



**HAL**  
open science

# Etude de sensibilité sur la réponse d'un bâtiment réacteur enfoncé par rapport à différentes conditions de souplesse de la fondation

A. Frau, F. Wang

► **To cite this version:**

A. Frau, F. Wang. Etude de sensibilité sur la réponse d'un bâtiment réacteur enfoncé par rapport à différentes conditions de souplesse de la fondation. Colloque Nationale AFPS 2015, Nov 2015, Paris, France. cea-02491632

**HAL Id: cea-02491632**

**<https://cea.hal.science/cea-02491632>**

Submitted on 26 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Etude de sensibilité sur la réponse d'un bâtiment réacteur enfoncé par rapport à différentes conditions de souplesse de la fondation

Alberto Frau\* - Fan Wang \*

\* Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique

CEA/DEN/DANS/DM2S/SEMT/EMSI, 91191 Gif-sur-Yvette (France).

alberto.frau@cea.fr

---

**RÉSUMÉ.** Le comportement des structures enfoncées dans la problématique d'Interaction Sol-Structure (ISS) est bien connu dans la littérature. Des études ont mis en évidence l'effet de la dé-amplification de la réponse de la structure et de la modification du mouvement de fondation induite par l'interaction cinématique. En général, dans ce type d'étude, une des hypothèses utilisées est de considérer la fondation infiniment rigide. En France, les bâtiments de réacteur nucléaire présentent des configurations peu enfoncées. De plus, si on considère la taille de ce type de structure, l'utilisation de l'hypothèse d'interface rigide reste assez pertinente. Cependant, sous certaines conditions la rigidité de la fondation et, notamment du radier, peut influencer la réponse du système. Une étude paramétrique a été conduite afin d'étudier la réponse du système sol-structure dans différentes configurations enfoncées et selon plusieurs hypothèses de flexibilité du système de fondation.

**ABSTRACT.** The behaviour of embedded structures is already known in the Soil-Structure Interaction (SSI) field. Several studies have shown the attenuation effect on the system response and the modification of the foundation input motion due to kinematic interaction. In general, one of the most important hypotheses is to consider the system foundation as rigid. In France, nuclear power plants are often founded on shallow configurations. Moreover, regarding the size of this kind of structures, this assumption seems to be appropriate. However, under certain conditions, the stiffness of the foundation (in particular the basemat) could strongly influence the system response. In order to study the response of a soil-structure system for different embedded configurations under several foundation stiffness assumptions, a parametrical study has been carried out.

**MOTS-CLÉS:** Interactions Sol-Structure (ISS), structures enfoncées, étude paramétrique, méthode des éléments finis, bâtiment réacteur, Cast3M.

**KEYWORDS:** Soil-Structure Interaction (SSI), embedded structures, parametrical study, FEM, Reactor Building, Cast3M.

---

## 1. Introduction

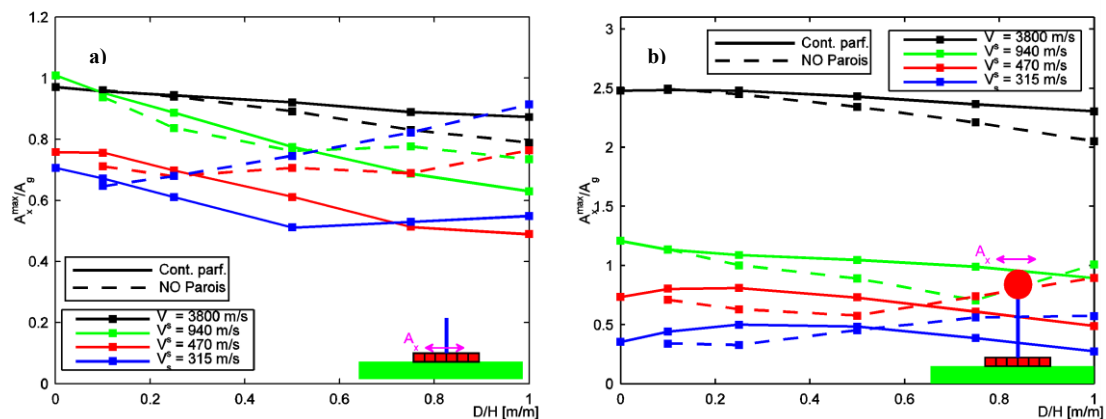
Les installations nucléaires sont conçues et réalisées sur des configurations enfoncées pour différents raisons (faible capacité portante du sol de fondation, sécurité face au risque des impacts des avions). Cependant, en ce qui concerne l'îlot nucléaire, son enfoncement est rarement pris en compte dans la phase de conception même s'il peut apporter un bénéfice considérable en termes de réponse dynamique du système ((Wolf J. P., 1985) et (Tyapin A.G., 1996). Cette tendance a été bien mise en évidence par les travaux de (Takewaki I *et al.*, 2003) et (Mahsuli M. *et al.*, 2009) où la réponse du système sol-structure a été analysée pour plusieurs taux d'enfoncement. Les mêmes conclusions ont été obtenues dans le cadre du Benchmark International KARISMA, organisé par l'AIEA (Suin N. *et al.*, 2013). Même si la communauté scientifique a bien développé ce sujet, très peu d'études ont été orientées vers l'analyse de l'impact de la souplesse du système de fondation combinée avec l'évolution du taux d'enfoncement.

Dans la pratique d'ingénieur, une hypothèse très utilisée est de considérer l'interface sol-structure comme étant infiniment rigide. Pour les bâtiments qui composent l'îlot nucléaire, on considère une cinématique de corps rigide pour le radier et les parois latérales de fondation. Cette affirmation peut se révéler vraie sous certaines conditions, en particulier pour les configurations peu enfoncées. Cependant, il peut exister des conditions dans lesquelles cette hypothèse n'est plus valable. La question que l'on essaye de répondre est d'évaluer l'effet de cette hypothèse dans l'évolution de la réponse du système sol-structure en fonction du taux d'enfoncement. Afin d'atteindre cet objectif une étude paramétrique a été réalisée en utilisant un modèle simplifié d'un bâtiment réacteur.

## 2. Contexte

Pour avoir une première impression de l'effet de l'enfoncement sur une structure dans les calculs ISS, un calcul paramétrique simple en utilisant une structure composée d'un seul DDL (figure 1 – fréquence de la structure  $f_0 = 12 \text{ Hz}$ ) avec une fondation cylindrique infiniment rigide et posée sur un sol homogène (rayon  $R = 50 \text{ m}$ ) peut mettre déjà en évidence les éléments suivants : une variation sensible de la fréquence propre du système couplé sol-structure, une atténuation de la réponse due à l'effet de la déconvolution du signal en profondeur et, sous certaines conditions, une amplification du mouvement de rocking due à l'interaction cinématique.

Dans la figure ci-dessous, on compare l'évolution de la réponse de la structure en fonction du taux d'enfoncement pour deux conditions cinématiques de l'interface (contact parfait et sans contact). On remarque que dans une configuration très simplifiée, les hypothèses sur la cinématique de l'interface sol-structure peut influencer l'évolution de la réponse d'un système sol-structure en fonction du taux d'enfoncement. Dans le cas spécifique, on observe que les tendances des évolutions du ratio  $A_x^{max}/A_g$  ne restent pas monotone selon la cinématique de l'interface. En conséquence, on propose une étude plus exhaustive sur une structure simplifiée (mais suffisamment représentative d'une structure réelle) d'un bâtiment réacteur en prenant en compte des conditions de contact différentes sur l'interface sol-structure.



**Figure 1.** Evolution des accélérations maximales du radier (a) et du sommet (b) de la structure en fonction du taux d'enfoncement pour un oscillateur 1-DDL ( $f_0 = 12 \text{ Hz}$ ) posé sur un sol homogène.

### 3. Model Sol-Structure

#### 3.1. Configuration Générale

Un modèle simplifié a été utilisé dans cette étude. La géométrie a été définie (figure 2) pour pouvoir représenter, d'une façon approximative, les caractéristiques dynamiques d'un bâtiment réacteur. Sa forme est régulière avec une double symétrie par rapport aux plans x-z et y-z. A titre d'exemple, on montre dans la figure 2 une comparaison avec le Réacteur N°7 de la centrale Kashiwazaki-Kariwa qui a fait l'objet d'étude dans le benchmark KARISMA.

La structure est directement enfoncée dans un sol multicouche. Afin de rendre le calcul plus simple face au nombre des paramètres de l'étude, on néglige la présence d'un éventuel remblai. Le sol est caractérisé par la vitesse  $V_{s,30}$  (vitesse moyenne d'onde S dans les premiers 30 m de sol). A titre informatif, la structure et le sol sont supposés d'avoir des comportements viscoélastiques.

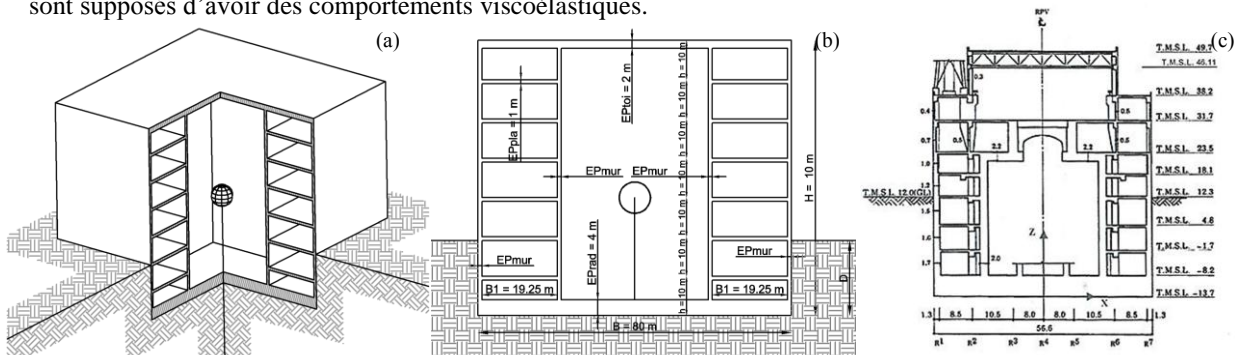


Figure 2. Géométrie du bâtiment réacteur – (a) Vue générale du modèle ; (b) Coupe du modèle ; (c) Coupe de l'unité 7 de la centrale Kashiwazaki-Kariwa.

#### 3.2. Description du modèle simplifié du bâtiment réacteur (BR)

Les dimensions principales de la structure sont présentées dans la figure 2a. L'épaisseur du radier et du toit sont respectivement de 4 m et 2 m. L'épaisseur des voiles extérieurs et de l'enceinte de confinement est un des paramètres de notre étude. Afin de tenir en compte la présence des équipements (réacteur, générateur vapeurs etc.) une structure interne a été connectée au centre du radier. Une masse de 30000 t a été placée au sommet de la structure. La rigidité en flexion de la structure interne a été déduite de façon à obtenir une fréquence à base encastrée représentatif du comportement des équipements généralement présents dans les bâtiments réacteurs. L'enceinte de confinement sépare la structure en deux parties : une partie intérieure et une autre extérieure. Dans la partie extérieure, le volume est décomposé, dans la direction verticale, par la présence de 6 planchers de 1 m d'épaisseur (figure 2c).

#### 3.3. Matériaux

Les propriétés mécaniques viscoélastiques de la structure sont présentées dans le tableau 1. Elles ont été choisies selon les prescriptions de la guide ASN/2/01 pour les éléments en béton armé.

Module d'Young $E$	30000 MPa	Taux d'amortissement $\xi$	0.02
Coef. de Poisson $\nu$	0.2	Masse volumique $\rho$	2500 kg/m <sup>3</sup>

Tableau 1. Propriétés mécaniques de la structure.

En ce qui concerne le sol, trois profils ont été choisis pour l'étude paramétrique. Les stratigraphies sont montrées dans le tableau 2.

Couche	$V_s$ [m/s] Prof 1 $V_{s,30} = 300$ m/s	$V_s$ [m/s] Prof 2 $V_{s,30} = 550$ m/s	$V_s$ [m/s] Prof 3 $V_{s,30} = 800$ m/s	$\nu$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\xi$	Epaisseur [m]	
1	200,00	450,00	700,00	0.3	1600	0.02	5	LAYER 1
2	246,90	491,65	740,17	0.3	1600	0.02	5	LAYER 2
3	293,80	533,30	780,34	0.3	1600	0.02	5	LAYER 3
4	340,70	574,95	820,51	0.3	1600	0.02	5	LAYER 4
5	434,50	658,25	900,85	0.3	1600	0.02	10	LAYER 5
6	528,30	741,55	981,18	0.4	1800	0.02	10	LAYER 6
7	622,10	824,85	1061,52	0.4	1800	0.02	10	LAYER 7
8	762,80	949,80	1182,03	0.4	1800	0.02	15	LAYER 8
9	950,00	1100,00	1200,00	0.4	1800	0.02	15	LAYER 9
10	978,14	1124,99	1224,10	0.4	1800	0.02	15	LAYER 10
11	1006,28	1149,98	1248,20	0.45	2000	0.02	15	LAYER 11
12	1043,80	1183,30	1280,34	0.45	2000	0.02	20	LAYER 12
13	1081,32	1216,62	1312,47	0.45	2000	0.02	20	LAYER 13
14	1350,00	1350,00	1350,00	0.45	2000	0.02	-	LAYER 14

Tableau 2. Stratigraphies du sol utilisées pour l'étude paramétrique.

### 3.4. Model FEM du système sol-structure

Grâce à la double symétrie, seulement un quart du système est modélisé comme présenté dans la figure 3. Afin de rétablir la cinématique du système, deux conditions sont imposées dans les plans de symétrie : dans le plan x-z on considère la condition de mouvement symétrique et dans le plan y-z, la condition d'antisymétrie est imposée.

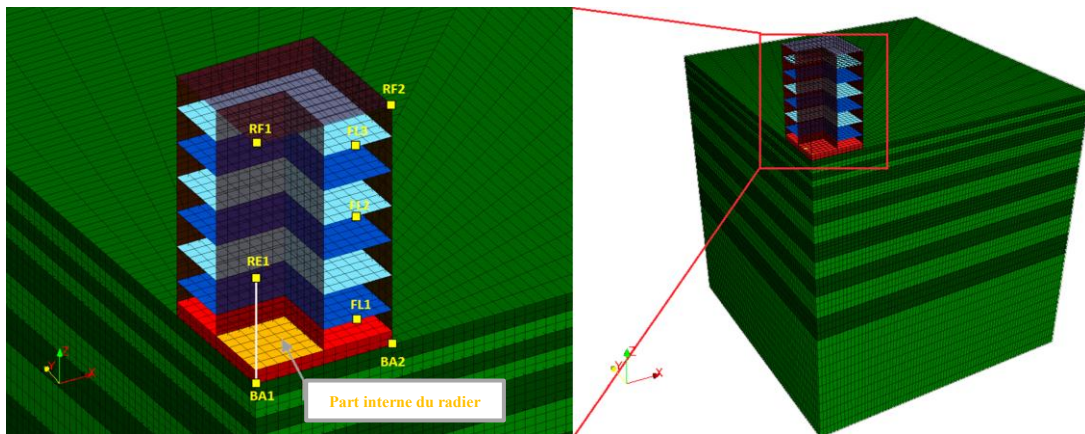


Figure 3. Modèle FEM et point de mesure du système sol-structure.

En ce qui concerne la discrétisation de la structure, le radier est modélisé par des éléments volumiques (éléments cubiques à 8-nœuds, iso-paramétriques). Pour la structure interne, on utilise des éléments poutre de type Euler-Bernoulli. Les autres parties (voiles, toit et planchers) sont discrétisées en éléments de type coque (4-nœuds, iso-paramétrique).

Concernant la modélisation du sol, deux considérations doivent être faites : la discrétisation est faite à l'aide des éléments de volume (8-nœuds iso-paramétrique) et pour l'interface sol-structure, on ne considère ni décollement, ni glissement entre le sol et la structure. La taille maximale des éléments a été fixée selon la longueur d'onde minimale ( $V_s/(5 \cdot f_{max})$ ) où  $f_{max} = 30$  Hz). A la frontière du sol (4 fois la taille caractéristique du radier), on a introduit une frontière absorbante de type Lysmer.

Enfin, un modèle d'amortissement de type Rayleigh a été calibré pour les fréquences  $f_1 = 4$  Hz et  $f_2 = 12$  Hz. On précise que l'amortissement du sol est fixé à 2%.

### 3.5. Chargement sismique

On impose un mouvement sismique au niveau de la surface libre du sol représenté par un signal synthétique (figure 3). Il a été généré à partir du spectre de dimensionnement pour le site de Cadarache (SMS Proche  $\xi = 5\%$ ) pour le sol alluvial (type C –  $V_{s,30} \in [300; 800$  m/s]). Afin de reproduire l'onde incidente au champ lointain, une déconvolution numérique du signal (à l'aide de la procédure DECONV3D développée dans Cast3M) a été effectuée pour calculer un champ de force équivalent sur la frontière.

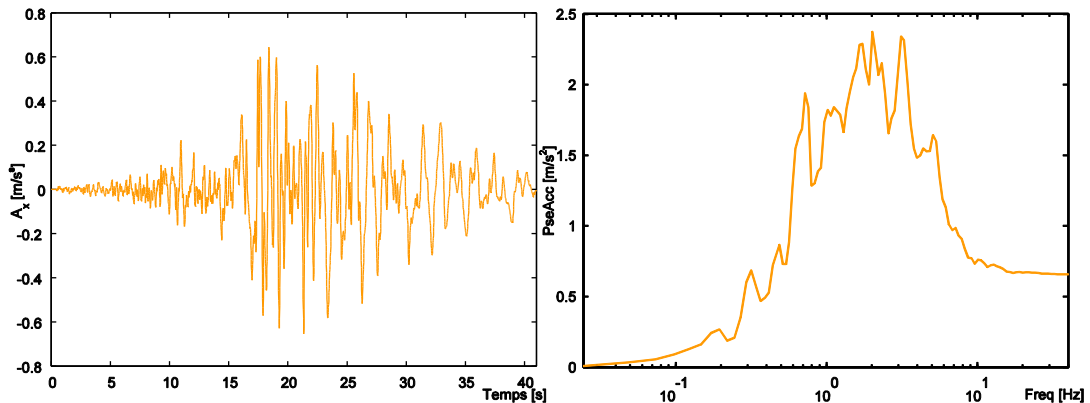


Figure 4. Signal synthétique imposé au champ libre.

### 3.6. Propriétés modales

Une analyse modale a été effectuée afin de déterminer les fréquences propres de la structure. Pour cette étude, le radier est considéré rigide. On a tenu en compte plusieurs épaisseurs des voiles latérales et de l'enceinte interne (figure 5).

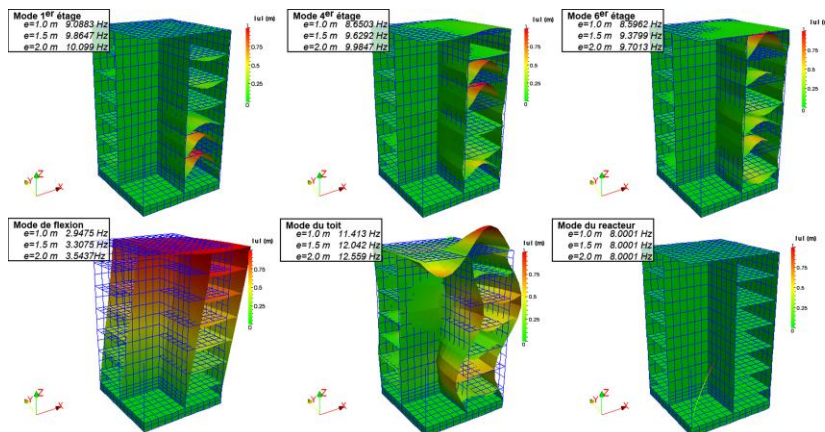


Figure 5. Fréquences propres de la structure à base encastree.

#### 4. Choix des paramètres

L'étude est conduite pour analyser l'effet de l'enfoncement sur la réponse du système sol-structure en fonction de différentes hypothèses de souplesse sur le système de fondation. Trois paramètres ont été pris en compte :

- Taux d'enfoncement  $D/H \in [0.00 \ 0.14 \ 0.29 \ 0.50 \ 0.79 \ 1.00]$  ;
- Epaisseur adimensionnelle des voiles  $e/h \in [0.10 \ 0.15 \ 0.20]$  ;
- Hypothèses de souplesse du système de fondation:
  - Interface complètement rigide (T.R.I.) : l'interface est considéré complètement rigide ;
  - Radier complètement rigide (T.R.B.) : seulement le radier est considéré rigide;
  - Radier simplement rigide (S.F.B.) : dans la partie interne de l'enceinte la présence des supports non structuraux, pour assurer un appui pour les équipements, peut contribuer largement à la rigidité de la partie interne du radier. En conséquence, on considère que cette partie reste rigide ;
  - Radier complètement souple (T.F.B.) : l'interface sol-structure est complètement souple.

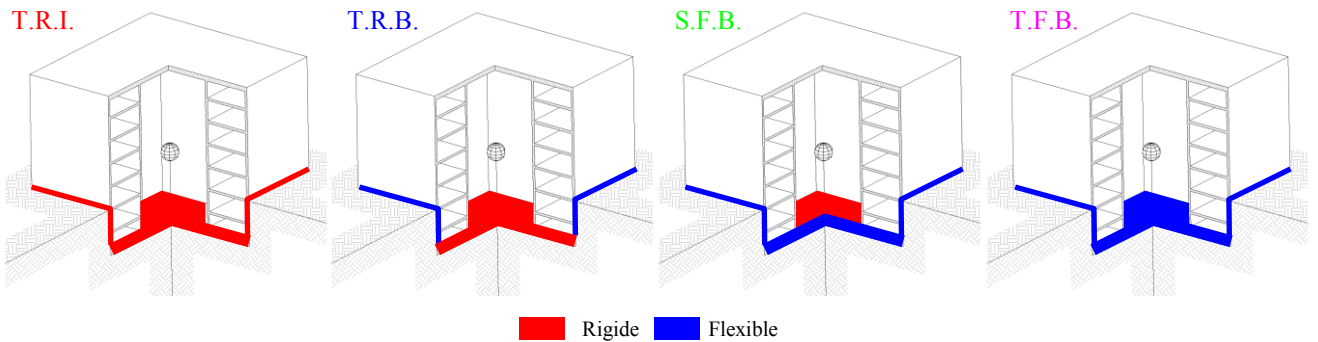


Figure 6. Différentes hypothèses de souplesse du système de fondation.

#### 5. Résultats numériques

##### 5.1. Fréquences propres du système sol-structure

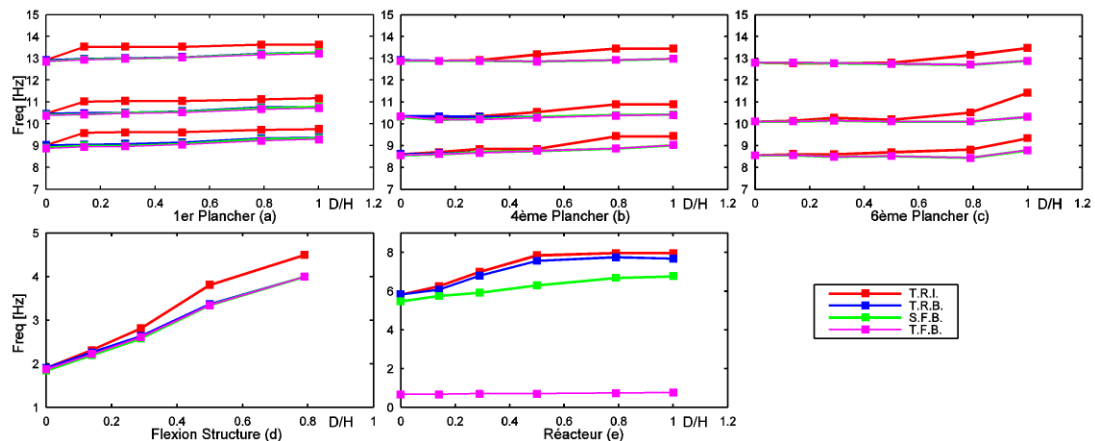


Figure 7. Fréquences de résonance du system sol-structure,  $e/h = 0.1$ .

Les fréquences de résonance du système sol-structure ont été identifiées à partir des fonctions de transfert (FdTs) déduites numériquement. Pour cela, un calcul transitoire a été fait en imposant une vibration forcée représentée par un double Dirac (fréquence de coupure 30 Hz). Le chargement a été imposé successivement aux points RF1, FL1, FL2 et FL3 (figure3) pour les directions horizontale et verticale.

En regardant la figure 7d et 7e, on remarque que l'enfoncement influence l'évolution de la fréquence du mode en flexion de la structure et du réacteur. En revanche, pour les fréquences des planchers, il est presque négligeable (figures 7a, 7b et 7c). Les hypothèses sur la flexibilité de l'interface sol-structure jouent un rôle important (figures 7a, 7b, 7c, 7d et 7e). En revanche, les autres conditions influencent peu le comportement du système.

Dans la figure 8, on trace les évolutions des fréquences de résonance en fonction du taux  $D/H$  pour différentes épaisseurs adimensionnelles. L'impact le plus fort est observé sur la réponse verticale des planchers (figures 8a, 8b et 8c) avec des différences sur les fréquences qui peuvent atteindre 20% ( $[f_{max} - f_{min}]/f_{max}$ ). Cependant, les premiers modes de la structure en flexion et de la structure interne ne sont pas affectés.

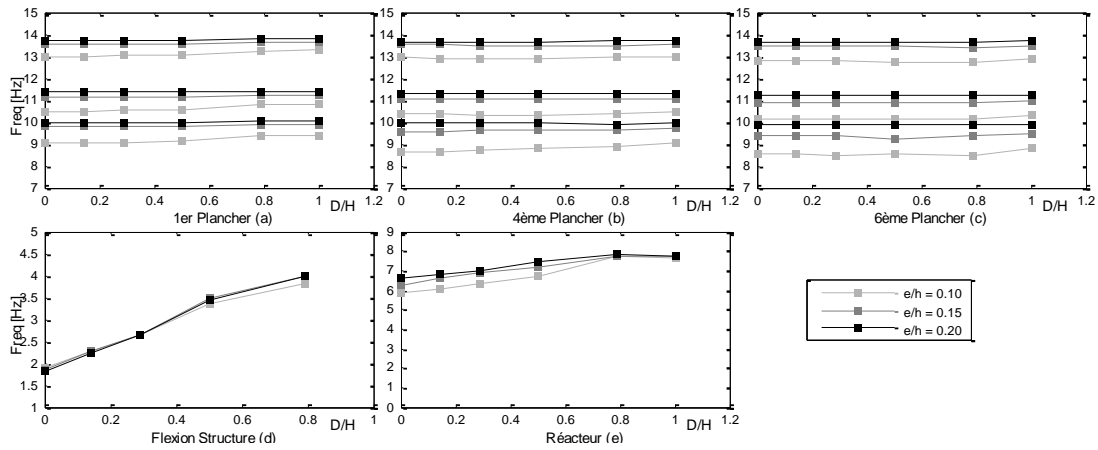


Figure 8. Fréquences de résonance du system sol-structure, T.R.B.

5.2. Evolution de la ZPA (Zero Period Acceleration)

Pour chaque configuration, on calcule l'accélération maximale de chaque point de mesure (ZPA – Zero Period Acceleration) en la normalisant par rapport à l'accélération maximale du signal (PGA – Peak Ground Acceleration). Dans la figure 9, on montre les évolutions du ratio  $ZPA/PGA$  en fonction du taux d'enfoncement pour les points BA2 et RF2 (figure 3). Chaque couleur correspond à une hypothèse sur la flexibilité de l'interface sol-structure. Les bandes colorées représentent la variation de la ZPA par rapport à l'épaisseur adimensionnelle des voiles.

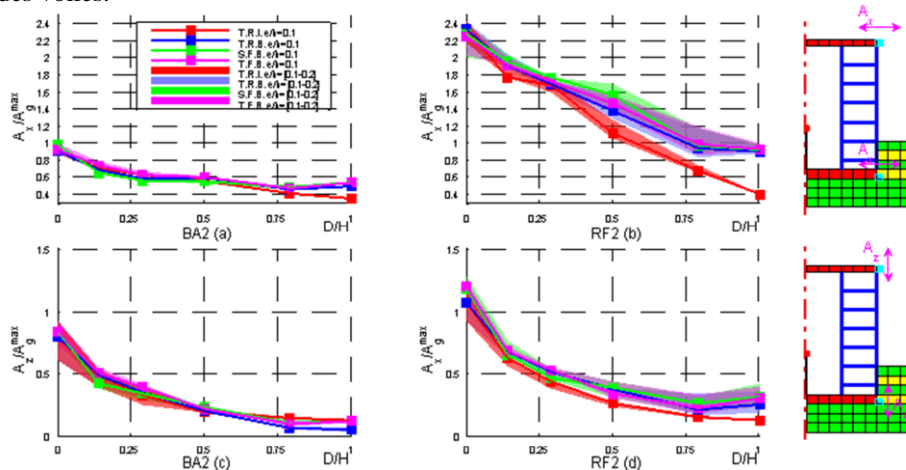
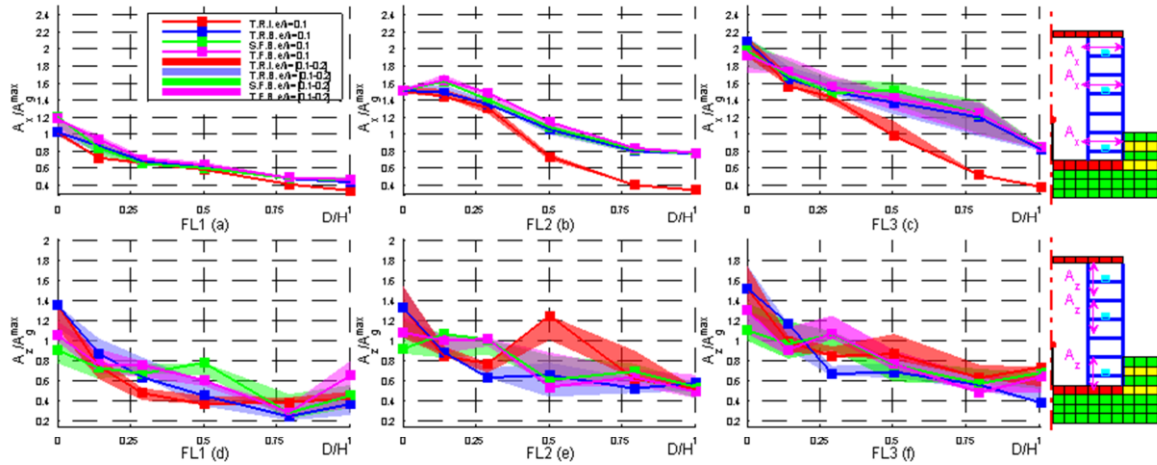


Figure 9. Evolution ZPA en fonction du taux d'enfoncement  $D/H$  pour les points BA2 et RF2 en direction verticale et horizontale,  $V_{s,30} = 550 \text{ m/s}$ .



Dans la figure 9, on peut facilement observer l'effet d'atténuation sur la réponse du système par la déconvolution du signal en profondeur (figure 9a et 9b). Par rapport aux hypothèses de flexibilité de la fondation, on observe que la réponse du radier est très peu influencée. En revanche, la réponse du sommet (figure 9b) de la structure est plus affectée par la souplesse des parois latérales.

En regardant la réponse horizontale du toit (figures 9b), on observe une différence ( $[\max(ZPA) - \min(ZPA)] / \max(ZPA)$ ), entre les conditions T.R.I et T.R.B, de l'ordre de 19% ( $e/h = 0.2$ ) et 17% ( $e/h = 0.1$ ) pour des taux  $D/H \in [0; 0.5]$ . De plus, pour des configurations très enfoncées, on observe des différences de l'ordre de 54% ( $e/h = 0.2$ ) et 58% ( $e/h = 0.1$ ). En regardant la direction verticale, les réponses du système sont moins influencés par les contions de souplesse de l'interface sol-structure. Par ailleurs, on observe que pour des configurations très enfoncées la variabilité des résultats tend à disparaître (figures 9c et 9d).



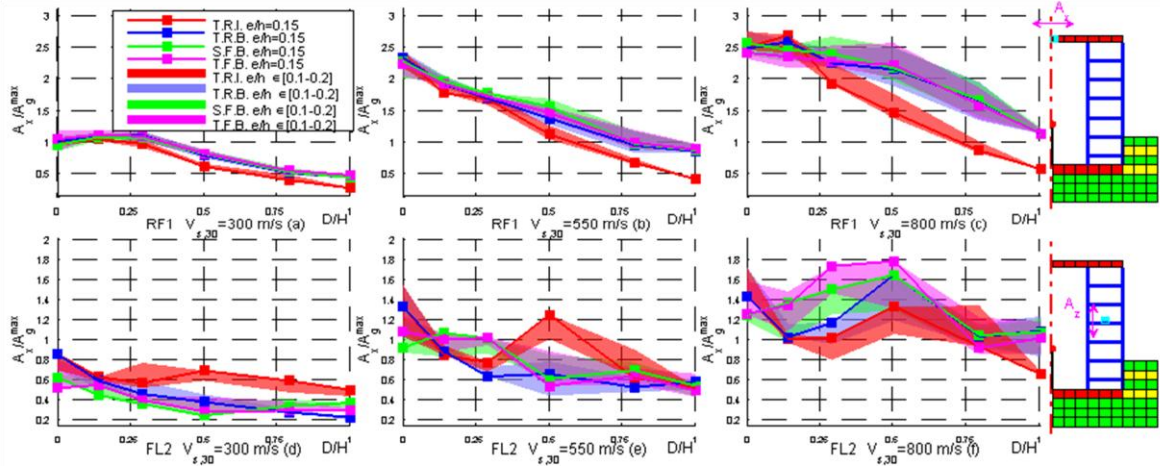
**Figure 10.** Evolution ZPA en fonction du taux d'enfoncement  $D/H$  pour les points FL1, FL2 et FL3 en direction verticale et horizontale,  $V_{s,30} = 550 \text{ m/s}$ .

Dans la figure 10, on présente l'évolution de la ZPA en fonction du taux  $D/H$  pour les points FL1, FL2 et FL3 (figure 3) dans la direction horizontale. Les tendances observées sont très similaires par rapport aux résultats présentés dans la figure 9. Pour le plancher FL1, sa réponse est proche à celle du radier et pour le plancher FL3, la même similitude peut être faite avec la réponse du toit. En conséquence, les observations faites avant restent valable.

Cependant, pour la direction vertical (figure 10d, 10e et 10f), les évolutions des courbes ZPA en fonction du ratio  $D/H$  ont des tendances différentes par rapport aux hypothèses sur la cinématique de l'interface. En effet, plusieurs facteurs influencent la réponse verticale des planchers : les interactions inertielle et cinématique, les conditions cinématiques imposées par les voiles qui entourent le plancher. En décomposant par plage les taux d'enfoncement, on observe que les conditions T.R.I. et T.R.B semblent être plus conservatives pour des configurations peu enfoncées ( $D/H \in [0; 0.1]$ ). Pour des ratios  $D/H$  plus importants ( $> 0.5$ ), la condition T.R.I. donne la réponse maximale du système (figures 9e et 9f). En revanche, pour les configurations intermédiaires ( $D/H \in [0.1; 0.35]$ ), les conditions S.F.B et T.F.B. conduisent à des amplitudes de réponses les plus élevées. Par rapport à la condition T.R.B, on obtient des écarts de l'ordre de 25% – 29% ( $e/h = 0.1$ ) et 29% – 39% ( $e/h = 0.2$ ). Une autre observation concerne la tendance des évolutions de l'accélération maximale : si pour la réponse horizontale la tendance est monotone décroissant, pour la réponse verticale, l'allure ne reste plus monotone (figure 10e et 10f).

### 5.3. Influence de la stratigraphie du sol

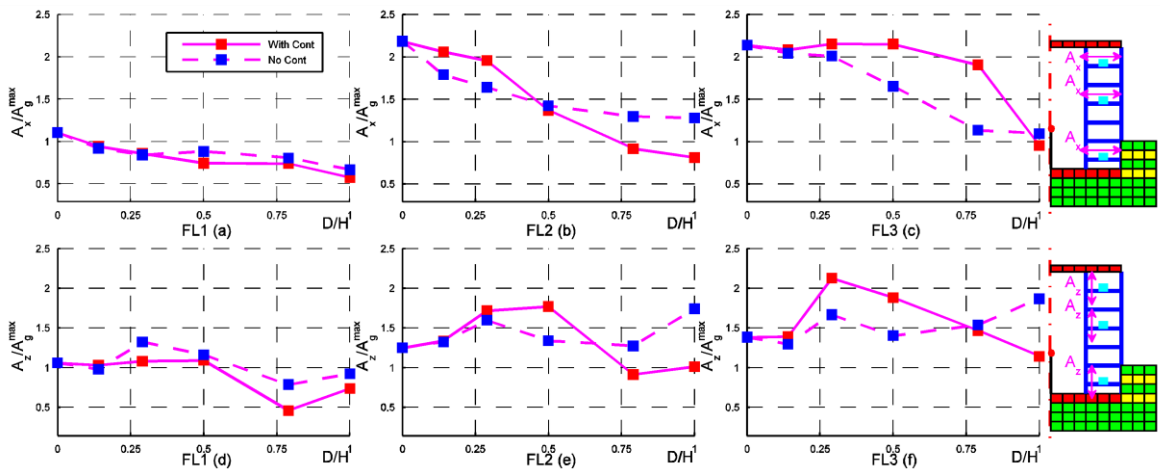
Dans ce chapitre, on essaie de comprendre si les tendances montrées dans le paragraphe précédent restent valable selon les différentes stratigraphies du sol. Nous avons répété les calculs en utilisant les deux autres stratigraphies  $V_{s,30} = 300 \text{ m/s}$  et  $V_{s,30} = 800 \text{ m/s}$  (tableau 2).



**Figure 11.** Evolution ZPA en fonction du taux d'enfoncement  $D/H$  pour les points RF1 (direction horizontale) et PL2 (direction verticale),  $V_{s,30} \in [300 \text{ 550 800 m/s}]$ .

En regardant la réponse horizontale du point RF1, la différence entre le cas T.R.I. et les autres configurations augmente si la  $V_{s,30}$  devient plus grande (figures 11a, 11b et 11c). L'augmentation de la rigidité du sol réduit le contraste avec la structure et l'influence des rigidités des parois latérales devient plus importante. On peut voir que la différence d'atténuation (entre T.R.I. et T.R.B.) est déjà de l'ordre de 30% ( $e/h = 0.1$ ) et 31% ( $e/h = 0.2$ ) pour un taux  $D/H = 0.5$ . Pour la réponse verticale des planchers, on observe que la condition T.R.I. semble être la plus conservatrice pour des taux d'enfoncement plus importants. En revanche, pour un sol dur, la prise en compte de la souplesse du radier influence fortement la réponse du système et les observations faites pour la stratigraphie  $V_{s,30} = 550 \text{ m/s}$  s'amplifient pour la stratigraphie  $V_{s,30} = 800 \text{ m/s}$ . La tendance non-monotone est encore plus accentuée (figure 11f).

### 5.4. Influence du contact sol-structure



**Figure 12.** Evolution ZPA en fonction du taux d'enfoncement  $D/H$  pour les points FL1, FL2 et FL3 en direction verticale et horizontale,  $V_{s,30} = 800 \text{ m/s}$ , T.F.B.

Dans la figure 12, on compare les réponses des planchers FL1, FL2 et FL3 pour la condition T.F.B avec et sans contact entre le sol et les parois latérales. L'objectif est de regarder si l'éventuel décollement de l'interface peut affecter les tendances présentées dans le paragraphe précédent. On observe que les observations faites restent valables. En revanche, avec l'hypothèse de contact parfait sol-structure, on a tendance à surestimer les accélérations maximales pour des taux  $D/H$  faibles. Pour des taux plus élevés, on observe une sous-estimation (figure 12e et 12f).

## 6. Conclusion et perspectives

Une étude paramétrique a été effectuée et les résultats ont été discutés et exposés dans ce papier. L'objectif a été de quantifier les effets des hypothèses de la souplesse du système de fondation sur la réponse linéaire d'un bâtiment réacteur enfoncé dans le sol avec la prise en compte des phénomènes ISS. On a pu conclure que la prise en compte de la flexibilité des parois latérales semble nécessaire pour des taux d'enfoncement relativement élevés ( $D/H > 0.4$  or  $0.5$ ), en particulier pour des sols durs. De plus, en ce qui concerne le comportement vertical des planchers, une bonne représentation de la flexibilité du radier semble être nécessaire, en particulier pour les configurations moyennement enfoncées  $D/H \in [0.1 \text{ } 0.35]$  sur des sols durs. En revanche, pour des sols mous la condition d'interface rigide peut donner des résultats qui seront en faveur de sécurité. Afin de généraliser ces résultats, l'étude sera étendue pour prendre en compte des phénomènes non linéaires comme le décollement de l'interface sol-structure au niveau des parois latérales.

## 7. Remerciements

Cette étude a été conduite dans le cadre du projet SINAPS@, financé par l'ANR via le Programme Investissements d'Avenir (PIA) (SINAPS@ Grant No. ANR-11-RSNR-0022).

## 8. Bibliographie

Wolf J. P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J, 1985.

Tyapin A.G., "The influence of the embedment depth on the seismic response of heavy rigid structure" Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd, paper n°36, 1996.

Takewaki I, Takeda N., Utetani K., "Fast practical evaluation of soil-structure interaction of embedded structure" Soil dynamics and earthquake engineering 23, pp 195-202, 2003.

Mahsuli M., Ghannad A. A. "The effect of foundation embedment on inelastic response of structure". Earthquake engineering and structural dynamics 38, pp 423-437, 2009.

Suin N., Humbert N., Viallet E., "Using the positive effect of embedment in the seismic design of nuclear power plant" SMiRT-22, IASMiRT, San Francisco, 2013.