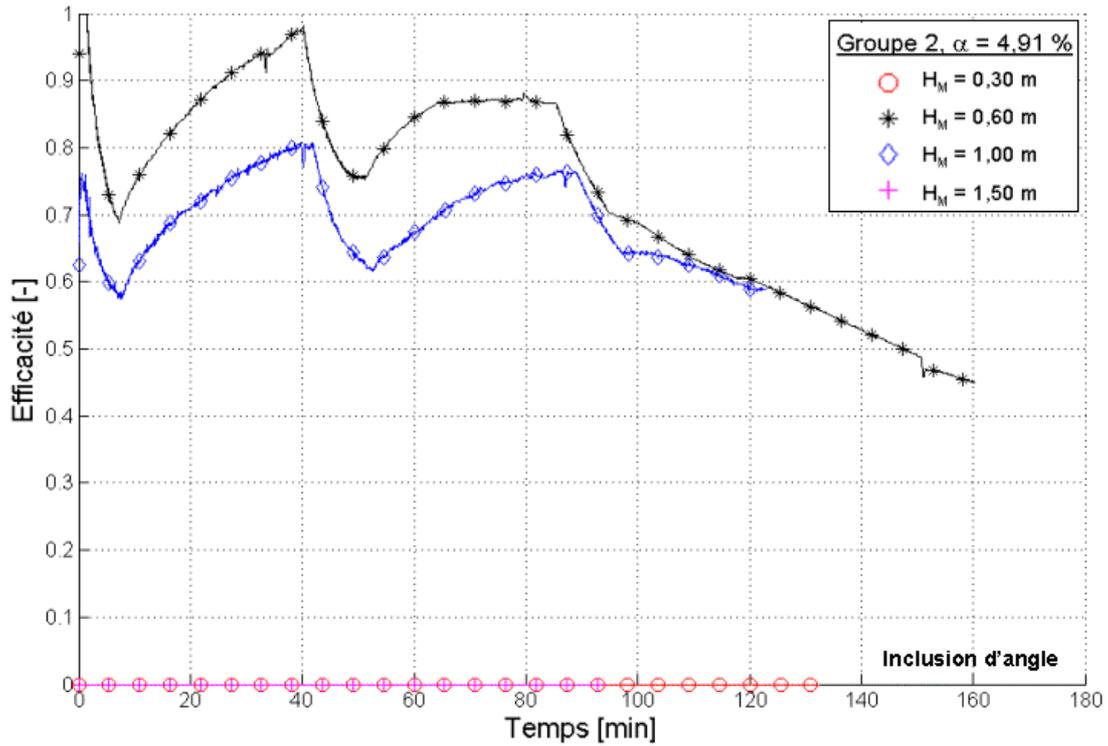


Figure 27 – Variation de l'efficacité de l'inclusion d'angle en fonction du temps pour $\alpha = 4,91 \%$.

La figure 28 montre les résultats obtenus pour l'efficacité en début et en fin de palier. Pour une hauteur très faible, 0,3 m, l'efficacité ne dépasse pas 27%. Ensuite, l'efficacité augmente avec l'augmentation de hauteur du matelas. L'efficacité atteint un palier pour un matelas de 60 cm de hauteur pour $\alpha=3,14 \%$. Il semble que ce palier n'est atteint que pour un matelas de 1 m de hauteur pour le cas de $\alpha = 4,91 \%$.

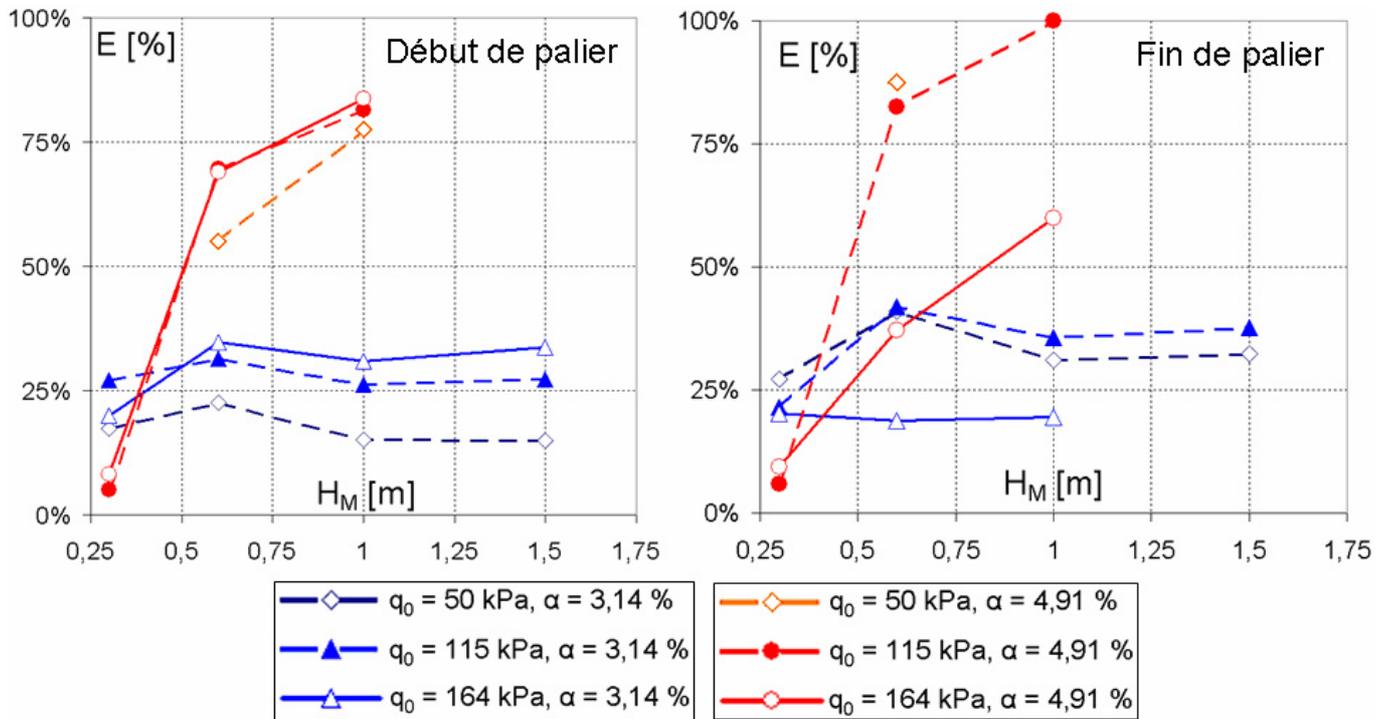


Figure 28 – Efficacité dans le cas d'un chargement de type dallage

6-Conclusions

Quatre conteneurs ont été réalisés afin de simuler en centrifugeuse la configuration d'un dallage sous charge répartie construit sur un sol renforcé par inclusions rigides.

Quatre hauteurs de matelas ont été testées (0,3 m ; 0,5m ; 1,0m et 1,5m) sur deux groupes d'inclusions espacées de $s=2m$ et $s= 2,5m$ ($\alpha=3.14\%$ et 4.91%).

La hauteur de matelas granulaire H_M a pour effet, lorsqu'elle augmente :

- d'augmenter l'efficacité du report de charge ; celle-ci passe par exemple de 19% ($H_M=0.3m$, $\alpha = 3,14 \%$) à 30% ($H_M=1.5m$, $\alpha = 3,14 \%$) sous 50kPa de surcharge appliquée, et de 18% ($H_M=0.6m$, $\alpha = 3,14 \%$) à 36% ($H_M=1.5m$, $\alpha = 3.14 \%$) pour une surcharge de 112kPa.

Le taux de recouvrement a pour effet, lorsqu'il passe de 3.14% à 4.91% :

- d'augmenter l'efficacité ; de 37% à 51% ($H_M=0.6m$, $q_0 = 50$ kPa) ou de 34% à 62% ($H_M=1.5m$, $q_1 = 112$ kPa)

Le frottement latéral sur les pieux a pu être estimé grâce aux 4 niveaux de mesure de la force dans trois inclusions de chaque groupe élémentaire. Lors de l'application de la surcharge, du frottement négatif ne semble pas apparaître systématiquement, sans doute en raison d'une combinaison des mécanismes de transfert de charge dans le matelas et de tassement du sol compressible.

Références bibliographiques

- Gaudin C., Thorel L., Rault G., Garnier J., Chenaf N., 2008 Un aperçu de l'utilisation du T-Bar miniature en centrifugeuse Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nantes 18-19 juin JNGG08. ISBN 9782720825204. pp 515-522.
- Rault G., Baudouin G., Thorel L. (2007) ASIRI Comportement d'un groupe élémentaire (3×3 inclusions) :conception des montages. Rapport ASIRI 2-07-3-05, LCPC n°RMS/MSC : 2007-3-17-1/1-a, 27p.
- Rault G., Baudouin G., Thorel L. (2008). ASIRI Comportement d'un groupe élémentaire (3×3 inclusions) : réalisation des montages. Rapport ASIRI 2-07-3-06, LCPC n°RMS/MSC : 2008-3-1-1/1-a, 35p.
- Thorel L., Rault G., Baudouin G. (2008). ASIRI Comportement d'un groupe élémentaire (3×3 inclusions) :simulation en centrifugeuse d'un chargement de type remblai. Rapport ASIRI 2.07.3.08, LCPC n° RMS/MSC 2008-3-20-1/1-a.