SSNL202 – Validation non-linéaire d'une fondation superficielle, comportement FONDATION

Résumé :
Les tests présentés ci-dessous valident la relation de comportement FONDATION, avec le matériau FONDA_SUPERFI, en comparant les résultats obtenus avec cette loi de comportement sous *code_aster* et soit des résultats expérimentaux soit les résultats du logiciel Fondsis traitant lui aussi du comportement de fondation superficielle sous sollicitation dynamique.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Précisée dans chaque modélisation.

1.2 Propriétés des matériaux

Précisées dans chaque modélisation.

1.3 Conditions aux limites et chargement

Précisées dans chaque modélisation.

1.4 Conditions initiales

Précisées dans chaque modélisation.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

2.1 Résultats de référence

Précisés dans chaque modélisation.

2.2 Références bibliographiques

Précisées dans le chapitre 7 .

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisations A et B

3.1 Présentation des essais et des cas-test

Il s'agit de 5 tests de balayage (« swipe-tests ») réalisés et décrits dans la référence 3, et rapportés dans la référence 8. Ces tests (GG03, GG07, GG04, GG06 et GG29) sont réalisés sur une fondation circulaire de diamètre 10 cm reposant sur un sol sableux.
Afin de reproduire les résultats à l'aide du comportement développé, une fondation carrée de côté 8.7 cm est considérée. Celle-ci est définie en supposant une équivalence au niveau de l'inertie entre le cas d'une fondation circulaire et carrée.
Durant le test noté GG03, un déplacement vertical induisant un effort vertical de 1600 N est appliqué à la fondation. Puis un déplacement horizontal est appliqué à la fondation en gardant le déplacement vertical constant.
Le test noté GG07 est mené de la même manière que le GG03. La seule différence est qu'une fois l'effort vertical de 1600 N est atteint, le déplacement vertical est réduit jusqu'à ce que cet effort atteigne une valeur de 200 N. Le but étant de générer un écrouissage du sol.
Le comportement de la fondation est donné en termes de courbes d'effort horizontal en fonction du déplacement horizontal, et du chemin de chargement dans le plan des efforts.

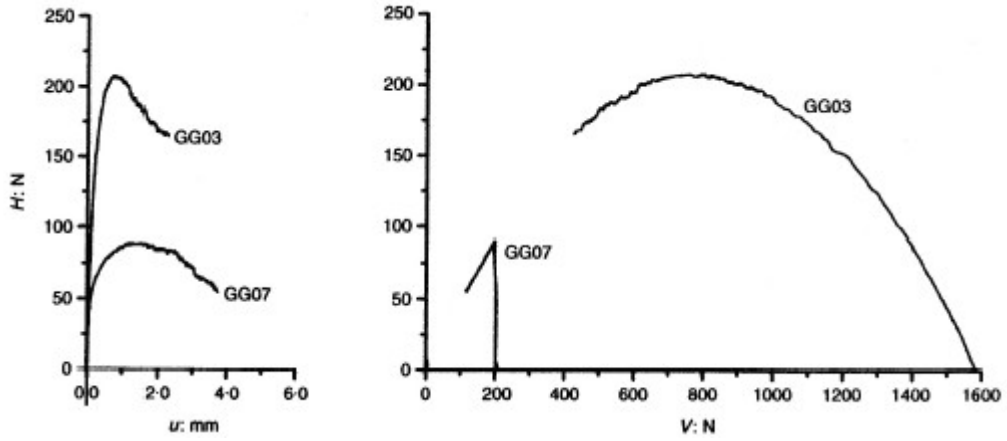


Figure 1 : Résultats des tests GG03 et GG07.

Le test noté GG04 est réalisé selon la même procédure que le test GG03, mais en appliquant une rotation à la fondation après avoir atteint un effort vertical de 1600 N.
Le comportement de la fondation est donné en termes de courbes de moment en fonction de la rotation, et du chemin de chargement dans le plan des efforts.

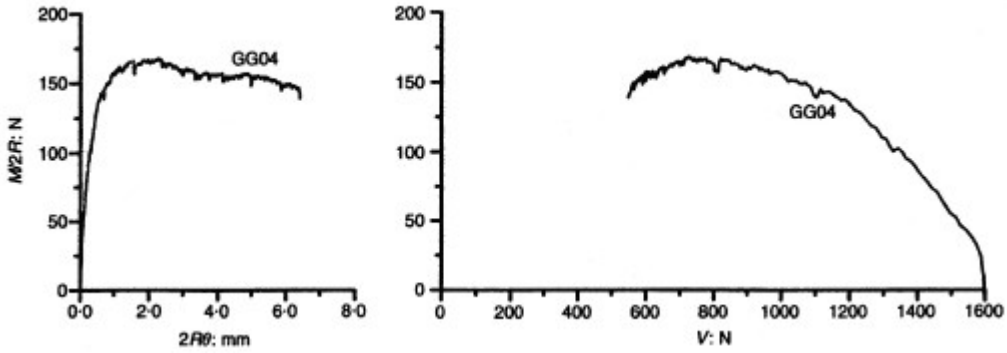


Figure 2 : Résultats des tests GG04.

D'après les chemins de chargement dans le plan des efforts, il peut être observé que seul le mécanisme relatif à la capacité portante est activé durant ces essais. Ce mécanisme est activé à partir d'un effort vertical égal à 1600 N ; le paramètre V_{lim} est alors égal à cette valeur.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les raideurs de la fondation ont été calibrées dans la référence 8. La raideur en translation horizontale est égale à 0.4 MN/m, la raideur en translation verticale est égale à 15 MN/m, et la raideur en rotation est égale à 0.0035 MN/m. Ces valeurs ont été définies pour reproduire les résultats des tests GG03 et GG04.
Une valeur de V_{ult} est calibrée à 2100 N pour reproduire au mieux les résultats de l'ensemble des essais. Le tassement de référence est quant à lui pris égal à 0,1mm, du même ordre de grandeur que le tassement nécessaire pour atteindre V_{lim}.

Les paramètres relatifs au comportement élastique de la fondation, ainsi qu'au critère relatif à la capacité portante sont listés dans le tableau suivant :

Classe	Paramètre	Valeur retenue
Paramètres géométriques	Largeur de la fondation B	8.7 cm
	Longeur de la fondation L	8.7 cm
Raideurs élastiques	Raideur en translation suivant B K_{hb}	0.4 MN/m
	Raideur en translation suivant L K_{hl}	0.4 MN/m
	Raideur verticale K_v	15 MN/m
	Raideur en rotation autour de L K_{mb}	3.5 kN.m/rad
	Raideur en rotation autour de B K_{ml}	3.5 kN.m/rad
Paramètres du critère relatif à la capacité portante	Charge verticale limite d'élasticité	1600 N
	Charge de rupture	1700 – 1750 N
	Tassement de référence	0.1 mm

D'autre part, le paramètre $v_{pl,r}$ est égal au dixième de la petite dimension de la fondation, soit 1 cm.
Ainsi on considère 3 cas-tests séparés pour cause de temps de calcul en 2 fichier test (ssnl202a et ssnl202b) :
- Le chargement GG03 (ssnl202a) ;
- Le chargement GG04 (ssnl202a) ;
- Le chargement GG07 (ssnl202b) ;

3.2 Caractéristiques de la modélisation

Un élément DIS_TR_N à 1 nœud de taille nulle.
Un nœud N1 : chargement complet en force ou déplacement détaillé cas test par cas test. Ce chargement est effectué avec une option de subdivision.
Opérateur utilisé : STAT_NON_LINE, l e calcul ne met pas en jeu d'effet de masse justifiant un traitement dynamique et sera traité de manière quasi-statique.

3.3 Caractéristiques du maillage

1 POI1 .
1 nœud.

3.4 Géométrie et modélisation

Un élément discret de taille nulle à 1 nœud.
Repère local = repère global.
Une matrice de rigidité K_TR_D_N affectée par défaut (associée à un élément DIS_TR) :
- $K_{xx}=400\,kN/m$ pour la translation selon x ;
- $K_{yy}=400\,kN/m$ pour la translation selon y qui n'est pas utile ici (chargement uniquement en translation • selon x ou en rotation autour de x) ;

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- $K_{zz}=15\ 10^3 kN/m$ pour la translation verticale selon z ;
- $K_{rx,rx}=3.5 kN.m/rad$ pour la rotation autour de x ;
- $K_{ry,ry}=3.5 kN.m/rad$ pour la rotation autour de y (pas utile dans les calculs) ;
- $K_{rz,rz}=100 kN.m/rad$ pour la rotation autour de z(pas utile dans les calculs) ;

3.5 Propriétés de matériaux

Lié à un comportement incrémental FONDA_SUPERFI comprenant les paramètres communs à tous les tests :

- LONG_X : longueur de la fondation selon x pris égal à $L_x=0.087\ m$;
- LONG_Y : longueur de la fondation selon y pris égal à $L_y=0.087\ m$;

Ce comportement incrémental est aussi lié à 3 mécanismes de non-linéarité avec des paramètres associés :

- Un mécanisme de perte de capacité portante (ou noté CP) avec les paramètres suivants :
  - CP_SERVICE : Capacité portante de fluage de la fondation égal à $V_{lim}=1.6\ kN$ cf. §3.1 ;
  - CP_ULTIME : Capacité portante ultime de la fondation prise égale à $V_{ult}=2.1\ kN$ cf. § 3.1 ;
  - DEPL_REFE : Tassement de référence servant à définir l'évolution de l'écrouissage isotrope pris égal à $v_{pl,r}^{CP}=0.0001\ m$ cf. § 3.1 ;
  - RAID_CP_X,GAMMA_CP_X,RAID_CP_Y,GAMMA_CP_Y,RAID_CP_RX,GAMMA_CP_RX,RAID_CP_RY, GAMMA_CP_RY : Ces paramètres qualifiant l'écrouissage cinématique en capacité portante ne sont pas renseignés, ils sont par défaut égaux à 0 ;

- Un mécanisme de glissement (ou noté G) avec les paramètres suivants :
  - PHI : Angle de frottement à l'interface entre le sol et l'élément de fondation égal à $\phi_{inter}=45°$ afin de ne pas faire intervenir le mécanisme de glissement ;
  - COHESION : La cohésion à l'interface entre le sol et l'élément de fondation égale à $c_{inter}=200 kPa$ afin de ne pas faire intervenir le mécanisme de glissement ;
  - RAID_GLISS, GAMMA_REFE : Ces coefficients décrivant l'écrouissage cinématique en glissement ne sont pas renseignés et par défaut égal à 0 ;

- Le mécanisme de décollement n'est pas activé ici, le paramètre DECOLLEMENT n'est donc pas renseigné et par défaut égal à 'NON' ;

3.6 Conditions aux limites et chargements

L'élément étant un discret à un nœud, il comprend implicitement ces conditions limites, via la matrice de rigidité introduite.
Le chargement imposé est un chargement en déplacement imposé au nœud N1 avec cas-test par cas-test la carte de temps suivante :

- GG03 :

t (-)	0.	50.	75.	100.
$U_z(mm)$	0.	-0.106	-0.106	0.2
$U_x(mm)$	0.	0.	1.0	2.5

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- GG04 :

t (-)	0.	50.	75.	100.
$U_z(mm)$	0.	-0.106	-0.106	1.0
$\theta_x(rad)$	0.	0.	0.01	0.07

- GG07 :

t (-)	0.	25.	50.	60.	100.
$U_z(mm)$	0.	-0.106	-0.0133	-0.0133	1.7
$U_x(mm)$	0.	0.	0.	0.25	4.0

Il est à noter que la seule donnée d'entrée dans ces essais est le chargement en translation horizontale et le déchargement en translation verticale a été proposé afin d'obtenir des comportement à peu près similaire aux essais.

3.7 Conditions initiales

Déplacements, efforts et variables internes nuls.

3.8 Grandeurs testées et résultats

Les résultats sont comparés au résultats de l'essai de la référence 8 qui ont été numérisés:

Identification	Instant	Chargement	Référence	Différence
N	75	GG03	0,204 kN	10 %, SOURCE_EXTERNE
VZ	95	GG03	-0,423 kN	5 %, SOURCE_EXTERNE
MT	75	GG04	0,016 kNm	20 %, SOURCE_EXTERNE
VZ	97	GG04	-0,580 kN	5 %, SOURCE_EXTERNE
VZ	60	GG07	-0,199 kN	1 %, SOURCE_EXTERNE
N	95	GG07	0,0595 kN	40 %, SOURCE_EXTERNE

3.9 Comparaison résultats code_aster/résultats expérimentaux

On compare pour les 3 chargements les résultats expérimentaux aux résultats avec *code_aster* :

- GG03 :Pour ce test qui servi globalement à caler les paramètres du modèle, on a une bonne correspondance ;

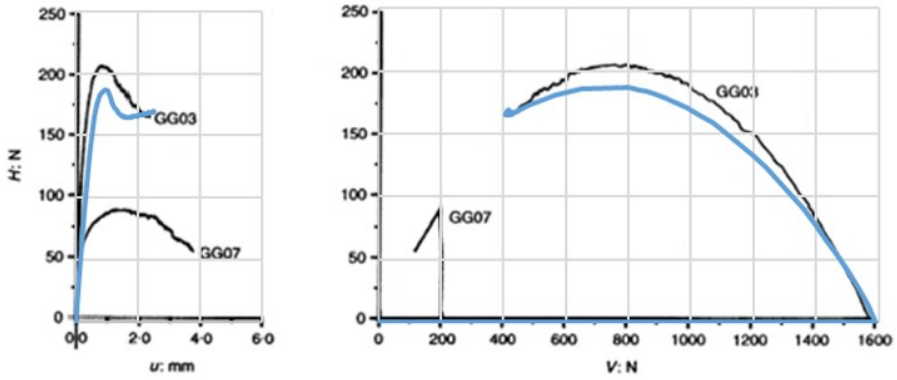


Figure 3 : Résultats des tests GG03 comparés à *code_aster*.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- GG04 : Pour ce chargement on arrive à avoir une assez bonne correspondance en termes d'efforts et de parcours sur le plan des efforts (à droite) mais, on a une limitation quant au l'évolution de ces efforts par rapport au déplacement (à gauche)

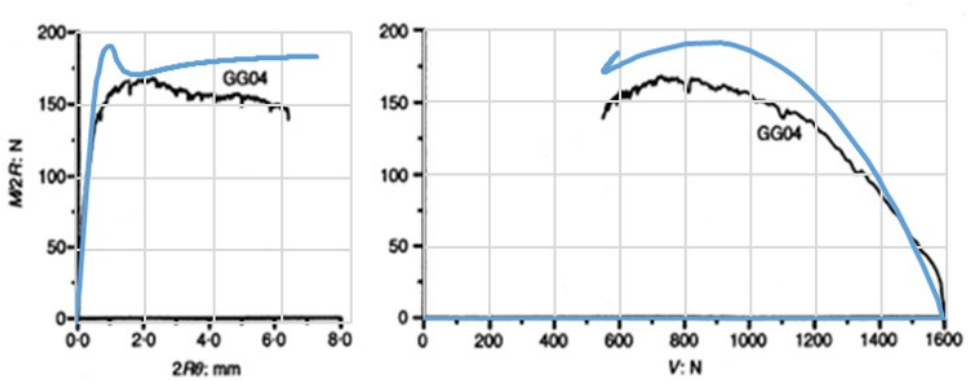


Figure 4 : Résultats des tests GG04 comparés à *code_aster*.

- GG07 : Pour ce chargement aussi, on arrive à avoir une assez bonne correspondance en termes d'efforts et de parcours sur le plan des efforts (à droite) mais, on a une limitation quant au l'évolution de ces efforts par rapport au déplacement (à gauche)

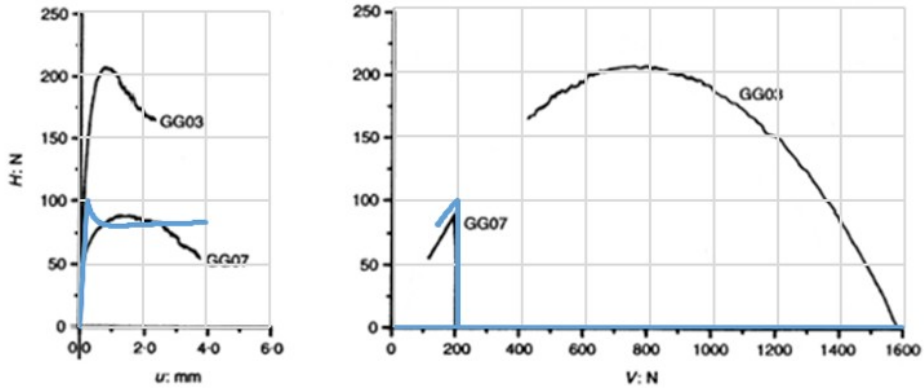


Figure 5 : Résultats des tests GG07 comparés à *code_aster*.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Modélisation C

4.1 Présentation des essais et des cas-test

Il s'agit d'une série de tests cycliques réalisés dans le cadre d'un projet européen (référence 4) sur une fondation superficielle carrée de 1 m x 1 m encastré d'un mètre dans deux sols frottants de densités différentes (dénommés HD pour « High Density » et LD pour « Low Density »).

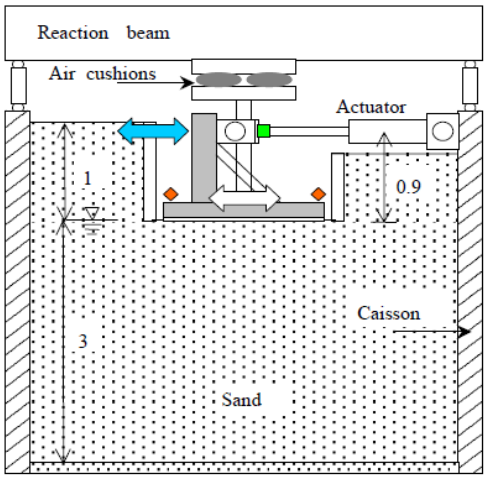


Figure 6 : Dispositif d'essai TRISEE

La fondation est chargée verticalement de 100 kN (LD) et de 300 kN (HD) puis une série de sollicitations est appliquée en trois phases à l'aide d'un vérin situé à 90 cm au-dessus de la fondation :

- **Phase I :** une sollicitation cyclique sinusoïdales de fréquence 0.5 Hz et d'amplitude croissante jusqu'à 5% de l'effort vertical est appliquée à la fondation. Le but étant d'observer les effets de dégradation cyclique.
  Le comportement de la fondation pendant cette phase est donné en termes des courbes de moment en fonction de la rotation, et de l'évolution au cours du temps de son tassement.

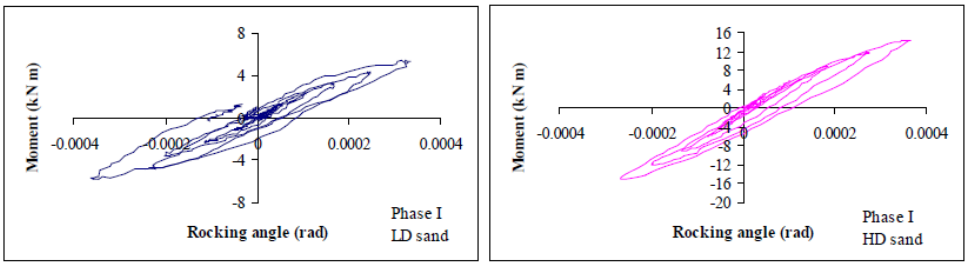


Figure 7 : Phase I Réponse de la fondation

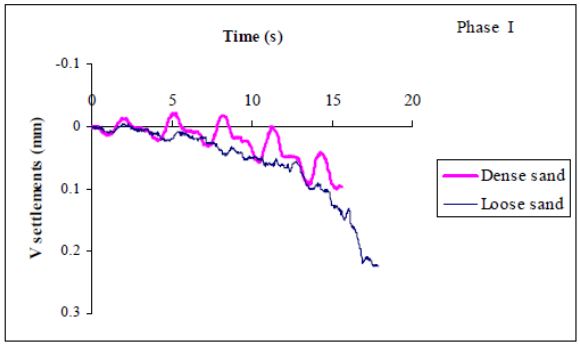


Figure 8 : Phase I Évolution du tassement

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- **Phase II :** une sollicitation horizontale cyclique d'amplitude égale à 20 % de l'effort vertical est appliquée à la fondation. L'échelle de temps de cette sollicitation a été adaptée de manière à obtenir une fréquence dominante de 0.13 Hz pour le sol dense (HD) et 0.27 Hz pour le sol lâche (LD).

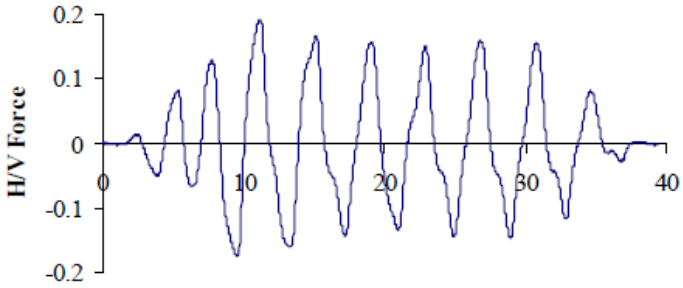


Figure 9 : Effort appliqué en Phase II

Le comportement de la fondation est donné en termes :

- de courbes d'effort horizontal en fonction du déplacement horizontal de la fondation,

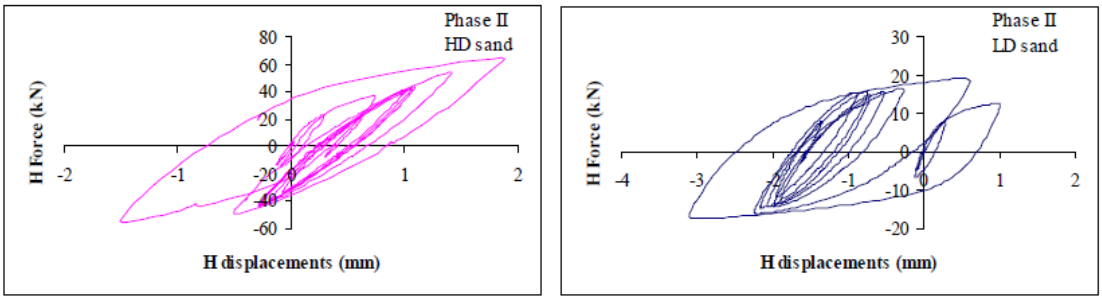


Figure 10 : Phase II Effort horizontal en fonction du déplacement horizontal.

- de courbes de moment en fonction de la rotation de la fondation,

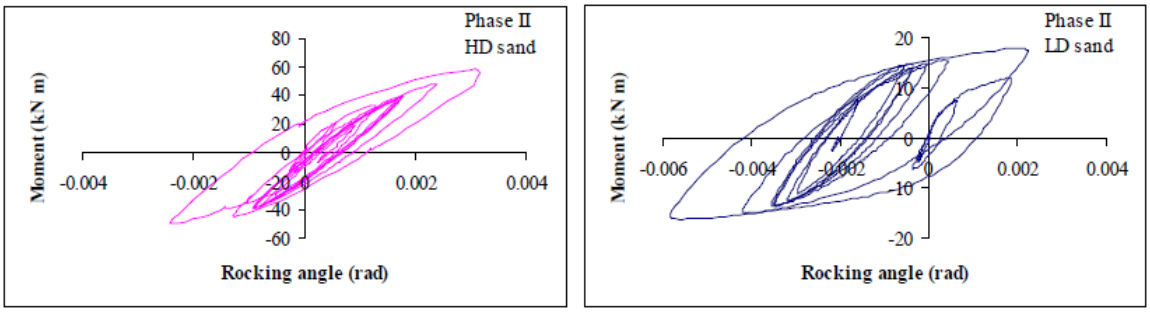


Figure 11 : Phase II Moment en fonction de la rotation

- de l'évolution au cours du temps du tassement de la fondation,

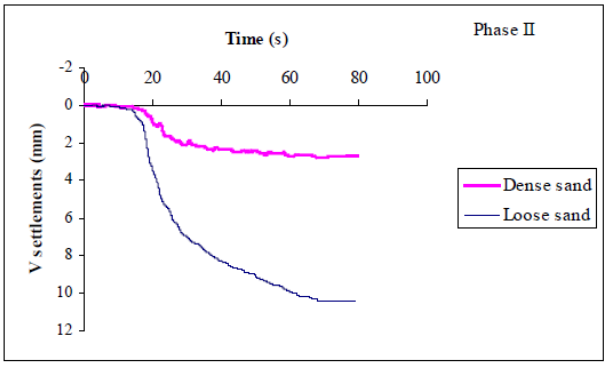


Figure 12 : Phase II Évolution du tassement

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

◦ et de l'évolution au cours du temps du déplacement horizontal de la fondation.

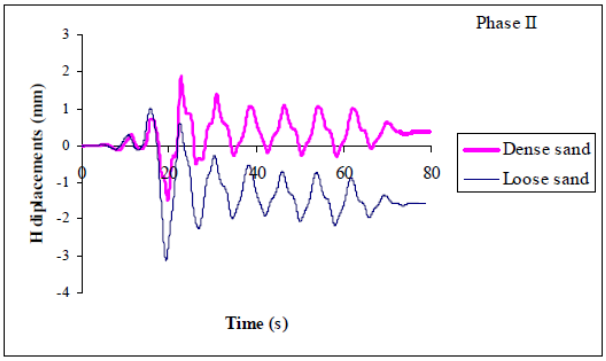


Figure 13 : Phase II Évolution du déplacement horizontal

- **Phase III :** un déplacement sinusoïdale d'amplitude croissante est appliqué à la fondation jusqu'à l'atteinte de sa résistance ultime. La fréquence de cette sollicitation est égale à 1/6 Hz pour le sol dense (HD) et 1/3 Hz pour le sol lâche (LD).
  Le comportement de la fondation est donné en termes :
  ◦ de l'effort horizontal en fonction du déplacement horizontal,

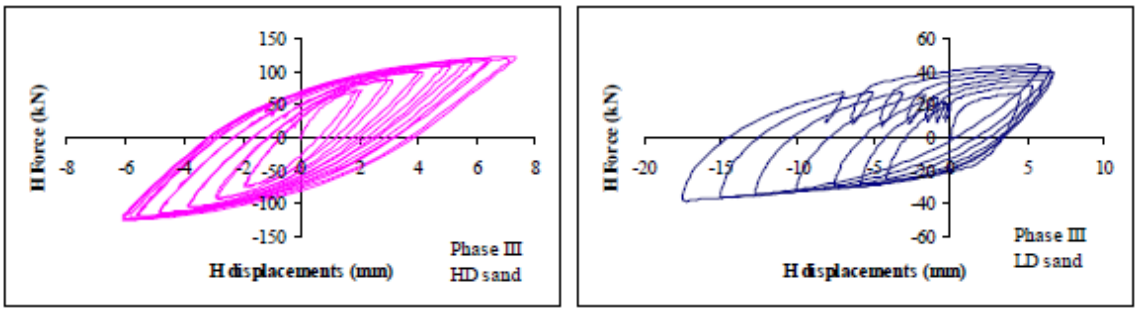


Figure 14 : Phase III Effort horizontal en fonction du déplacement horizontal

◦ du moment en fonction de la rotation,

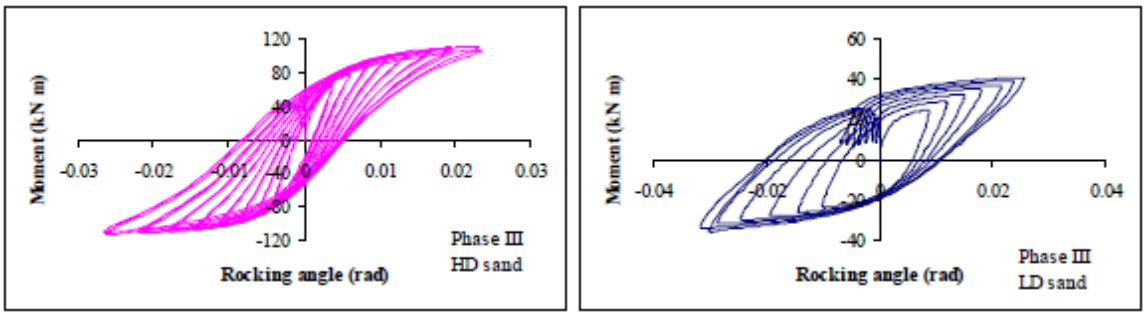


Figure 15 : Phase III Moment en fonction de la rotation

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- de l'évolution du déplacement horizontal au cours du temps,

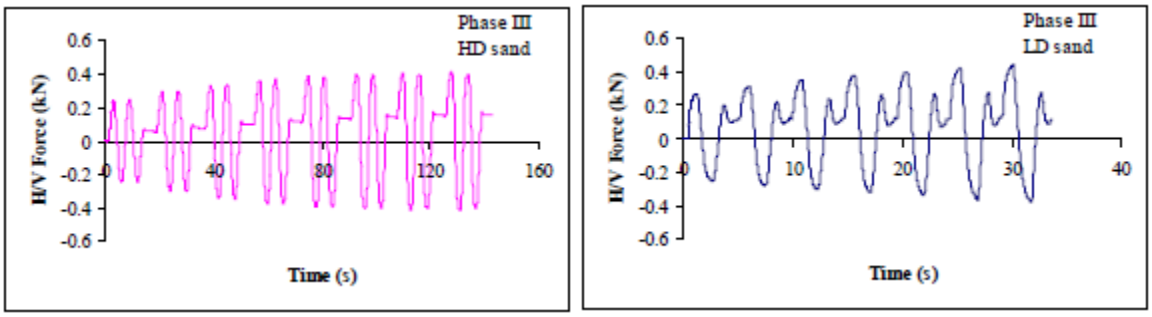


Figure 16 : Phase III Évolution de l'effort horizontal à la fondation

- et de l'évolution du tassement au cours du temps.

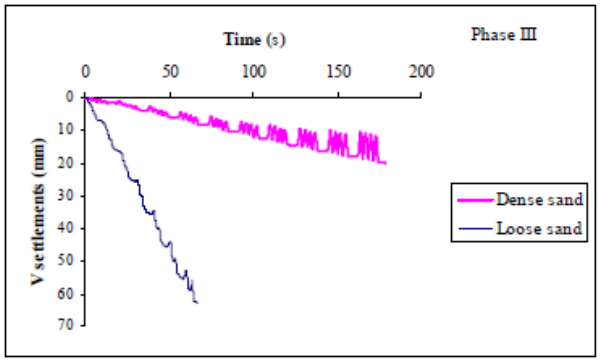


Figure 17 : Phase III Évolution du tassement

Les raideurs de la fondation ont été calibrées dans la référence 5. Ces valeurs ont été définies à partir des pentes initiales des courbes donnant l'effort horizontal en fonction du déplacement horizontal et le moment en fonction de la rotation.
En phase I, le comportement de la fondation reste linéaire (tassement de l'ordre de quelques dixièmes du millimètre et rotation de l'ordre de quelques dixièmes du milliradian). Cette phase sera en conséquent omise des validations.
En phases II et III, le mécanisme de portance est activé avec le mécanisme de décollement. Le mécanisme de glissement n'est pas activé : en effet, aucun glissement n'a été rapporté dans la référence 4, et ceci est justifié par la nature sableuse du sol qui permet d'avoir une importante résistance au frottement à l'interface sol fondation.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

En phase II, les paramètres relatifs au comportement élastique de la fondation, ainsi qu'au critère de portance sont listés dans le tableau suivant.

Classe	Paramètre	Valeur retenue
Paramètres géométriques	Largeur de la fondation B	1 m
	Longeur de la fondation L	1 m
Raideurs élastiques	Raideur en translation suivant B K_{hb}	70 MN/m
	Raideur en translation suivant L K_{hl}	70 MN/m
	Raideur verticale K_v	120 MN/m
	Raideur en rotation autour de L K_{mb}	40 MN.m/rad
	Raideur en rotation autour de B K_{ml}	40 MN.m/rad
Paramètres du critère relatif à la capacité portante	Charge verticale limite d'élasticité	500 kN
	Charge de rupture	2000 kN
	Tassement de référence	4.2 mm
	Coefficient d'écrouissage horizontal $I_{h,b}$	50 MN/m
	Coefficient d'écrouissage horizontal $I_{h,l}$	0
	Coefficient d'écrouissage rotationnel $I_{m,b}$	0
	Coefficient d'écrouissage rotationnel $I_{m,l}$	0

En phase III, en raison de la consolidation du sol au cours des phases précédentes, on suppose que l'écrouissage isotrope est saturé et la valeur de V_{ult} est prise égale à la valeur de V_{lim}. La prise en compte des effets cycliques se fait à l'aide des lois d'écrouissages cinématiques seulement.

Durant cette phase, les paramètres relatifs au comportement élastique de la fondation, ainsi qu'au critère de portance sont listés dans le tableau suivant :

Classe	Paramètre	Valeur retenue
Paramètres géométriques	Largeur de la fondation B	1 m
	Longeur de la fondation L	1 m
Raideurs élastiques	Raideur en translation suivant B K_{hb}	57 MN/m
	Raideur en translation suivant L K_{hl}	57 MN/m
	Raideur verticale K_v	80 MN/m
	Raideur en rotation autour de L K_{mb}	15 MN.m/rad
	Raideur en rotation autour de B K_{ml}	15 MN.m/rad
Paramètres du critère relatif à la capacité portante	Charge verticale limite d'élasticité	1200 kN
	Charge de rupture	1200 kN
	Tassement à la rupture	-
	Coefficient d'écrouissage horizontal $I_{h,b}$	27 MN/m
	Coefficient d'écrouissage horizontal $I_{h,l}$	0
	Coefficient d'écrouissage rotationnel $I_{m,b}$	0
	Coefficient d'écrouissage rotationnel $I_{m,l}$	0

Ainsi on considère 2 cas-tests, séparés pour cause de temps de calcul en 2 fichier test (ssnl202a et ssnl202b) :
- La phase II – HD (ssnl202c) ;
- La phase III - HD (ssnl202c) ;

Il est à noter que le comportement du sable lâche (LD) n'a pas pu être reproduit au contraite du sable compact (HD)

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.2 Caractéristiques de la modélisation

Un élément DIS_TR_N à 1 nœud de taille nulle.
Un nœud N1 : chargement complet en force ou déplacement détaillé cas test par cas test. Ce chargement est effectué avec une option de subdivision.
Opérateur utilisé : STAT_NON_LINE, l e calcul ne met pas en jeu d'effet de masse justifiant un traitement dynamique et sera traité de manière quasi-statique.

4.3 Caractéristiques du maillage

1 POI1.
1 NŒUD.

4.4 Géométrie et modélisation

Un élément discret de taille nulle à 1 nœud.
Repère local = repère global.
Une matrice de rigidité K_TR_D_N affectée par défaut (associée à un élément DIS_TR) différente pour chaque phase donnée dans le tableau ci-dessous :

Raideur en :	**Phase II - HD**	**Phase III - HD**
Translation selon x : K_{xx}	70 MN/m	57 MN/m
Translation selon y : K_{yy}	70 MN/m	57 MN/m
Translation selon z : K_{zz}	120 MN/m	80 MN/m
Rotation autour de x : $K_{rx,rx}$	40 MN.m/rad	15 MN.m/rad
Rotation autour de y : $K_{ry,ry}$	40 MN.m/rad	15 MN.m/rad
Rotation autour de z : $K_{rz,rz}$ Inutile dans les calculs	70 MN.m/rad	20 MN.m/rad

4.5 Propriétés de matériaux

Lié à un comportement incrémental FONDATION comprenant les paramètres communs au deux tests :

- LONG_X : longueur de la fondation selon x pris égal à $L_x = 1{,}0\ m$;
- LONG_Y : longueur de la fondation selon y pris égal à $L_y = 1{,}0\ m$;

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Ce comportement incrémental est aussi lié à 3 mécanismes de non-linéarité avec des paramètres associés :

- Un mécanisme de perte de capacité portante (ou noté CP) avec les paramètres suivants différents pour les deux modèles et données dans le tableau suivant :

Paramètre de FONDA_SUPERFI pour :	Phase II - HD	Phase III - HD
CP_SERVICE : Capacité portante de fluage de la fondation : V_{lim}	500 kN	1200 kN
CP_ULTIME : Capacité portante ultime de la fondation : V_{ult}	2000 kN	1200 kN
DEPL_REFE : Tassement de référence : $v_{pl,r}^{CP}$	4,2 mm	0 car $V_{lim} = V_{ult}$
RAID_CP_X : Raideur d'écrouissage horizontal selon x : $I_{h,x}$	50 MN/m	27 MN/m
GAMMA _CP_X : Paramètre d'écrouissage horizontal selon x : $\gamma_{h,x}$	0, il n'y a pas de diminution de l'écrouissage considéré ici	
RAID_CP_ Y : Raideur d'écrouissage horizontal selon y : $I_{h,y}$	50 MN/m	27 MN/m
GAMMA _CP_ Y : Paramètre d'écrouissage horizontal selon y : $\gamma_{h,y}$	0, il n'y a pas de diminution de l'écrouissage considéré ici	
RAID_CP_RX,GAMMA_CP_RX, RAID_CP_RY,GAMMA_CP_RY Coefficient d'écrouissage en rotation	0, aucun écrouissage en rotation n'est considéré	

- Un mécanisme de glissement (ou noté G) avec les paramètres suivants :
  - PHI : Angle de frottement à l'interface entre le sol et l'élément de fondation égal à $\phi_{inter} = 45°$ afin de ne pas faire intervenir le mécanisme de glissement ;
  - COHESION : La cohésion à l'interface entre le sol et l'élément de fondation égale à $c_{inter} = 200\,kPa$ afin de ne pas faire intervenir le mécanisme de glissement ;
  - RAID_GLISS, GAMMA_REFE : Ces coefficients décrivant l'écrouissage cinématique en glissement ne sont pas renseignés et par défaut égal à 0 ;

- Le mécanisme de décollement est activé ici, le paramètre DECOLLEMENT est donc égal à 'OUI' ;

4.6 Conditions aux limites et chargements

L'élément étant un discret à un nœud, il comprend implicitement ces conditions limites, via la matrice de rigidité introduite.

4.6.1 Phase II

Le chargement au nœud N1 imposé en phase II est un chargement en force avec l'évolution suivante :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

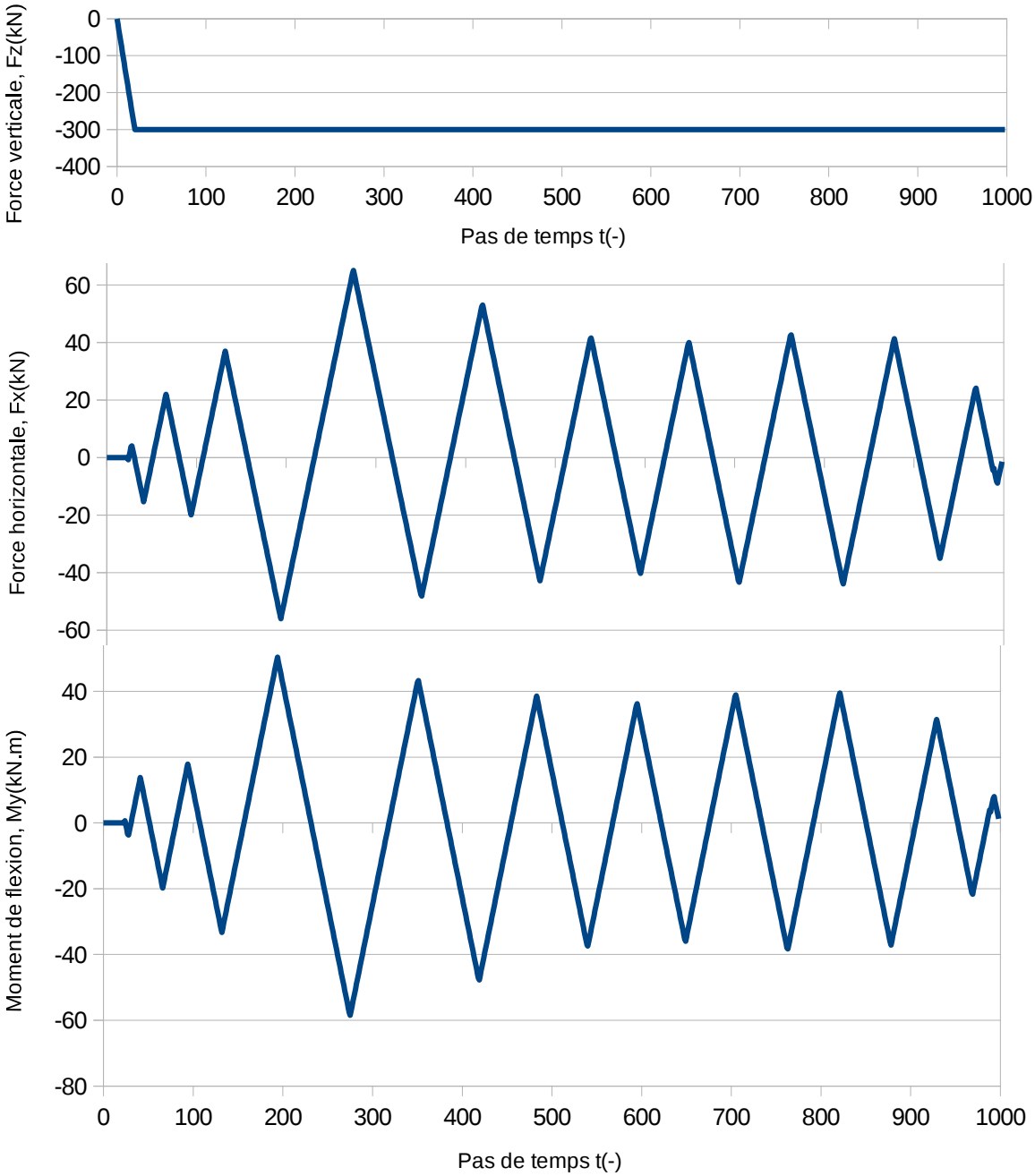


Figure 18 : Chargement en Phase II sous *code_aster*.

A noter que les autres chargements sont imposés nuls.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.6.2 Phase III

Le chargement au nœud N1 imposé en phase III est un chargement en force avec l'évolution suivante :

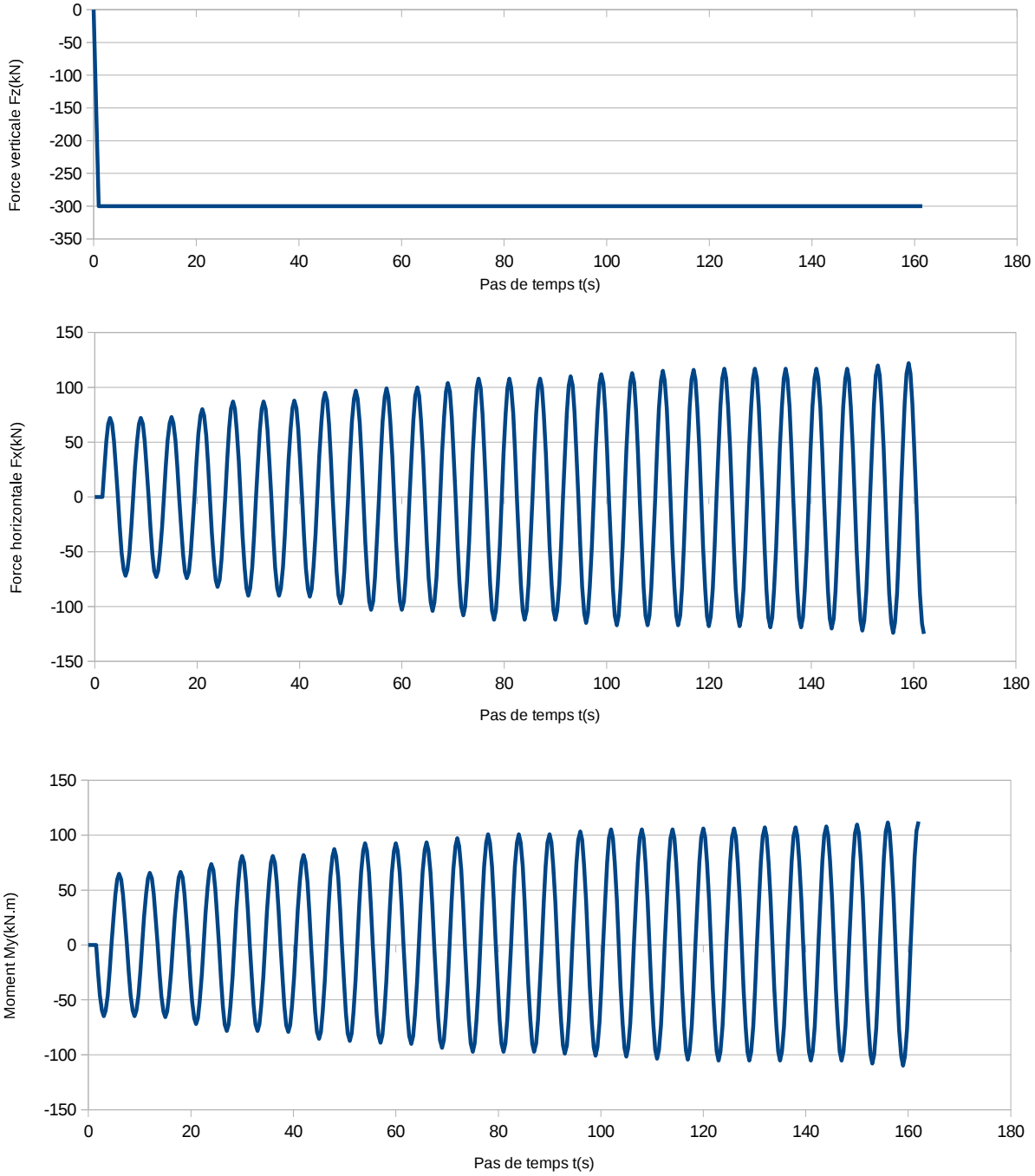


Figure 19 : Chargement en Phase III sous *code_aster*.

A noter que la force selon y et les moments selon x et z sont imposées nuls.

4.7 Conditions initiales

Déplacements, efforts et variables internes nuls.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.8 Grandeurs testées et résultats

Les résultats sont comparés au résultats de l'essai de la référence 3 qui ont été numérisés:

Identification	Instant	Chargement	Référence	Différence
UX	194	Phase II	-0,0014	15 %, SOURCE_EXTERNE
UX	275	Phase II	0,0019	5 %, SOURCE_EXTERNE
URY	194	Phase II	0,0025	25 %, SOURCE_EXTERNE
URY	275	Phase II	-0,003	30 %, SOURCE_EXTERNE
UX	159	Phase III	0,007	10 %, SOURCE_EXTERNE
UX	162	Phase III	-0,006	15 %, SOURCE_EXTERNE
URY	159	Phase III	-0,023	90 %, SOURCE_EXTERNE
URY	162	Phase III	0,026	15 %, SOURCE_EXTERNE

4.9 Comparaison résultats code_aster/résultats expérimentaux

On compare pour les 2 chargements les résultats expérimentaux aux résultats sous *code_aster* :

- Phase II : L'effort horizontal correspond globalement aux mesures, l'allure de la courbe de moment aussi mais de manière moins significative :

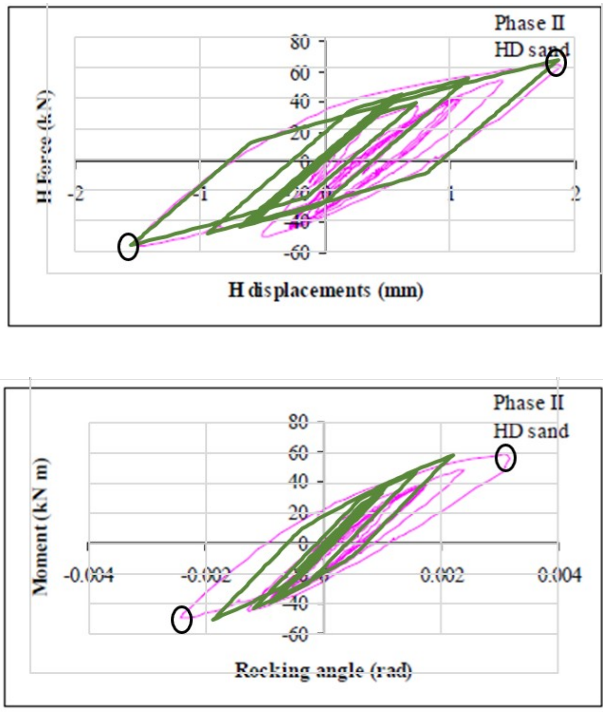


Figure 20 : Résultats des tests de la phase II comparés avec *code_aster*.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Phase III : L'effort horizontal correspond globalement aux mesures, l'allure de la courbe de moment aussi mais de manière moins significative :

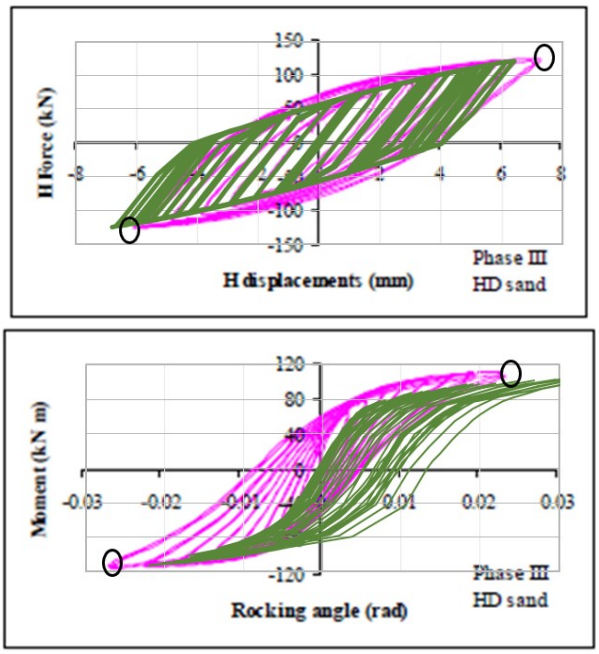


Figure 21 : Résultats des tests de la phase III comparés à *code_aster*.

Il est à noter que les points expérimentaux entourés en noir sont ceux utilisés pour la vérification avec *co de_ a ster* au § 4.8 .

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5 Modélisation D

5.1 Présentation des essais et des cas-test

Les essais de Nova et Montrasio sont réalisés sur une semelle filante sur sable dans le but de valider la formulation d'un macroélément décrite dans le même article.
En total, dix essais sont réalisés. D'abord, un essai simple sous charge verticale centrée (S1) est réalisé. Ensuite, un ensemble de cinq essais avec charge inclinée ou excentrée est réalisé : trois essais sous charge verticale puis horizontale (S2-1, 2 et 3) avec différentes valeurs de l'effort vertical appliqué, et deux essais sous charge excentrée avec deux valeurs différentes de l'excentrement (S2-4 et 5). Puis, deux essais avec une charge inclinée et excentrée sont réalisés (C1-1 et 2) : une charge verticale est appliquée et maintenue constante, puis une charge horizontale et un moment sont appliqués simultanément, avec des rapports différents. Enfin, deux essais où des chemins de chargement plus complexes sont appliqués (C2 et C3).
Des essais sont également réalisés pour identifier des points particuliers des surfaces de rupture dans les plans V-H_b et V-M_b.

La largeur de la fondation n'est pas donnée dans l'article, mais cela ne bloque pas la procédure de validation. En effet, la plupart des résultats est donnée en termes d'efforts et de déplacements généralisés ce qui permet de s'affranchir de la détermination de cette valeur. Néanmoins, cette valeur sera prise égale à 0,6 m afin de coller au mieux au critère de rupture en basculement.
Aussi, les propriétés du sol ne sont pas explicitées dans l'article. Les points identifiés de la surface de rupture permettent de calibrer la résistance du sol, et les différentes réponses permettent de calibrer les valeurs des raideurs élastiques. Ces valeurs sont listées dans le tableau suivant :

Classe	Paramètre	Valeur retenue
Paramètres géométriques	Largeur de la fondation B ou L_x	0,55m
	Longeur de la fondation L ou L_y	-
Raideurs élastiques	Raideur en translation suivant B K_{hb} ou K_{xx}	200 kN/m
	Raideur en translation suivant L K_{hl} ou K_{yy}	-
	Raideur verticale K_v ou K_{zz}	90 kN/m
	Raideur en rotation autour de B K_{ml} ou $K_{rx,rx}$	-
	Raideur en rotation autour de L K_{mb} ou $K_{ry,ry}$	40 kN.m/rad

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

La Figure 22 montre les points identifiés de la surface de rupture dans les plans V-H_b et V-M_b et la surface correspondante à f_b pour V_{lim} + R=1000 N. D'après ces essais, on peut constater que la charge de rupture de la fondation est de l'ordre de 1000 N.

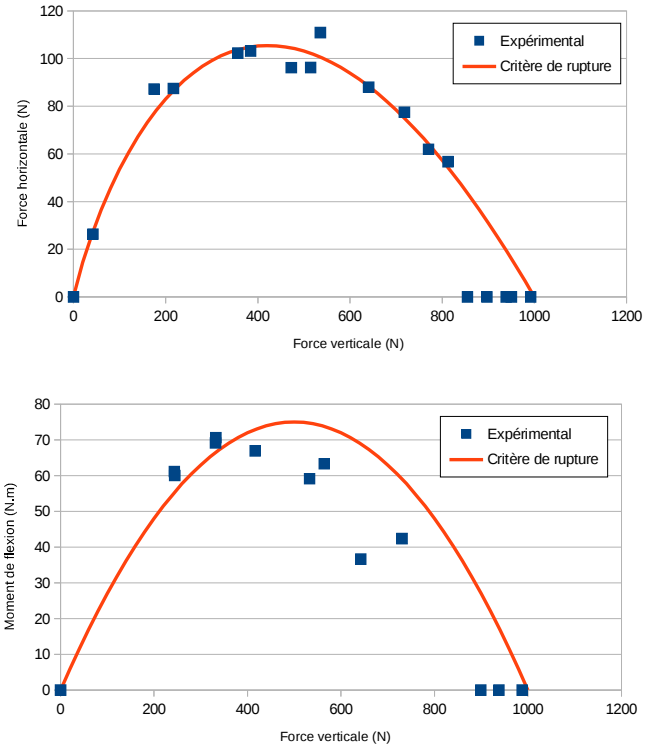


Figure 22 : Surface f_b calibrée à partir des points de la surface de rupture

Les différents essais sont listés ci-dessous et présentés dans les paragraphes suivants :

- Essai S1 : Essai sous charge verticale centrée ;
- Essais S2-1, S2-2 et S2-3 : Essais sous charge verticale puis inclinée ;
- Essais S2-4 et S2-5 : Essai sous charge excentrée ;
- Essais C1-1 et C1-2 : Essai sous charge inclinée et excentrée ;
- Essais C2 et C3 : Essais sous chargement complexe ;

5.1.1 Essai S1 : Essai sous charge verticale centrée

L'essai S1 permet de confirmer le constat concernant la charge de rupture. En effet, la réponse sous charge verticale centrée montre que la partie asymptotique de la courbe charge-tassement commence au voisinage de cette valeur. Cela permet de définir les valeurs des paramètres du critère relatif à la capacité portante.

Classe	Paramètre	Valeur retenue
Paramètres du critère relatif à la capacité portante	Charge verticale limite d'élasticité V_{lim}	20 N
	Charge de rupture V_{ult}	1600 N
	Tassement de référence $v_{r,CP}^{pl}$	7 mm

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5.1.2 Essais S2-1, S2-2 et S2-3 : Essais sous charge verticale puis inclinée

Pour ces essais, un effort vertical V est appliqué à la fondation. Puis, cet effort est maintenu constant, et un effort horizontal est appliqué. Les valeurs des efforts pour chacun des trois essais sont listées dans le tableau suivant :

Essai	Effort vertical V (N)	Effort horizontal H_x ou H_b(N)	Inclinaison de la charge (°)
S2-1	180	85	25
S2-2	360	100	15
S2-3	720	75	6

Pour ces essais, il est possible que le critère de glissement soit activé. Sachant que le sol est sableux, les valeurs de 0 Pa et 15° représentent des estimations raisonnables de la cohésion et de l'angle de frottement à l'interface. De ce fait, seule l'inclinaison de la charge dans l'essai S2-1 est jugée critique vis-à-vis de ce critère et par suite le critère est activé pour cet essai seulement. Les paramètres suivants sont retenus pour le critère de glissement :

Classe	Paramètre	Valeur retenue
Paramètres du critère de glissement	Cohésion à l'interface c_{inter}	0 Pa
	Angle de frottement à l'interface ϕ_{inter}	15°
	Module d'écrouissage H_{sl}	7.5 kN/m
	Coefficient d'écrouissage γ	0 m^{-1}

P our ce même critère, la fonction d'écrouissage isotrope n'est pas suffisante pour reproduire la réponse de la fondation. Il est alors nécessaire d'activer la loi d'écrouissage cinématique associée au critère de portance et pilotée par la variable $R_{h,b}$. Les paramètres pour cette loi diffèrent légèrement d'un essai à l'autre, mais sont du même ordre de grandeur.

Classe	Paramètre	Essai S2-1	Essai S2-2	Essai S2-3
Paramètres du critère relatif à la capacité portante	Coefficient d'écrouissage horizontal $I_{h,x}$	200 kN/m		
	Paramètre d'écrouissage horizontal $\gamma_{h,x}$	1400 m^{-1}		

5.1.3 Essais S2-4 et S2-5 : Essai sous charge excentrée

Pour ces essais, un effort vertical V et un moment M_b sont appliqués simultanément. Le rapport M_b/V est gardé constant pendant les essais : il est égal à 12 cm pour l'essai S2-4 et à 18 cm pour l'essai S2-5. Le tableau suivant résume les données des chargements appliqués dans chaque essai.

Essai	Effort vertical V (N)	Moment M_b ou $-M_y$(N.m)	Excentrement (cm)
S2-4	530	65	12
S2-5	450	80	18

Le mécanisme de décollement est ici ignoré. Les valeurs des paramètres du critère de portance, déterminés à partir de l'essai S1 (§5.1.1), sont retenues pour cet essai. Il est nécessaire d'activer la loi d'écrouissage cinématique associée au critère de portance pour cet essai également. Cette loi régit l'évolution de la variable $R_{m,b}$, ses paramètres diffèrent légèrement d'un essai à l'autre, mais sont du même ordre de grandeur.

Classe	Paramètre	Essai S2-4	Essai S2-5
Paramètres du critère relatif à la capacité portante	Coefficient d'écrouissage rotationnel $I_{m,b}$	40 kN.m/rad	
	Paramètre d'écrouissage rotationnel $\gamma_{m,l}$	3000 rad^{-1}	

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5.1.4 Essais C1-1 et C1-2 : Essai sous charge inclinée et excentrée

Pour ces essais, un effort vertical est appliqué à la semelle. Cet effort est maintenu constant, puis un effort horizontal H_b et un moment M_b sont appliqués simultanément, tel que le rapport M_b/H_b reste constant. Ce rapport est égal à 0.3 pour l'essai C1-1 et à 1 pour l'essai C1-2. Les chemins de chargement des deux essais sont résumés dans le tableau ci-contre.

Essai	Effort vertical V (N)	Effort horizontal H_x (N)	Moment M_b ou $-M_y$ (N.m)	M_b/H_b
C1-1	360	90	27	0.3
C1-2	360	60	60	1

Les excentrements maximaux sont respectivement 7.5 cm et 16.6 cm pour les deux essais. Les mécanisme de décollement sont toutefois laissés désactivés car ils ne sont pas jugés critiques. D'autre part, les inclinaisons des charges sont respectivement 14° et 9.5°. Le mécanisme de glissement ne s'active pas non plus. Il est à noter que pour reproduire correctement le comportement en rotation de la fondation, les paramètres suivants ont été modifiés :

Classe	Paramètre	Essai C1-1	Essai C1-2
Raideur en rotation	Autour de y, $K_{ry,ry}$	80 kN.m/rad	
Paramètres du critère relatif à la capacité portante	Limite de fluage de la fondation V_{lim}	70 N	
	Coefficient d'écrouissage en rotation $I_{r,y}$	80 kN/m	
	Paramètre d'écrouissage en rotation $\gamma_{r,y}$	1500 m^{-1}	

5.1.5 Essais C2 et C3 : Essais sous chargement complexe

- Essai C2 : Pour cet essai, deux chemins de chargement montrés sur la Figure 23 sont suivis : un chargement excentré (OA) et un chargement simultané en translation et rotation (AB). D'abord, un effort vertical V = 360 N et un moment M_b = - M_y = 60 N.m sont appliqués simultanémént. Ensuite, l'effort vertical est maintenu constant et un effort horizontal H_b = H_x = 100 N et un moment M_b = - M_y = -100 N.m sont appliqués simultanémént.

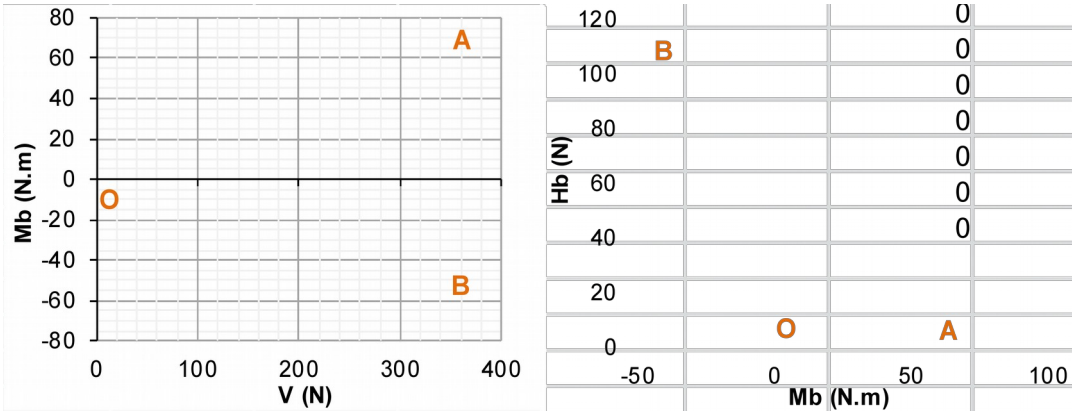


Figure 23 : Chemins de chargement – Essai C2

Pour ce chemin de chargement, l'excentrement maximal de la charge est égal à 16.6 cm (valeur atteinte à l'issue de la première étape du chargement OA), et l'inclinaison maximale de la charge est égale à 15.5°. Compte tenu de ces valeurs, on peut constater que le mécanismes de glissement sera peu activé durant cet essai. Le mécanisme de décollement est ici désactivé.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

D'autre part, une comparaison des résultats de cet essai à ceux d'un essai similaire (S2-4 ou S2-5 par exemple) montre que les déplacements engendrés par la semelle durant cet essai sont moins importants que ceux engendrés avant. Cela montre que la le terrain a déjà flué, et que sa limite élastique a donc augmenté , possiblement à cause de l'effet du déchargement-rechargement sur le sol (les essais semblent être réalisés en série sur le même échantillon). De ce fait, les paramètres relatifs au critère de portance, et notamment l'écrouissage cinématique en rotation, ont été recalibrés pour simuler cette augmentation. Les nouvelles valeurs retenues pour cet essai et l'essai cyclique C3 sont listés dans le tableau suivant.

Classe	Paramètre	Essai C2	Essai C3
Paramètres du critère relatif à la capacité portante	Charge verticale limite d'élasticité V_{lim}	250 N	360 N
	Coefficient d'écrouissage en rotation $I_{r,y}$	10 kN.m/rad	7,5 kN.m/rad
	Paramètre d'écrouissage en rotation $\gamma_{r,y}$	375 rad^{-1}	281,25 rad^{-1}

- Essai C3 : Pour cet essai, les chemins de chargement donnés sur la Figure 24 sont suivis : une succession de chargement excentrés (OA, BC et DE) et de chargement où un effort horizontal et un moment sont appliqués simultanément, à effort vertical constant (AB et CD). Les chargements appliqués à chaque étape et la résultante à l'issue de l'étape sont listés dans le tableau suivant.

Etape	Durant l'étape			A l'issue de l'étape		
	ΔV (N)	ΔH$_b$ (N)	ΔM$_b$ (N.m)	V (N)	H$_b$ (N)	M$_b$ (N.m)
OA	480	0	50	480	0	50
AB	0	40	-40	480	40	10
BC	80	0	10	560	40	20
CD	0	40	-40	560	80	-20
DE	-280	0	-30	280	80	-50

Les hypothèses concernant les mécanismes et les paramètres du critère de portance ont été détaillés dans le paragraphe concernant l'essai cyclique C3.

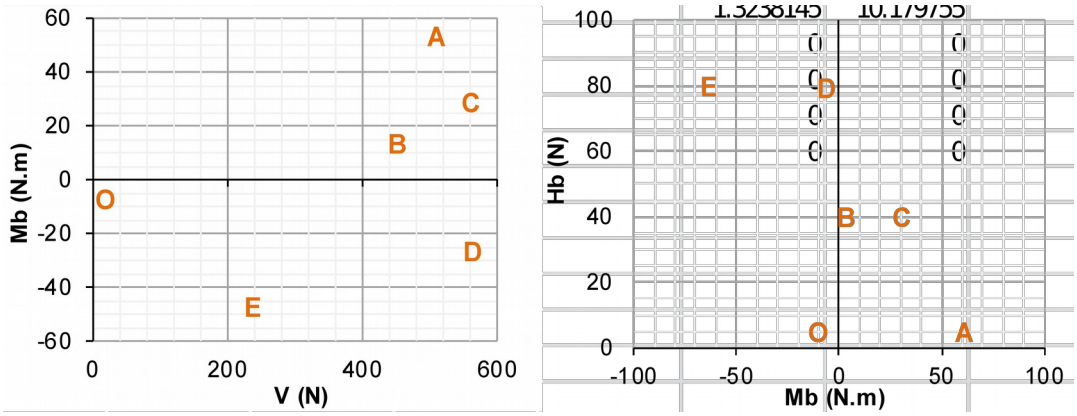


Figure 24 : Chemins de chargement – Essai C3

5.2 Caractéristiques de la modélisation

Un élément DIS_TR_N à 1 nœud de taille nulle.
Un nœud N1 : chargement complet en force ou déplacement détaillé cas test par cas test. Ce chargement est effectué avec une option de subdivision.
Opérateur utilisé : STAT_NON_LINE, le calcul ne met pas en jeu d'effet de masse justifiant un traitement dynamique et sera traité de manière quasi-statique.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5.3 Caractéristiques du maillage

```
1 POI1.
1 NŒUD.
```

5.4 Géométrie et modélisation

Un élément discret de taille nulle à 1 nœud.
Repère local = repère global.
Une matrice de rigidité K_TR_D_N affectée par défaut (associée à un élément DIS_TR) identique pour chaque phase de calcul et donnée dans le tableau ci-dessous :

Raideur en :	
Translation selon x : K_{xx}	200 kN/m
Translation selon y : K_{yy} Inutile dans les calculs	200 kN/m
Translation selon z : K_{zz}	90 kN/m
Rotation autour de x : $K_{rx,rx}$ Inutile dans les calculs	40 kN.m/rad excepté pour C1-2 et C2-2 où la raideur est augmentée à 80 kN.m/rad
Rotation autour de y : $K_{ry,ry}$	40 kN.m/rad
Rotation autour de z : $K_{rz,rz}$ Inutile dans les calculs	40 kN.m/rad

5.5 Propriétés de matériaux

Lié à un comportement incrémental FONDA_SUPERFI comprenant les paramètres communs à tous les tests :

- LONG_X : longueur de la fondation selon x pris égal à $L_x = 0.6\ m$;
- LONG_Y : longueur de la fondation filante selon y pris égal à $L_y = 10\ m$;

Ce comportement incrémental est aussi lié à 3 mécanismes de non-linéarité avec des paramètres associés :

- Un mécanisme de perte de capacité portante (ou noté CP) avec les paramètres suivants :
  - CP_SERVICE : Capacité portante de fluage de la fondation égal à $V_{lim} = 20\ N$ cf. §5.1.1 pour les calculs S1 et S2, pour les autres calculs, suites aux nombreux essais la valeur de cette capacité portante de fluage est augmentée comme montré dans le tableau ci-dessous ;

Calcul considéré	S1, S2-1 à S2-5	C1-2 et C2-2	C2	C3
CP_SERVICE (N)	20	70	250	360

  - CP_ULTIME : Capacité portante ultime de la fondation prise égale à $V_{ult} = 1600\ N$ cf. §5.1.1 ;
  - DEPL_REFE : Tassement de référence servant à définir l'évolution de l'écrouissage isotrope pris égal à $v_{pl,r}^{CP} = 7\ mm$;
  - RAID_CP_X : raideur de l'écrouissage cinématique en translation selon x du critère de capacité portante $I_{h,x} = 300\ kN/m$;
  - GAMMA_CP_X : Paramètre de l'écrouissage cinématique en translation selon x du critère de capacité portante, $\gamma_{h,x} = 1400\, m^{-1}$;
  - RAID_CP_ RY, GAMMA_CP_ RY : raideur et paramètre de l'écrouissage cinématique en rotation autour de y du critère de capacité portante $I_{r,y} = 40\ kN.m/rad$, $\gamma_{r,y} = 3000\, rad^{-1}$ il s'agit de la valeur initiale. Pour les chargements C1-1 et C1-2, un durcissement de ces paramètres d'écrouissage est pris en compte tandis que pour C2 et C3 ces paramètres sont réduits comme sur le tableau ci-dessous ;

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Calcul considéré	S1, S2-1 à S2-5	C1-2 et C2-2	C2	C3
RAID_CP_RY (N)	40 000	80 000	10 000	7500
GAMMA_CP_RY (rad^{-1})	3 000	2 000	375	281,25

- RAID_CP_Y,GAMMA_CP_Y,RAID_CP_RX,GAMMA_CP_RX : Ces paramètres qualifiant l'écrouissage cinématique en capacité portante ne sont pas renseignés dans ses directions car non utiles, ils sont par défaut égaux à 0 ;

- Un mécanisme de glissement (ou noté G) avec les paramètres suivants :
  - PHI : Angle de frottement à l'interface entre le sol et l'élément de fondation égal à $\phi_{inter}=15\,°$, cf §5.1.2 ;
  - COHESION : La cohésion à l'interface entre le sol et l'élément de fondation égale à $c_{inter}=0\,kPa$, cf §5.1.2 ;
  - RAID_GLIS : Correspond à la raideur de l'écrouissage du glissement $H_{sl}=7{,}5\,kN/m$, cf §5.1.2 ;
  - GAMMA_REFE : Paramètre $\gamma=400\,m^{-1}$ de l'écrouissage cinématique, cf § 5.1.2 ;

- Le mécanisme de décollement n'est pas activé ici, le paramètre DECOLLEMENT n'est donc pas renseigné et par défaut égal à 'NON' ;

5.6 Conditions aux limites et chargements

L'élément étant un discret à un nœud, il comprend implicitement ces conditions limites, via la matrice de rigidité introduite.
Le chargement imposé est un chargement en force imposé au nœud N1 avec cas-test par cas-test la carte de temps suivante :

- S1:

t (-)	0.	50.
$F_z(N)$	0.	-1000.

- S2-1 :

t (-)	0.	25.	50.
$F_z(N)$	0.	-180	-180
$F_x(N)$	0.	0.	85.

- S2-2 :

t (-)	0.	25.	50.
$F_z(N)$	0.	-360	-360.
$F_x(N)$	0.	0.	100.

- S2-3 :

t (-)	0.	25.	50.
$F_z(N)$	0.	-720.	-720.
$F_x(N)$	0.	0.	75.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- S2-4 :

t (-)	0.	50.
$F_z(N)$	0.	-530
$M_y(N.m)$	0.	-65.

- S2-5 :

t (-)	0.	50.
$F_z(N)$	0.	-450.
$M_y(N.m)$	0.	-80.

- C1-1 :

t (-)	0.	10,	50.
$F_z(N)$	0.	-360.	-360.
$F_x(N)$	0.	0.	90.
$M_y(N.m)$	0.	0.	27.

- C1-2 :

t (-)	0.	10,	50.
$F_z(N)$	0.	-360.	-360.
$F_x(N)$	0.	0.	60.
$M_y(N.m)$	0.	0.	60.

- C2 :

t (-)	0.	25.	50.
$F_z(N)$	0.	-360.	-360.
$F_x(N)$	0.	0.	100.
$M_y(N.m)$	0.	-60.	40.

- C3 :

t (-)	0.	25.	50.	75.	100.	125.
$F_z(N)$	0.	-480.	-480.	-560.	-560.	-280.
$F_x(N)$	0.	0.	40.	40.	80.	80.
$M_y(N.m)$	0.	-50.	-10.	-20	20.	50.

5.7 Conditions initiales

Déplacements, efforts et variables internes nuls.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5.8 Grandeurs testées et résultats

Les résultats sont comparés au résultats de l'essai de la référence 3 qui ont été numérisés:

Identification	Instant	Chargement	Référence	% différence
DZ	27	S1	-7,8 mm	25 %, SOURCE_EXTERNE
DZ	37	S1	-13,4 mm	10 %, SOURCE_EXTERNE
DZ	47	S1	-28,6 mm	30 %, SOURCE_EXTERNE
DX	45	S2-1	3,4 mm	15 %, SOURCE_EXTERNE
DX	48	S2-1	4,9 mm	10 %, SOURCE_EXTERNE
DX	50	S2-1	12,2 mm	30 %, SOURCE_EXTERNE
DX	50	S2-2	15,0 mm	15 %, SOURCE_EXTERNE
DX	50	S2-3	21,6 mm	15 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	32	S2-4	4,8 mrad	80 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	48	S2-4	27,0 mrad	15 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	23	S2-5	3,9 mrad	5 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	34	S2-5	7,6 mrad	40 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	42	S2-5	32,3 mrad	50 %, SOURCE_EXTERNE
DX	41	C1-1	3,4 mm	30 %, SOURCE_EXTERNE
DX	50	C1-1	14,6 mm	50 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	50	C1-1	7,6 mrad	5 %, SOURCE_EXTERNE
DX	30	C1-2	1,5 mm	50 %, SOURCE_EXTERNE
DX	43	C1-2	4,8 mm	15 %, SOURCE_EXTERNE
DX	50	C1-2	12,1 mm	30 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	50	C1-2	11,8 mrad	15 %, SOURCE_EXTERNE
DX	30	C2	0,3 mm	5 %, SOURCE_EXTERNE
DX	40	C2	1,8 mm	10 %, SOURCE_EXTERNE
DX	50	C2	11,5 mm	60 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	15	C2	3,2 mrad	10 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	24	C2	6,6 mrad	5 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	31	C2	6,5 mrad	10 %, SOURCE_EXTERNE
DX	94	C3	3,2 mm	15 %, SOURCE_EXTERNE
DX	125	C3	5,7 mm	10 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	18	C3	3,0 mrad	10 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	36	C3	6,0 mrad	5 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	80	C3	5,2 mrad	40 %, SOURCE_EXTERNE
DZ	18	C3	3,2 mm	35 %, SOURCE_EXTERNE
DZ	61	C3	7,8 mm	10 %, SOURCE_EXTERNE
DZ	109	C3	10,1 mm	25 %, SOURCE_EXTERNE

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5.9 Comparaison résultats CODE_ASTER/RÉSULTATS expérimentaux

On compare pour tous les chargements les résultats expérimentaux aux résultats avec *code_aster* :

- S1 : Le chargement vertical est relativement bien reproduit par *code_aster*, excepté pour le dernier point expérimental. Les paramètres de capacité portante V_{lim}, V_{ult} et $v_{pl,r}^{CP}$ ont été calé afin de bien correspondre à ce chargement et au mieux pour les suivants ;

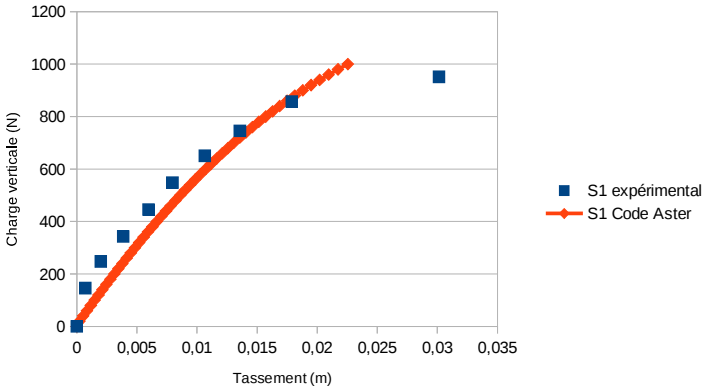


Figure 25 : Résultats du chargement S1 comparés à *code_aster*.

- S2-1 : Le déplacement horizontal suit bien les résultats expérimentaux, par contre on s'aperçoit clairement que le tassement dû à une force horizontale trop élevée n'est pas correctement reproduit.

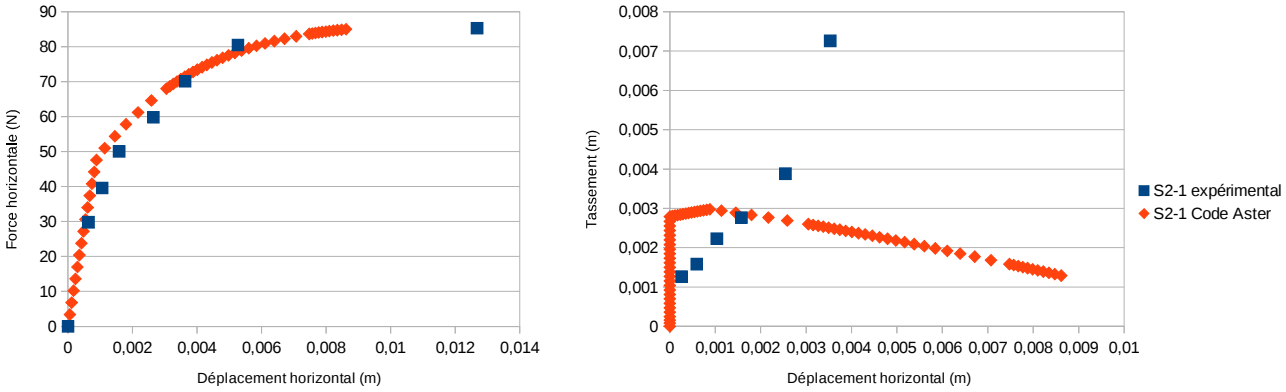


Figure 26 : Résultats du chargement S2-1 comparés à *code_aster*.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- S2-2 : Le déplacement horizontal suit de façon approchée les résultats expérimentaux, par contre on s'aperçoit clairement que le tassement dû à une force horizontale trop élevée n'est pas correctement reproduit.

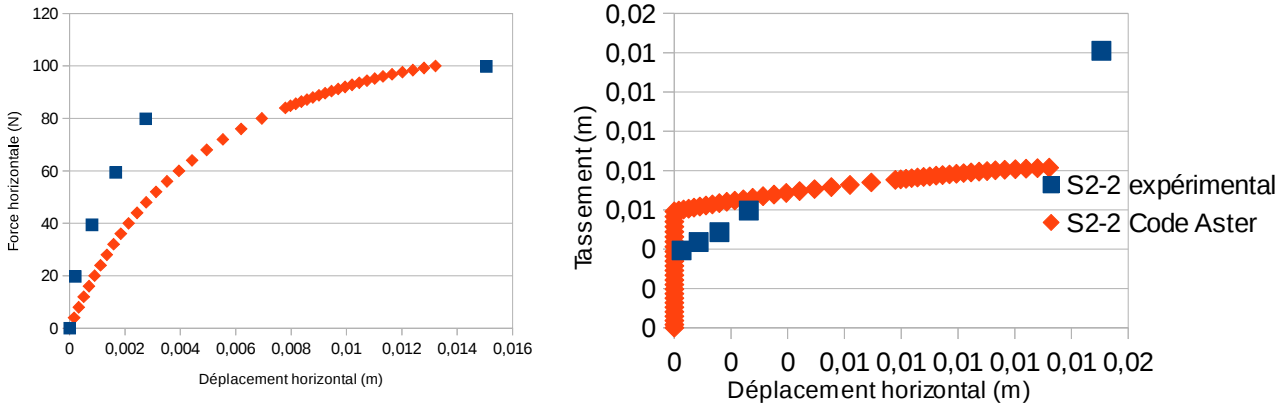


Figure 27 : Résultats du chargement S2-2 comparés à *code_aster*.

- S2-3 : Le déplacement horizontal suit de façon approchée les résultats expérimentaux, par contre on s'aperçoit clairement que le tassement dû à une force horizontale trop élevée n'est pas correctement reproduit.

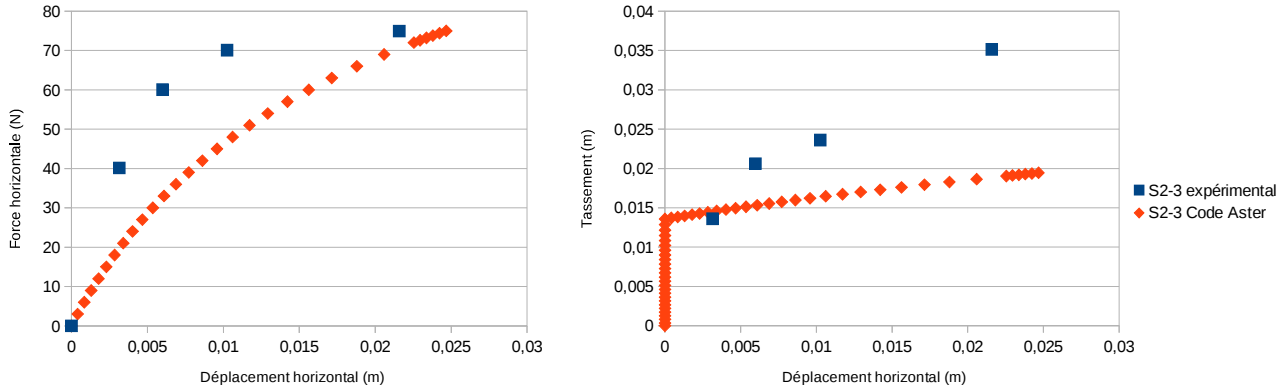


Figure 28 : Résultats du chargement S2-3 comparés à *code_aster*.

- S2-4 : La rotation suit de façon approchée les résultats expérimentaux, par contre on s'aperçoit clairement que le tassement dû à un moment trop élevé n'est pas correctement reproduit.

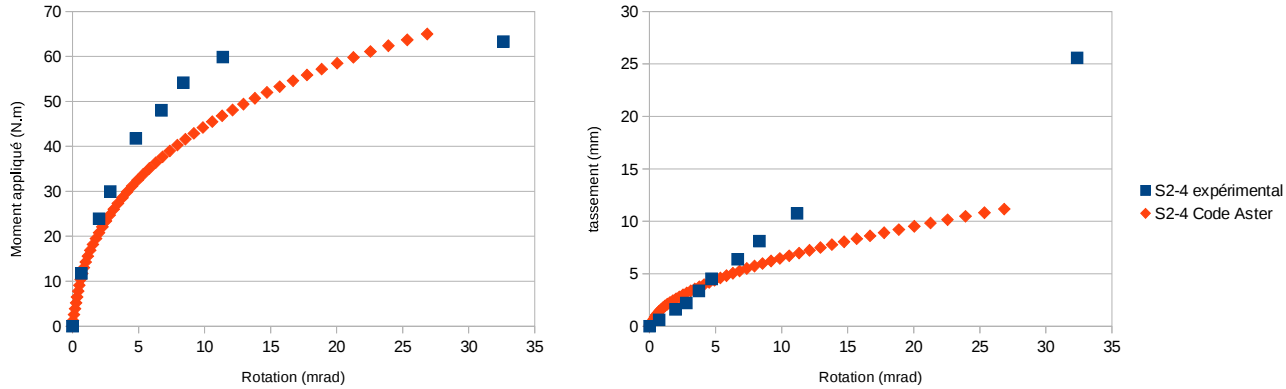


Figure 29 : Résultats du chargement S2-4 comparés à *code_aster*.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- S2-5 : La rotation suit de façon approchée les résultats expérimentaux, par contre on s'aperçoit clairement que le tassement dû à un moment trop élevé n'est pas correctement reproduit.

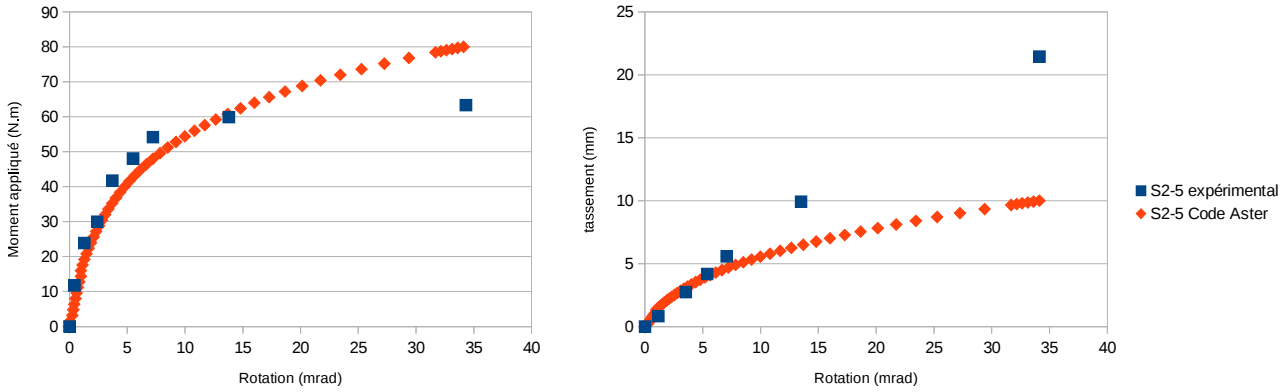


Figure 30 : Résultats du chargement S2-5 comparés à *code_aster*.

- C1-1 : La courbe déplacement horizontal/effort horizontal suit correctement les résultats expérimentaux. La courbe rotation/moment quant-à-elle, suit difficilement les résultats expérimentaux et ce avec une modification des raideurs en rotation et de l'écrouissage cinématique en rotation. Par contre, on s'aperçoit clairement que le tassement ne correspond pas aux résultats expérimentaux.

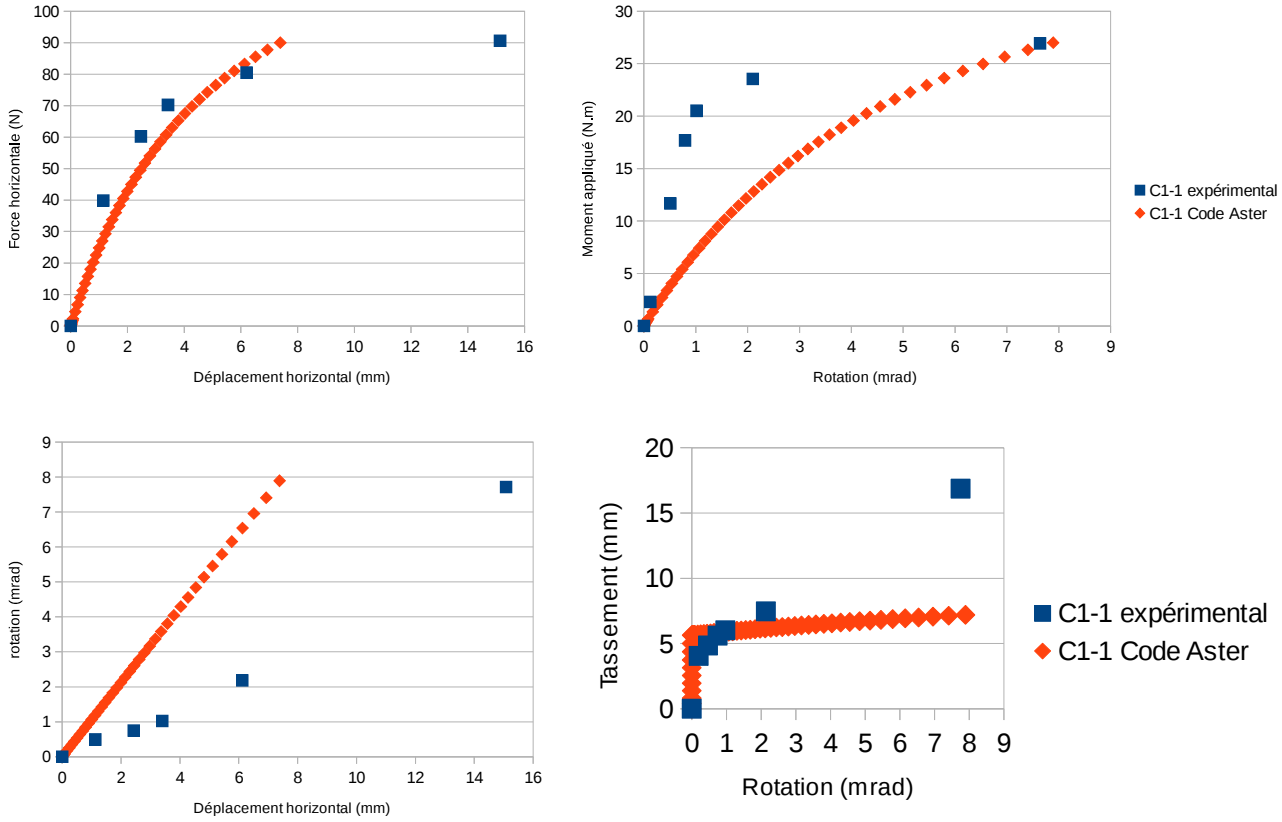


Figure 31 : Résultats du chargement C1-1 comparés à *code_aster*.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- C1-2 : La courbe déplacement horizontal/effort horizontal suit correctement les résultats expérimentaux. La courbe rotation/moment quant-à-elle, suit difficilement les résultats expérimentaux et ce avec une modification des raideurs en rotation et de l'écrouissage cinématique en rotation. Par contre, on s'aperçoit clairement que le tassement ne correspond pas aux résultats expérimentaux.

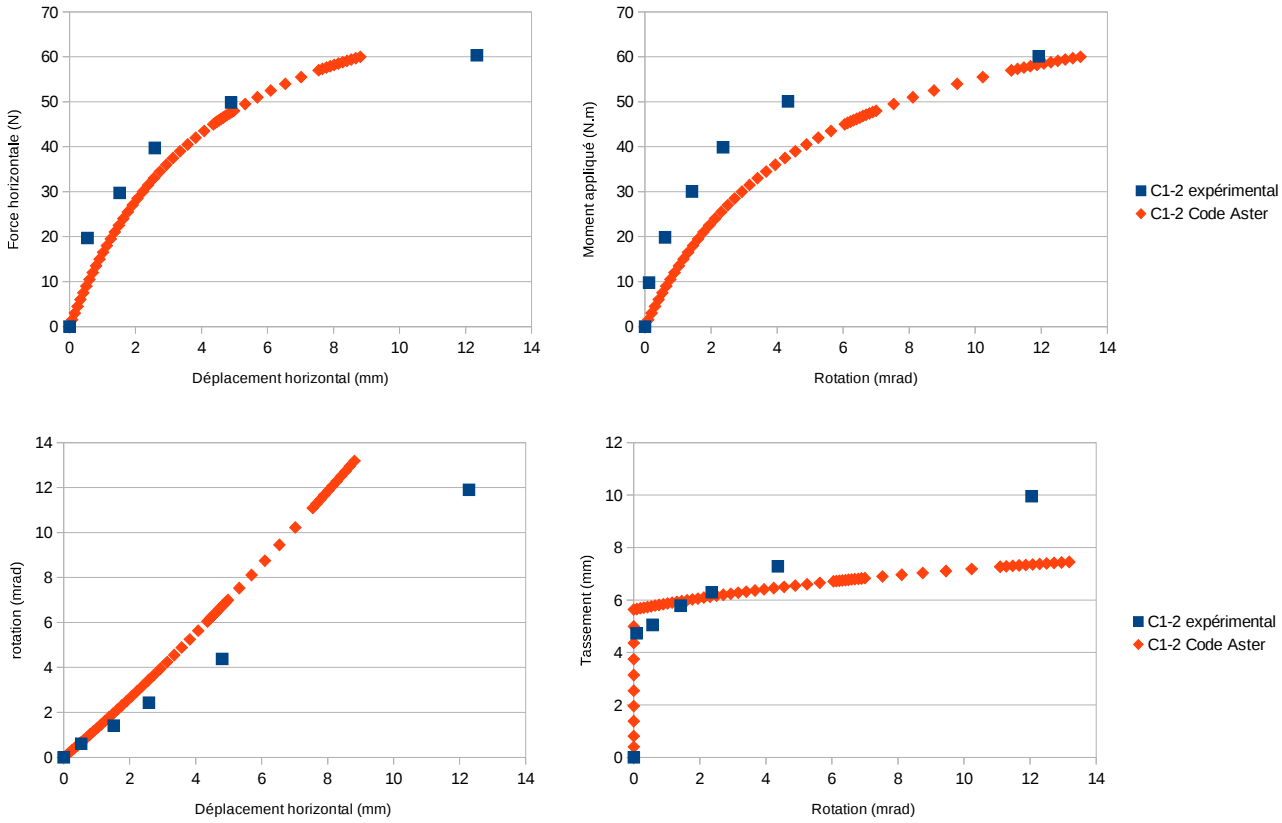


Figure 32 : Résultats du chargement C1-2 comparés à *code_aster*.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- C2 : La courbe déplacement horizontal/effort horizontal est plus raide sous *code_aster* que lors des résultats expérimentaux. La première partie de la courbe rotation/moment quant-à-elle, suit assez bien les résultats expérimentaux, le reste de la courbe s'aplatit beaucoup plus que les résultats expérimentaux. Par contre, on s'aperçoit clairement que le tassement ne correspond pas aux résultats expérimentaux.

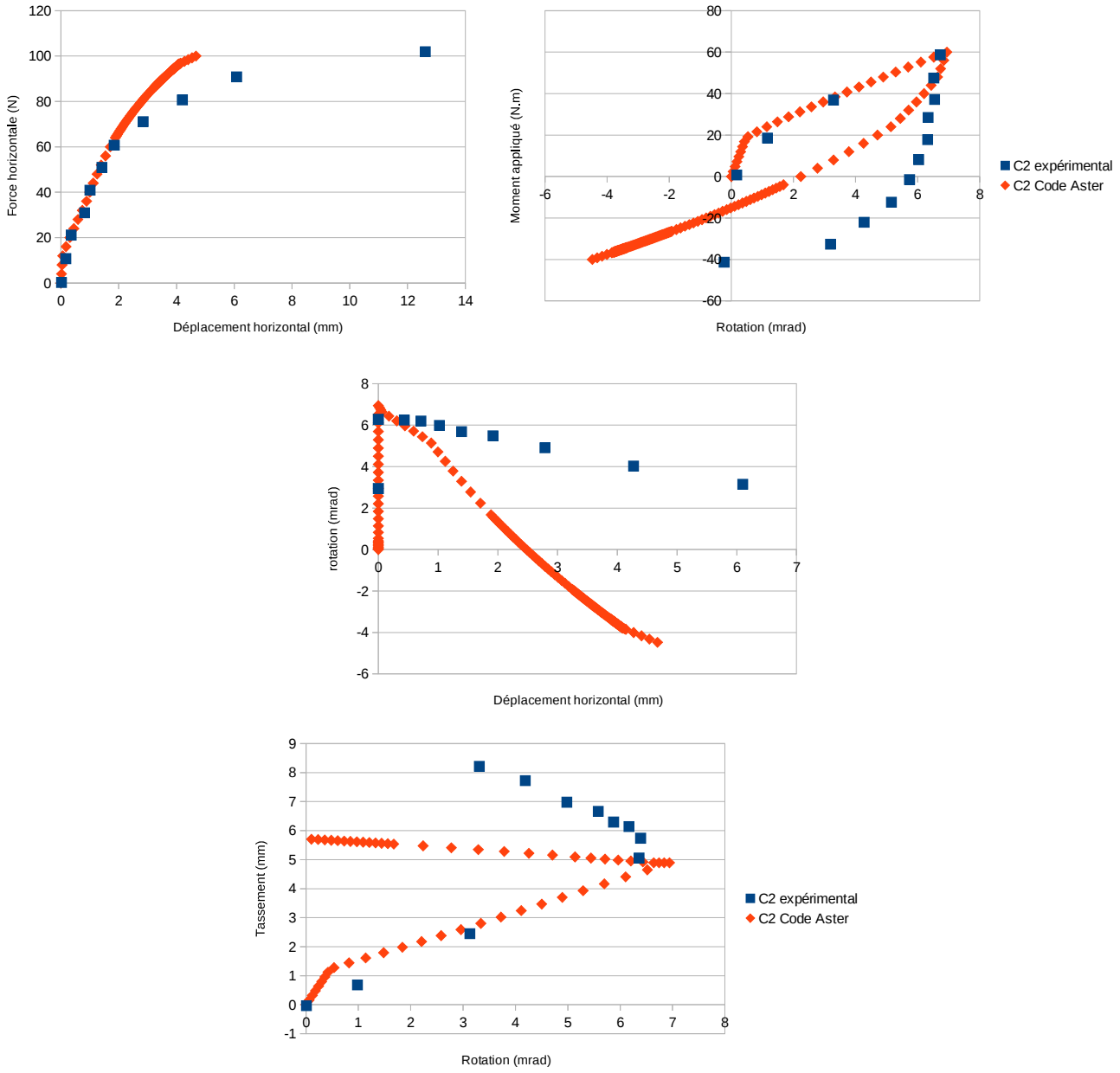


Figure 33 : Résultats du chargement C2 comparés à *code_aster*.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- C3 : La courbe déplacement horizontal/effort horizontal correspond bien. La première partie de la courbe rotation/moment quant-à-elle, suit assez bien les résultats expérimentaux, le reste de la courbe s'aplatit beaucoup plus que les résultats expérimentaux. Par contre, on s'aperçoit clairement que le tassement ne correspond pas aux résultats expérimentaux.

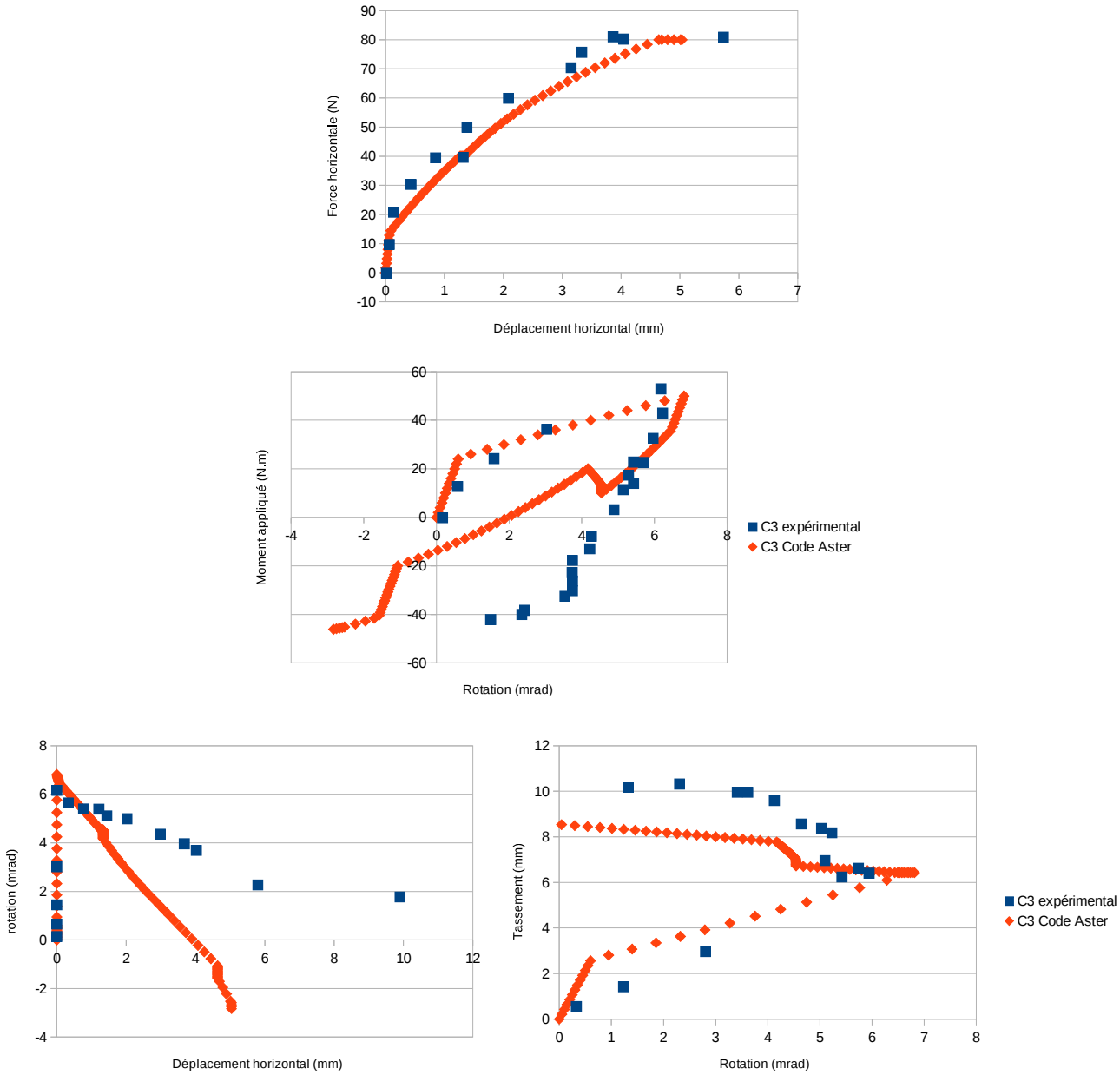


Figure 34 : Résultats du chargement C3 comparés à *code_aster*.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6 Modélisation F, G et H

6.1 Présentation des cas-test

6.1.1 Objectif du cas-test

Le but de ces cas-test est de faire une comparaison entre le comportement FONDA_SUPERFI et le logiciel Fondsis développé par terrasol. Des calculs dynamiques transitoires non-linéaires (DYNA_NON_LINE) sont effectués avec prise en compte du glissement et du glissement à l'interface sol-structure.

6.1.2 Modèle de calcul

La structure est modélisée par une poutre mince non pesante et deux masses ponctuelles qui tiennent compte de la masse de la fondation et de la superstructure. L'amortissement au niveau de la structure est introduit sous le formalisme de Rayleigh.
L'interaction sol-structure est modélisée par le biais d'un élément discret de type macro-élément qui tient compte de la raideur et de l'amortissement issus des fonctions d'impédance ainsi que des mécanismes non-linéaires à l'interface entre le sol et la fondation : glissement, décollement et perte de capacité portante.

- Sol (raideur et amortissement d'ISS) :

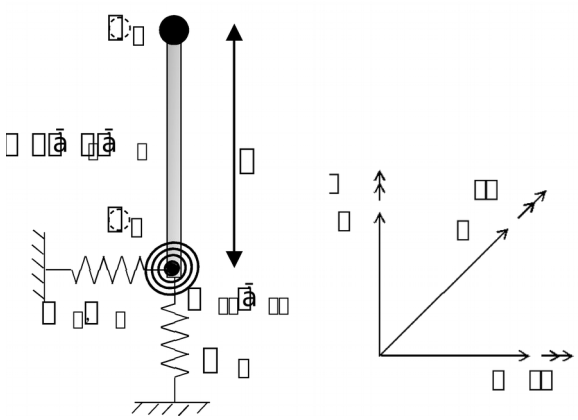


Figure 35 : Modèle de calcul utilisé pour la comparaison avec Fondsis

- Sol (raideur et amortissement d'ISS) :

K_X	1E4 MN/m	C_X	0 MN/m/s
K_Y	1E4 MN/m	C_Y	0 MN/m/s
K_Z	1E4 MN/m	C_Z	0 MN/m/s
K_{RX}	1E6 MNm/rad	C_{RX}	0 MNm/rad/s
K_{RY}	1E6 MNm/rad	C_{RY}	0 MNm/rad/s
K_{RZ}	1E6 MNm/rad	C_{RZ}	0 MNm/rad/s

- Géométrie de la fondation :

L_X	13.6 m
L_Y	48.7 m

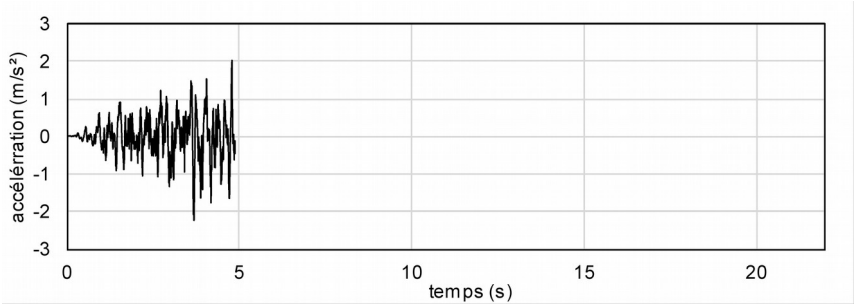
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Structure :

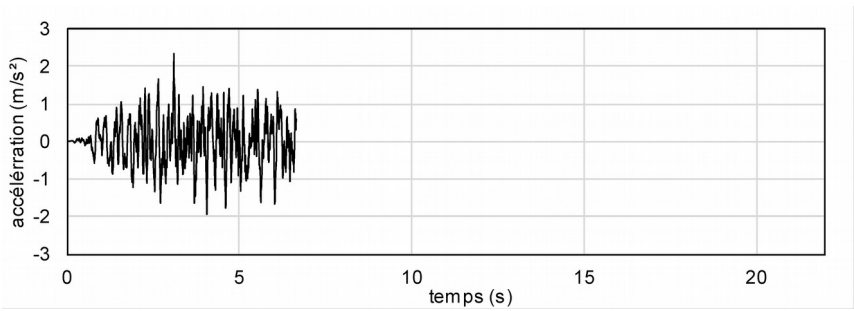
Masse de fondation m_1	4.3215 kt
Masse de superstructure m_2	1.88 kt
Hauteur H	Variable selon le test
EA	1.11E6 MN
$E I_x$	1.09E7 MNm²
$E I_y$	7.52E8 MNm²
Amortissement de Rayleigh	α = 3.35 et β = 1.32E-3

Le système est sollicité par jeu de trois accélérogrammes selon les 3 directions avec une accélération maximale de 0.3g.

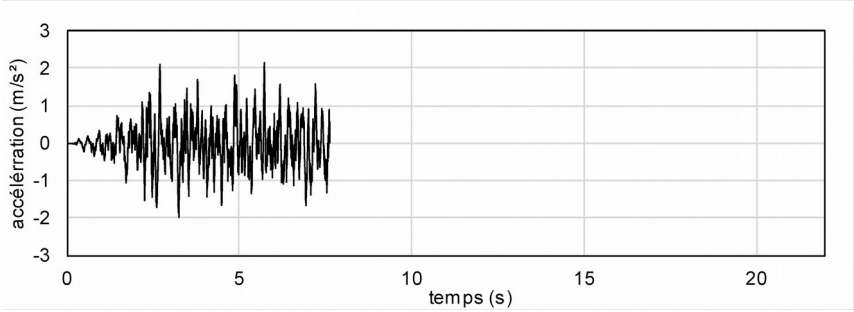
Acc_X



Acc_Y



Acc_Z



6.1.3 Caractéristiques spécifiques à chaque cas-test

Les caractéristiques spécifiques à chaque cas test sont données ci-après :

- Test 1 :

Angle de frottement φ	30°
Mécanisme décollement activé ?	NON
Hauteur H	10 m
Directions sollicitées	X et Z

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Test 2 :

Angle de frottement φ	32°
Mécanisme décollement activé ?	OUI
Hauteur H	8 m
Directions sollicitées	X et Z

- Test 3 :

Angle de frottement φ	32°
Mécanisme décollement activé ?	OUI
Hauteur H	3 m
Directions sollicitées	X, Y et Z

Nota : la valeur par défaut est utilisée pour les autres paramètres du modèle macro-élément.

6.1.4 Brève introduction de Fondsis

Fondsis est un outil numérique avancé développé par Terrasol (groupe Setec) pour l'analyse de problèmes d'interaction sol-structure (ISS) non-linéaire sous chargement dynamique et sismique. Il permet de prendre en compte les effets d'ISS non-linéaires au niveau du sol et de l'interface sol-structure dans l'analyse dynamique et sismique des structures et des ouvrages.
Les calculs sont plusieurs ordres de grandeur plus rapides qu'avec un modèle classique aux éléments finis tenant compte du sol environnant, des fondations et de la structure, ce qui en fait un outil approprié pour le traitement des problèmes d'ISS dans le cadre d'une approche performantielle de dimensionnement.

6.2 Caractéristiques de la modélisation

Un élément DIS_TR_N à 1 nœud de taille nulle.
Un nœud N1 : Ce nœud représente la fondation de la structure et est affecté par l'élément discret avec une loi de comportement FONDA_SUPERFI. A ce nœud est affecté une masse et un amortissement, qui sera sollicité par les accélérogrammes.
Un nœud N2 : Ce nœud représente la structure. A ce nœud est affecté une masse et un amortissement, qui sera sollicité par les accélérogrammes.
Un segment M11 : Ce segment affecté par un comportement de poutre élastique relie les deux nœuds précédents. Cette poutre est non pesante.

6.3 Caractéristiques du maillage

2 nœud :
- N1 : Base de la structure en (0, 0, 0) ,
- N2 : Partie haute de la structure en (0, 0, L_{poutre}) , où L_{poutre} est la longueur de la poutre (Test 1 : L_{poutre} = 10m, Test 1 : L_{poutre} = 8m, Test 1 : L_{poutre} = 3m)

5 POI1 :
- M21 : masse affecté au nœud de la base de la structure,
- M41 : amortissement affecté au nœud de la base de la structure,
- M30 : FONDA_SUPERFI affecté au nœud de la base de la structure,
- M22 : masse affecté au nœud de la partie haute de la structure,
- M42 : amortissement affecté au nœud de la partie haute de la structure.

1 SEG2 : Segment reliant les deux parties de la structure auquel est affecté un élément de poutre.

6.4 Géométrie et modélisation

Un élément discret de taille nulle à 1 nœud sur le nœud N1 (POI1 : N30).
- Repère local = repère global.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Une matrice de rigidité K_TR_D_N affectée par défaut (associée à un élément DIS_TR) :
  - $K_{xx}=10\,000\,MN/m$ pour la translation selon x ;
  - $K_{yy}=10\,000\,MN/m$ pour la translation selon y qui n'est pas utile ici (chargement uniquement en translation selon x ou en rotation autour de x) ;
  - $K_{zz}=10\,000\,MN/m$ pour la translation verticale selon z ;
  - $K_{rx,rx}=1\,000\,000\,MN.m/rad$ pour la rotation autour de x ;
  - $K_{ry,ry}=1\,000\,000\,MN.m/rad$ pour la rotation autour de y (pas utile dans les calculs) ;
  - $K_{rz,rz}=1\,000\,000\,MN.m/rad$ pour la rotation autour de z(pas utile dans les calculs) ;

Un élément de type poutre sur le segment M11.
- Orientation de la poutre VECT_Y = (1,0,0).
- Section de type GENERALE
- Les caractéristiques affectées à cette poutre sont :
  - A = 111,1253 m², section de la poutre ;
  - IZ = 1087,174789 m⁴, inertie de la section de la poutre autour de l'axe local de la poutre Z (correspondant à l'axe Y global) ;
  - IY = 75 231,83077 m⁴, inertie de la section de la poutre autour de l'axe local de la poutre Y (correspondant à l'axe X global) ;
  - JX = 1,677883684 m⁴, la constante de torsion ;
  - AY = 4,591445061 m², Le coefficient de cisaillement dans la direction locale Y (correspondant à la direction globale X) ;
  - AZ =1,677883684 m², Le coefficient de cisaillement dans la direction locale Z (correspondant à la direction globale Y).

Un élément discret de taille nulle à 1 nœud sur le nœud N1 (POI1 : N21).
- Une matrice de masse M_T_N affectée à cet élément tel que:
  - $m_{xx} = m_{yy} = m_{zz} = m1 = 4{,}3215$ kT pour la partie diagonale de la matrice de masse ;
  - $m_{xy} = m_{xz} = m_{yz} = 0$ pour la partie non diagonale de la matrice de masse.

Un élément discret de taille nulle à 1 nœud sur le nœud N1 (POI1 : N41).
- Repère local = repère global.
- Une matrice d'amortissement A_TR_D_N :
  - $\xi_{xx}=\xi_{yy}=\xi_{zz}=ray_1*m1\,avec\,ray_1=3{,}35\,et\,m1=4{,}3215\,kT$ pour l'amortissement en translation selon x, y et z ;
  - $\xi_{rx,rx}=\xi_{ry,ry}=\xi_{rz,rz}=0$ pour l'amortissement en rotation selon x, y et z ;

Un élément discret de taille nulle à 1 nœud sur le nœud N2 (POI1 : N22).
- Une matrice de masse M_T_N affectée à cet élément tel que:
  - $m_{xx} = m_{yy} = m_{zz} = m2 = 1{,}88$ kT pour la partie diagonale de la matrice de masse ;
  - $m_{xy} = m_{xz} = m_{yz} = 0$ pour la partie non diagonale de la matrice de masse.

Un élément discret de taille nulle à 1 nœud sur le nœud N2 (POI1 : N42).
- Repère local = repère global.
- Une matrice d'amortissement A_TR_D_N :
  - $\xi_{xx}=\xi_{yy}=\xi_{zz}=ray_1*m2\,avec\,ray_1=3{,}35\,et\,m2=1{,}88\,kT$ pour l'amortissement en translation selon x, y et z ;
  - $\xi_{rx,rx}=\xi_{ry,ry}=\xi_{rz,rz}=0$ pour l'amortissement en rotation selon x, y et z ;

6.5 Propriétés de matériaux

Le nœud N1 (POI1 : M30) est lié à un comportement incrémental FONDA_SUPERFI comprenant les paramètres communs à tous les tests :
- LONG_X : longueur de la fondation selon x pris égal à $L_x=13{,}6\ m$;
- LONG_Y : longueur de la fondation selon y pris égal à $L_y=48{,}7\ m$;

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- CP_SERVICE : Capacité portante de fluage de la fondation égal à $V_{lim} = 100\,000\ MN$ afin de ne pas faire intervenir le critère de capacité portante;

Les paramètres suivants varient en fonction du cas test :
- PHI : Angle de frottement à l'interface entre le sol et l'élément de fondation ;
- DECOLLEMENT : activant ou non dle décollement dans le calcul ;

Nom du cas test	Test_1	Test_2	Test_3
PHI : $\phi_{inter}(°)$	30	32	32
DECOLLEMENT	« NON »	« OUI »	« OUI »

Les autres paramètres de la loi sont gardés avec les paramètres par défaut.

La poutre du segment M11 est lié à un comportement ELAS comprenant les paramètres suivants qui sont communs à tous les tests :
- E = 10 000 MPa : Module de Young de la poutre ;
- NU = 0,2 : Le coefficient de Poisson constitutif de la poutre ;
- AMOR_ALPHA = 0,00132 : L'amortissement de Rayleigh affecté à la poutre ;
- AMOR_BETA = 0 ;

6.6 Conditions aux limites et chargements

Le chargement de ce modèle est fait en deux étapes :
- Une phase de chargement gravitaire avec STAT_NON_LINE d'initialisation
  - Avec un chargement gravitaire sur l'ensemble du modèle avec une gravité selon la DIRECTION (0, 0, -1) et une accélération de GRAVITE = 10 m/s².
  - Le degré de liberté DRZ des deux nœuds du modèle est imposé nul
- Une phase de chargement sismique avec DYNA_NON_LINE à partir du calcul précédent
  - Avec un chargement gravitaire sur l'ensemble du modèle avec une gravité selon la DIRECTION (0, 0, -1) et une accélération de GRAVITE = 10 m/s² comme pour le calcul statique.
  - Le degré de liberté DRZ des deux nœuds du modèle est imposé nul comme pour le calcul statique
  - 3 accélérogrammes sismiques appliqué sur l'ensemble des masses du système avec la commande CALC_CHAR_SEISME. Ces 3 accélérogrammes sont importés :
    - L'accélérogramme selon X ou VEC_X :

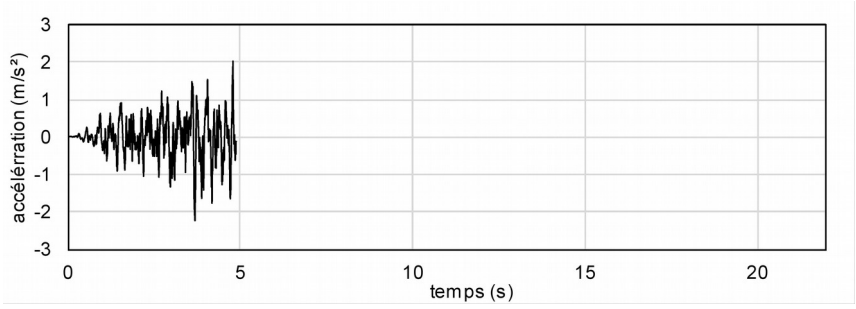


Figure 36 : Accélérogramme selon x appliqué dans le calcul dynamique

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- L'accélérogramme selon Y ou VEC_Y :

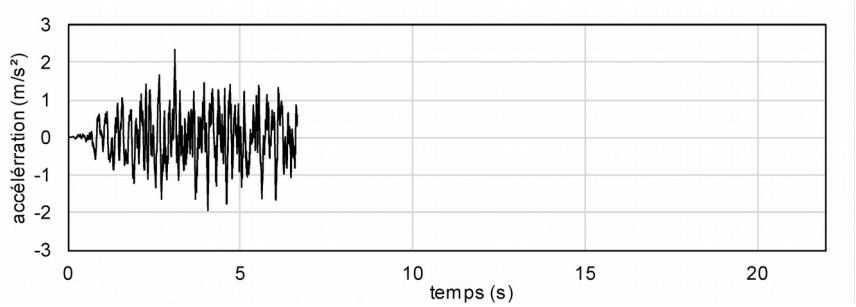


Figure 37 : Accélérogramme selon y appliqué dans le calcul dynamique

- L'accélérogramme selon Z ou VEC_Z :

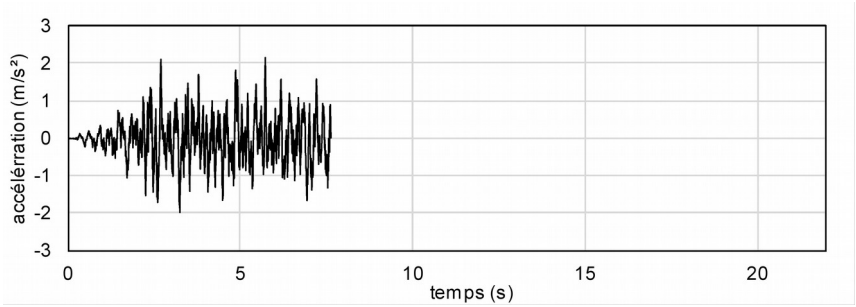


Figure 38 : Accélérogramme selon z appliqué dans le calcul dynamique

A noter que en fonction du cas-test ces accélérogrammes sont appliqués avec des multiplicateur donnés dans les tableaux ci-dessous (l'accélérogramme selon y est uniquement appliqué dans le Test_3) :

Nom du cas test	Test_1	Test_2	Test_3
Multiplicateur de l'accélérogramme selon x	1,0 * VEC_X	1,0 * VEC_X	1,0 * VEC_X
Multiplicateur de l'accélérogramme selon y	0,0 * VEC_Y	0,0 * VEC_Y	1,0 * VEC_Y
Multiplicateur de l'accélérogramme selon z	-1,0 * VEC_Z	-1,0 * VEC_Z	-1,0 * VEC_Z

Si tout l'accélérogramme est appliqué (jusqu'à t=20 s), chacun des cas-test durent environ 8 minutes, afin d'avoir un temps de calcul limité à 2 minutes, seules les 5 premières secondes sont introduites dans les cas-test (les résultats présentés au §6.9 proviendront des mêmes calculs mais prolongés jusqu'à la fin de chaque accélérogrammes.

6.7 Conditions initiales

Déplacements, efforts et variables internes nuls avant le chargement gravitaire présenté au §6.6. Le calcul dynamique a pour conditions initiales l'état de l'ensemble des éléments après le chargement gravitaire.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6.8 Grandeurs testées et résultats

Les résultats sont comparés au résultats de l'essai de la référence 3 qui ont été numérisés:

Identification	Instant	Chargement	Référence	% différence
DX	4,905	Test_1	0,005263	2 %, SOURCE_EXTERNE
DX	3,795	Test_1	-0,00381	10 %, SOURCE_EXTERNE
DZ	3,21	Test_1	-0,01046	2 %, SOURCE_EXTERNE
DRY	3,89	Test_1	0,000146	4 %, SOURCE_EXTERNE
DRY	3,79	Test_1	-0,00017	10 %, SOURCE_EXTERNE
DX	4,895	Test_2	0,004769	5 %, SOURCE_EXTERNE
DX	4,6	Test_2	-0,00276	3 %, SOURCE_EXTERNE
DZ	3,37	Test_2	-0,01023	2 %, SOURCE_EXTERNE
DRY	3,87	Test_2	0,000104	3 %, SOURCE_EXTERNE
DRY	4,605	Test_2	-0,00011	1 %, SOURCE_EXTERNE
DX	3,71	Test_3	0,003992	3 %, SOURCE_EXTERNE
DX	4,59	Test_3	-0,00305	10 %, SOURCE_EXTERNE
DY	3,57	Test_3	0,006046	1 %, SOURCE_EXTERNE
DY	2,725	Test_3	-0,00381	4 %, SOURCE_EXTERNE
DZ	1,68	Test_3	-0,00935	1 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	2,725	Test_3	0,0000423	10 %, SOURCE_EXTERNE
DRX	2,795	Test_3	-0,0000319	2 %, SOURCE_EXTERNE
DRY	4,5	Test_3	0,0000299	3 %, SOURCE_EXTERNE
DRY	3,785	Test_3	-0,0000314	10 %, SOURCE_EXTERNE

6.9 Comparaison résultats code_aster/résultats expérimentaux

On compare pour les 3 cas-tests le déplacement du point N1 donné par le cas test à celui obtenu par Fondsis. Les figures sont données dans le cas d'accélérogrammes introduit jusqu'à la fin (t=20,65s), pour une question de temps de calcul, les cas-tests s'arrêtent au bout de 5 secondes :

- Test 1 où aucun chargement selon Y n'est introduit :
  - Déplacement selon x (DX) :

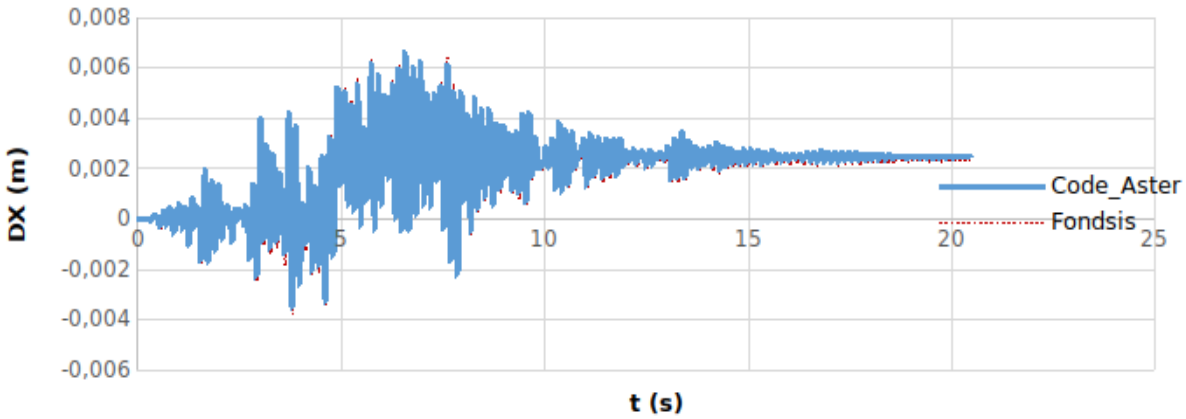


Figure 39 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 1, DX

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

◦ Déplacement selon z (DZ) :

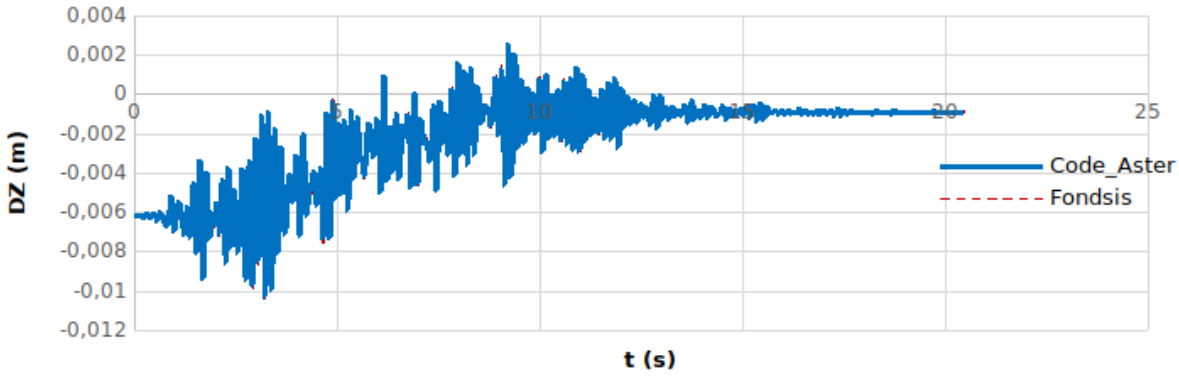


Figure 40 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 1, DZ

◦ Rotation autour de y (DRY) :

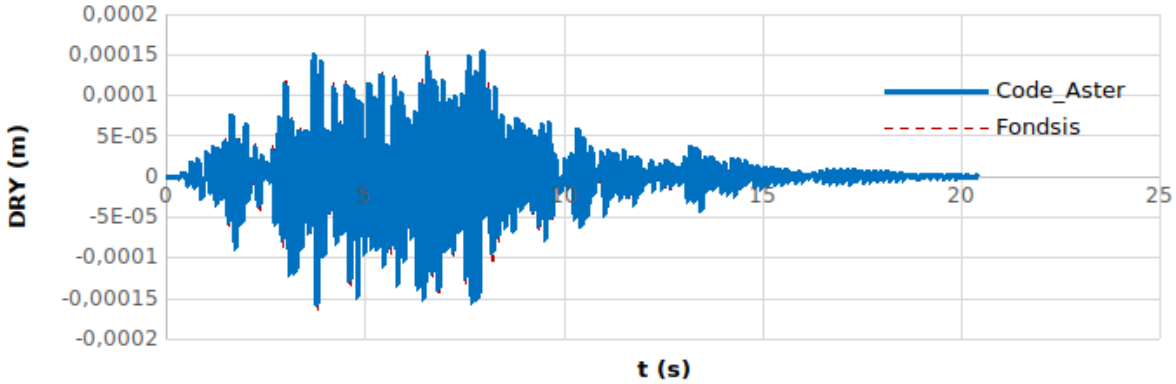


Figure 41 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 1, DRY

• Test 2 où aucun chargement selon Y n'est introduit :

◦ Déplacement selon x (DX) :

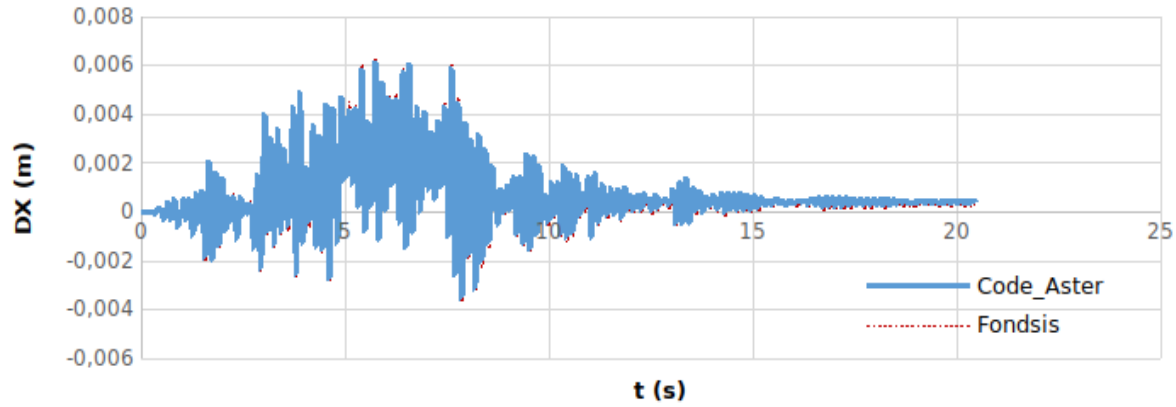


Figure 42 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 2, DX

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Déplacement selon z (DZ) :

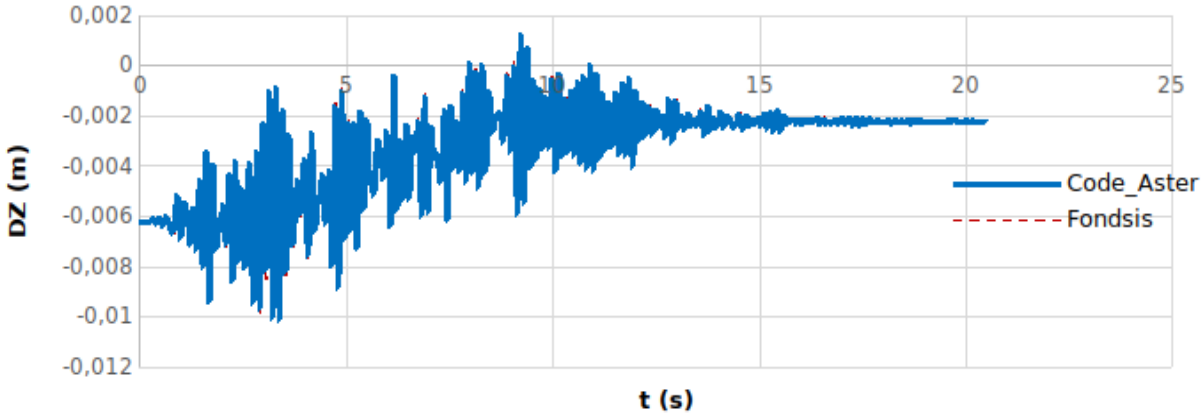


Figure 43 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 2, DZ

- Rotation autour de y (DRY) :

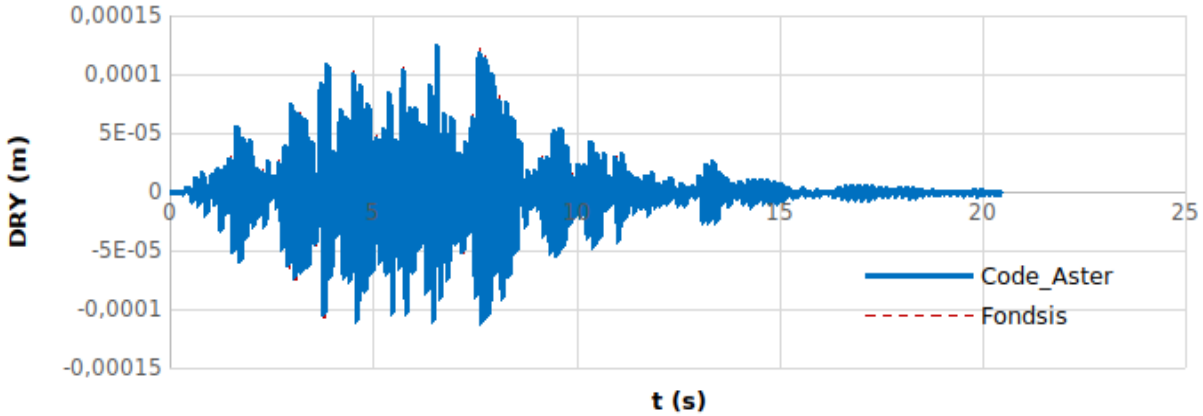


Figure 44 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 2, DRY

- Test 3 où un chargement selon Y est introduit :
  - Déplacement selon x (DX) :

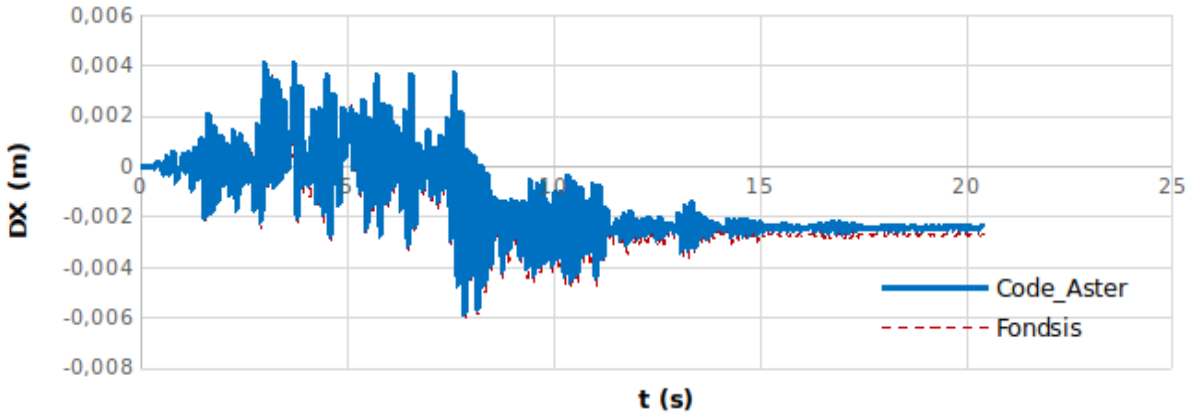


Figure 45 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 3, DX

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Déplacement selon y (DY) :

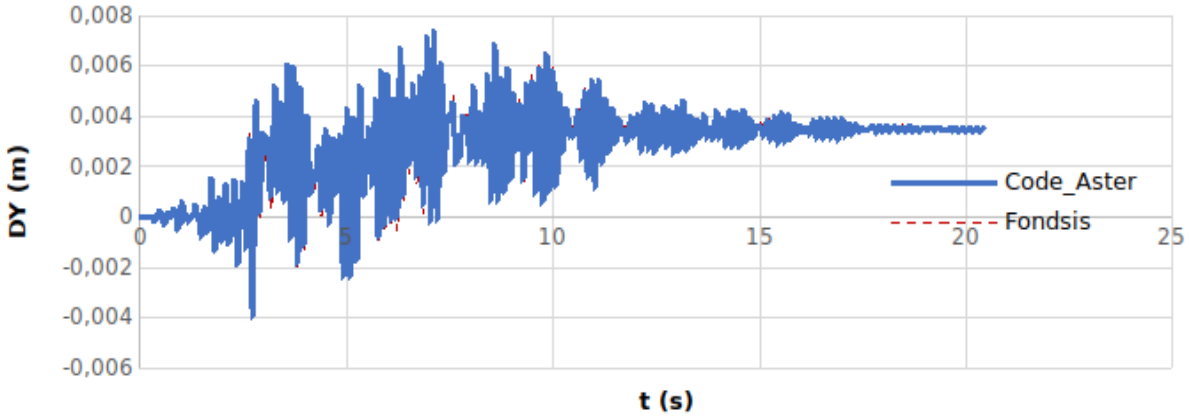


Figure 46 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 3, DY

- Déplacement selon z (DZ) :

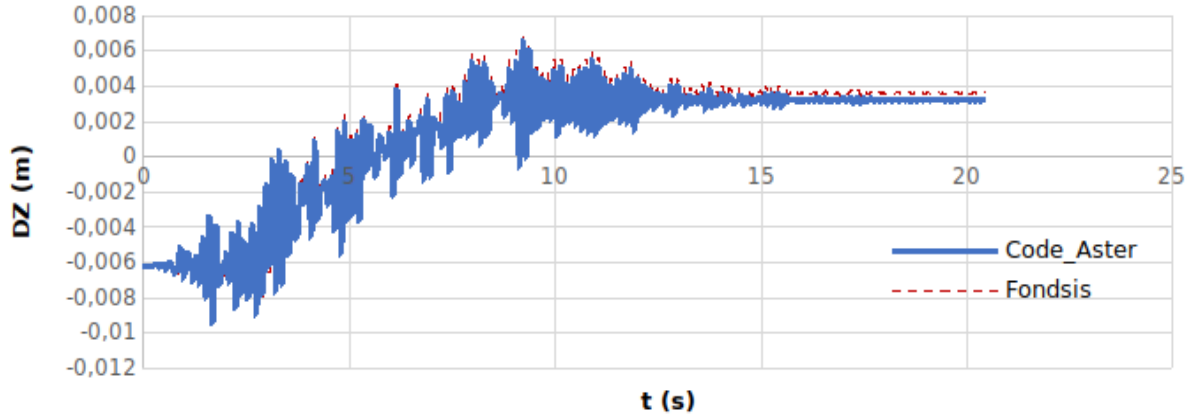


Figure 47 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 3, DZ

- Rotation autour de x (DRX) :

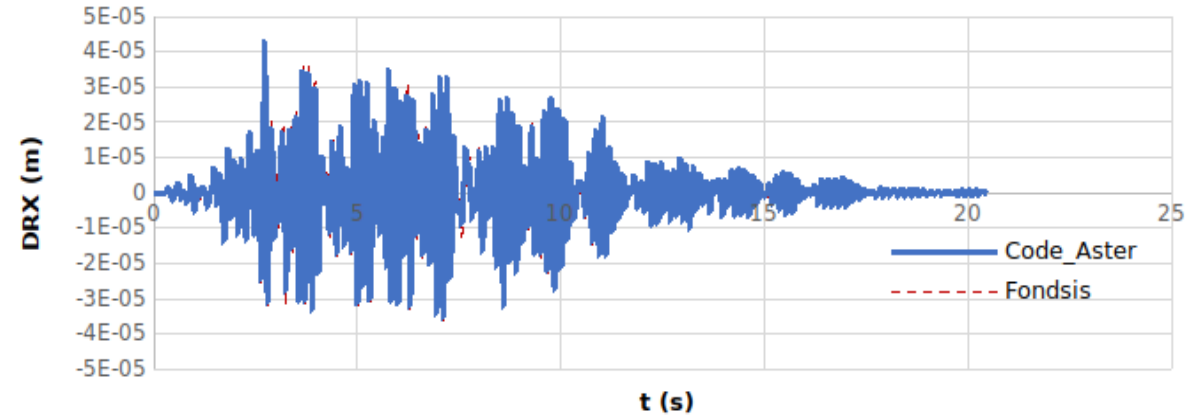


Figure 48 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 3, DRX

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Rotation autour de y (DRY) :

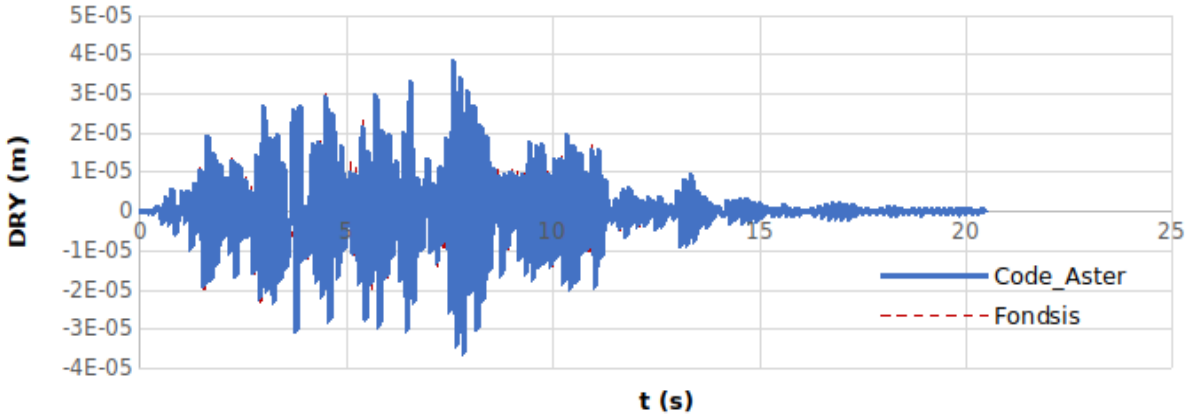


Figure 49 : Comparaison entre *code_aster* et Fondsis, Test 3, DRY.

Les déplacements entre *code_aster* et Fondsis concordent quasi parfaitement, on commence à voir une légère divergence dans le cas du test 3.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

7 Références des cas-tests

7.1 Références

L'ensemble des cas-tests se basent soit sur des résultats expérimentaux soit sur une comparaison avec le logiciel Fondsis dont la liste des références se trouvent ci-dessous :

[ref 1] Y. ABBOUD : « Développement d'un macroélément pour l'étude des fondations superficielles sous charge sismique » Thèse de Doctorat, Paris : Université Paris-Est, 2017.

[ref 2] Rapport Terrasol : « Macroélément pour le calcul des fondations superficielles sous séisme – Calidation expérimentale » - Y. ABBOUD, Terrasol, Juin 2018.

[ref 3] G. GOTTARDI, G. HOULSBY et R. BUTTERFIELD : « Plastic response of circular footings under general planar loading » Géioechnique, 49(4): 453-469, 1999.

[ref 4] E.FACCIOLI, R. PAOLUCCI et M. VANINI : « TRISEE : 3D Site Effects and Soil-Foundation Interaction in Earthquake and Vibration Risk Evaluation » European Comission, 1998.

[ref 5] S.GRANGE : « Modélisation simplifiée 3D de l'interaction sol-structure : application au génie parasismique. » Thèse de doctorat. Grenoble. Institut polytechnique de Grenoble, 2008.

[ref 6] R.NOVA et L. Montrasio : « Settlements of shallow foundation in sand » Géotechnique 41 n°2, 1991.

[ref 7] Manuel Fondsis v1.

[ref 8] S.GRANGE : « Modélisation simplifiée 3D de l'interaction sol-structure : application au génie parasismique » Thèse de Doctorat, Grenoble : Institut polytechnique de Grenoble

7.2 Liste de cas-tests et leur référence associée

Le tableau suivant présente la liste des cas-tests ici étudiés et leur référence associée :

Modélisation	Identification	Type de validation	Numéro de la référence associée
a et b	Essais Gottardi et al.	Validation expérimentale	3
c et d	Essais TRISEE	Validation expérimentale	4
e	Essais Nova et Montrasio	Validation expérimentale	5
f, g et h	Comparaison Fondsis	Validation sur logiciel	6

3 ensembles de cas test se basent sur des résultats expérimentaux de la littérature scientifique (modélisation a, b, c, d et e). Le dernier ensemble de cas-test est une comparaison avec les résultats obtenus avec le logiciel Fondsis (Terrasol) traitant aussi du déplacement sous sollicitations sismiques.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)