

ANALYSE DU DEPLACEMENT HORIZONTAL DU SOL SOUS SOLLICITATIONS SISMIQUES

ANALYSE OF THE HORIZONTAL DEFORMATION OF SOIL ON SEISMIC RESPONSE

Jefferson CUELLAR TORRES¹, Léo QUIRIN²

¹ Keller Fondations Spéciales, Duttlenheim, France

² Keller Fondations Spéciales, Duttlenheim, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de l'analyse du comportement dynamique du sol, cette étude a été menée pour caractériser le déplacement horizontal du sol sous sollicitations sismique. La méthode des éléments finis sur le logiciel PLAXIS 2D 2016 a été utilisée pour les applications. Des modèles de comportement non-linéaires et viscoélastiques ont permis de caractériser le profil de déformation d'un sol multicouche sous séisme et de valider ces résultats avec les solutions théoriques trouvées dans la littérature.

ABSTRACT – In the context of ground response analysis, this study was made to characterize soil's horizontal deformation on seismic response. The finite element method employed by the software PLAXIS 2D 2016 was used for the applications. Non-linear and visco-elastic models allowed to characterize the deformation profile of a multilayer soil on seismic response and to validate these results with the theoretical solutions found in the literature.

1. Introduction

La dynamique de sols a pour but d'étudier les propriétés et le comportement du sol sous sollicitations dynamiques. C'est le cas d'une sollicitation sismique imposée à un massif de sol, un barrage ou un bâtiment sur fondations superficielles ou profondes.

Sous séisme le déplacement horizontal du sol sollicite également les ouvrages enterrés comme les fondations profondes de type pieux ou les inclusions rigides. Les forces cinématiques résultent de la déformation du sol sollicité par les ondes sismiques. Au même temps, les pieux transmettent au sol les actions inertielles de la structure sollicitée par le séisme. L'interaction cinématique pieux/sol est donc le résultat de la manière dont se fait le transfert des efforts cinématiques et inertIELS entre les pieux et le sol.

La déformation du sol sous séisme peut être calculée théoriquement pour des cas simples (sol homogène monocouche ou bicouche), en considérant le sol comme un milieu élastique. Cependant, en pratique, les terrains de fondations sont composés par des sols multicouches et l'évaluation de la déformée du sol devient complexe.

Ainsi, la méthode des éléments finis est utilisée afin d'analyser le comportement des sols multicouches sous sollicitation sismique. Pour ce faire, le logiciel PLAXIS 2D 2016 (Brinkgreve et al., 2016) a été utilisé pour les différents modèles présentés ci-dessous.

Dans les modèles numériques développés pour l'évaluation de la déformée du sol, celui-ci est caractérisé par un modèle de comportement viscoélastique. Ce modèle permet de réduire le temps de calcul et d'obtenir des résultats stables dans le domaine temporel et fréquentiel. Cependant, il faut tenir compte qu'à l'échelle des sollicitations dynamiques, les sols sont soumis aux déformations inférieures à 1.10^{-4} . Pourtant, le comportement du sol ne peut être considéré élastique que pour des déformations inférieures à 1.10^{-6} (Atkinson & Sallfors, 1991).

Ainsi, il faut d'abord passer par un modèle unidimensionnel non-linéaire afin de bien calibrer les paramètres du modèle viscoélastique en fonction du séisme, de la raideur et de l'amortissement mobilisés par le sol.

2. Modèle unidimensionnel non-linéaire

Le modèle unidimensionnel non-linéaire permet de connaître la réponse sismique en champ libre d'un terrain. La prise en compte de la non-linéarité est possible à travers d'un modèle type HS-Small « *Hardening Soil Small* » (Benz, 2007).

Le modèle HS-Small tient compte de la raideur du sol sous très petites déformations. En effet, le modèle permet de décrire l'évolution du module de cisaillement sécant en fonction de la déformation. Le module de cisaillement sera maximal pour des déformations inférieures à la limite élastique, pour ensuite réduire sa valeur de façon importante (cf. Figure 1) (Hejazi, 2010).

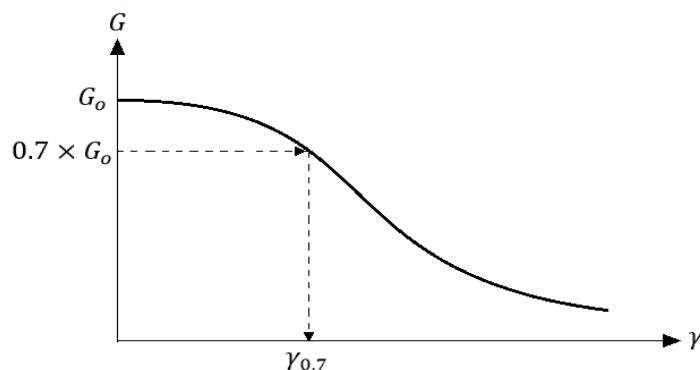


Figure 1 : Comportement non-linéaire du sol en fonction de la déformation (Benz, 2007).

2.1. Définition du sol

Le profil de sol analysé est composé par des argiles cohésives sur 30 mètres de profondeur posées sur un substratum rocheux. Trois profils de sols différents dénommés S-1, S-2 et S-3 sont utilisés afin d'analyser les cas des sols monocouche, bicouche et multicouche respectivement. Les propriétés mécaniques du terrain sont cohérentes avec des sols de classe C et D tel qu'ils sont définis par l' Eurocode 8 NF EN 1998-1 (AFNOR, 2005).

Afin de tenir compte des variations de l'amortissement et la raideur du sol avec la déformation, le modèle de comportement des sols HS-Small est utilisé. Les paramètres de chaque modèle sont présentés dans le tableau ci-dessous. (cf. Figure 1).

Tableau 1 : Paramètres des sols. Modèle unidimensionnel non-linéaire.

Modèle	N° Couche [-]	Cote sup. [m]	Cote Inf. [m]	γ_{ns} [kN/m ³]	m (power)	G_0^{ref} [MPa]	p^{ref} [MPa]
S-1	1	30.0	0.0	19	0.9	198	228
S-2	1	30.0	13.0	17	0.9	95	95
	2	13.0	0.0	19	0.9	198	228
S-3	1	30.0	21.0	17	0.9	94	79
	2	21.0	9.0	19	0.9	195	176
	3	9.0	0.0	19	0.6	553	267

Les couches de sol argileux n°1 et 2 sont considérées comme non-drainées (type A) et la couche de sol rocheux n°3 est considérée comme drainée. Dans tous le cas, le paramètre $\gamma_{0.7}$ vaut 1.0×10^{-4} . Ce paramètre est la déformation pour laquelle le module de cisaillement

est réduit à 70% de sa valeur maximale. Dans le tableau précédent G_0^{ref} c'est la raideur de cisaillement maximale (pour $\gamma = 1.0 \times 10^{-6}$) et γ_{ns} c'est le poids volumique non-saturé du sol.

2.2. Géométrie du modèle et maillage

Le modèle unidimensionnel est représenté sur PLAXIS 2016 (Brinkgreve & Kumarswamy, 2016) par une colonne de sol de 30.0 m de profondeur et 1.0 m de largeur.

Les éléments finis sont de type « 6-noded » dans un modèle bidimensionnel plan (*plane strain*). La distance entre les nœuds des éléments finis l_{neud} est inférieure à 1.0 m dans tous les cas. Cette valeur assure que la distance entre 8 nœuds est inférieure à l'amplitude d'onde du signal sismique (Floroiu, 2016).

Pendant la phase de calcul dynamique les conditions aux limites sont de type « *Tied degrees of freedom* » qui relie les nœuds pour avoir les mêmes déplacements le long des limites latérales. Dans la limite inférieure les ondes dynamiques sont absorbées grâce à une condition « *Compliant base* ».

2.3. Signal dynamique

L'accélérogramme utilisé pour l'analyse unidimensionnel a été choisi de la base d'accélérogrammes proposée par le groupe de travail RAP (Réseau Accélérométrique Permanent). Ces accélérogrammes sont compatibles avec les spectres de calculs donnés par l'Eurocode 8 (RAP, 2013).

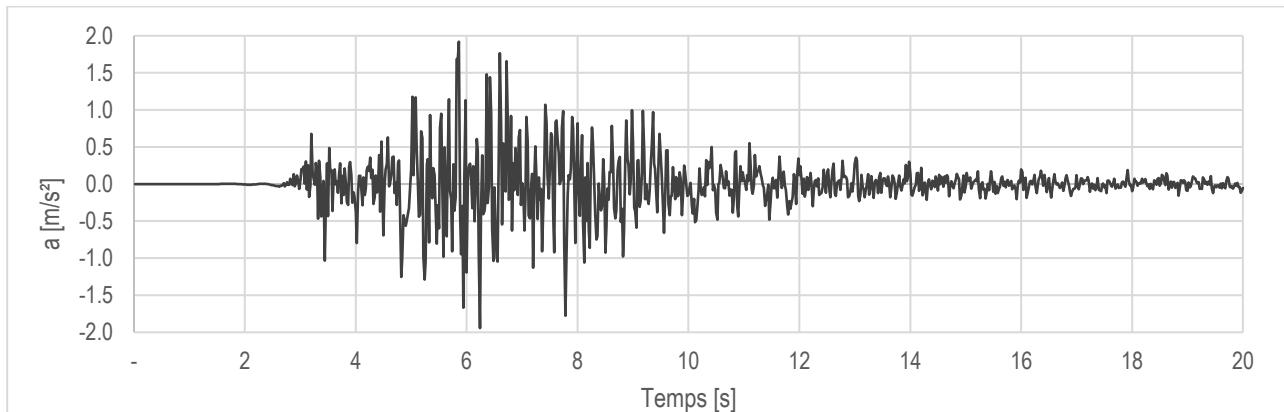


Figure 2 : Accélérogramme stochastique, classe de sol A - PGA = 1,92 m/s² (RAP, 2013).

L'accélérogramme de la Figure 2 est compatible avec une zone de sismicité 4, un sol de catégorie A (celle du substratum) et une catégorie d'importance bâtiment III conformément à l'Eurocode 8 (AFNOR, 2005).

2.4. Résultats

Notamment, la variation de la déformation de cisaillement γ_{xy} avec la profondeur et l'accélération pic en surface a_{surf} sont analysées.

La Figure 3 présente les résultats de γ_{xy} pour les 3 modèles S-1, S-2 et S-3. Les valeurs de γ_{xy} sont analysées quand la déformation en surface est maximale, ce qui correspond à un temps de 6.8 s pour les trois modèles (pic d'accélération du signal d'entrée).

Il est possible de voir que pour les modèles S-2 et S-3, l'ordre de grandeur de γ_{xy} change en fonction des propriétés de chaque couche de sol. Ce comportement est dû aux différences de raideur des couches de sol. Ainsi, pour chaque couche, il est possible d'obtenir une valeur moyenne de la déformation de cisaillement $\bar{\gamma}_N$.

De même, la déformation de cisaillement effective $\bar{\gamma}_{e,N}$ est calculée comme le 65% de la valeur de $\bar{\gamma}_N$ de chaque couche de sol (Gingery, 2007).

Les valeurs de $\bar{\gamma}_{e,N}$ seront utilisées pour la correcte définition des paramètres du modèle viscoélastique.

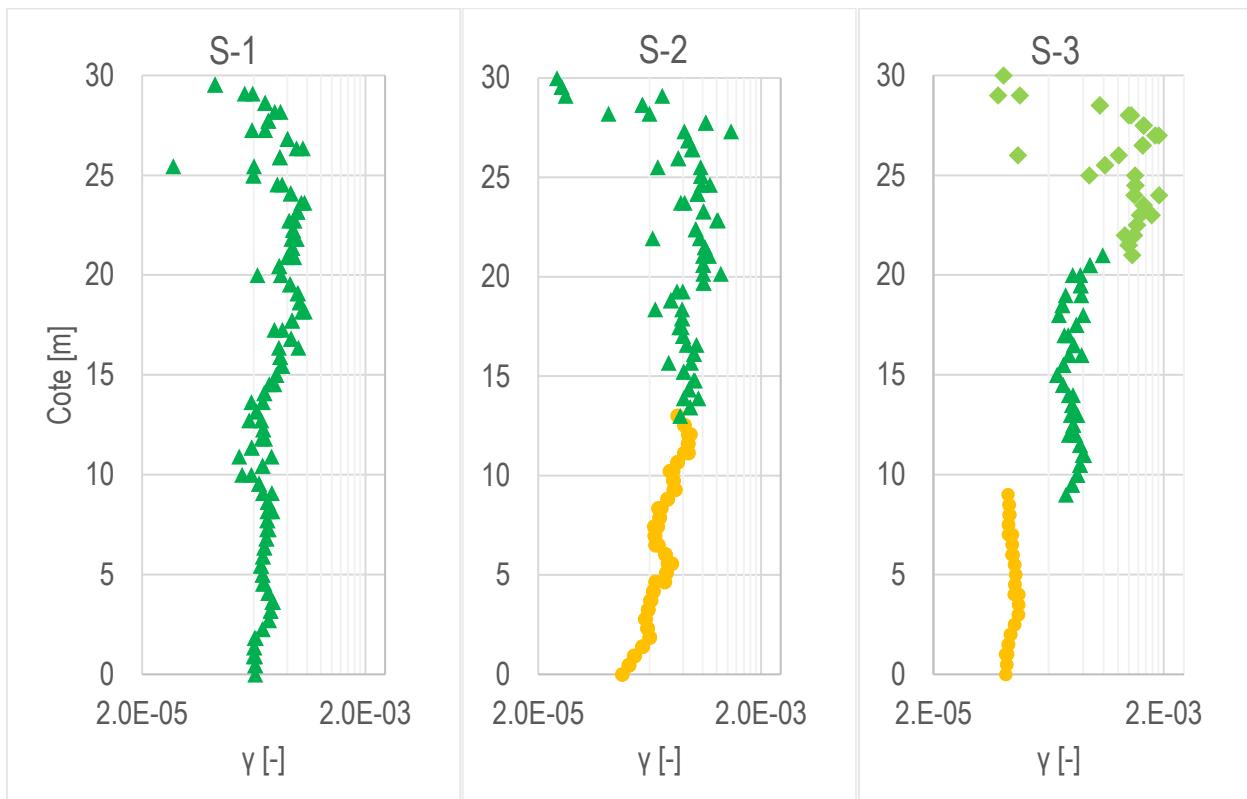


Figure 3 : Déformation de cisaillement des modèles non-linéaires S-1, S-2 et S-3.

De plus, les valeurs de a_{surf} sont égales à 3.17 m/s^2 , 3.49 m/s^2 et 4.22 m/s^2 pour les modèles non-linéaires S-1, S-2 et S-3 respectivement. Ces valeurs sont les accélérations maximales en surface pendant la durée du séisme.

3. Modèle unidimensionnel viscoélastique

Dans cette application, le modèle de comportement viscoélastique sera utilisé. Il est donc nécessaire de fixer des valeurs du module de cisaillement G et d'amortissement ξ constants par couche de sol. Dans ce cas, les paramètres viscoélastiques des sols doivent être calibrés en fonction des résultats du modèle non-linéaire car l'amortissement du sol et la raideur mobilisée dépendent également du type de sollicitation appliquée.

Afin de simplifier la démarche du calage du modèle, une méthode de calibration utilisant PLAXIS 2D a été développée. La méthode décrite ci-dessous considère le modèle unidimensionnel non-linéaire comme la solution de référence (Floroiu, 2016).

Notamment la déformation de cisaillement obtenue par le modèle non-linéaire permet de définir les valeurs de G et ξ appropriés.

A partir de la valeur de $\bar{\gamma}_{e,N}$ calculée pour chaque couche de sol, la courbe du comportement non-linéaire du sol (cf. Figure 4) est utilisée pour connaître la valeur de G/G_o mobilisée. Ainsi, pour chaque couche de sol, une valeur de G/G_o est calculée. Cette valeur est ensuite multipliée par G_0^{ref} afin de définir une valeur de \bar{G} constante par couche.

La valeur de G/G_o est calculée à l'aide de l'équation proposée par Brinkgreve & Kumarswamy (2016) pour décrire la variation de la raideur en fonction de la déformation du modèle HS-Small.

$$\bar{G} = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{G}{G_o} \right) = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{1}{1 + 0.385 \bar{\gamma}_{e,N}} \right) \quad (1)$$

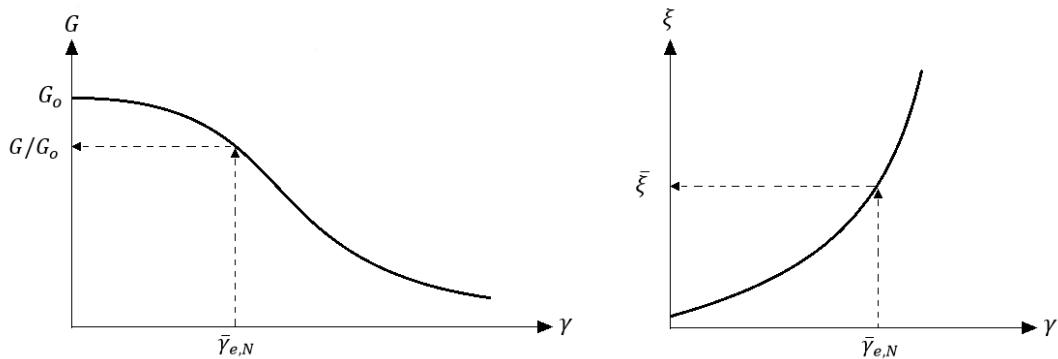


Figure 4 : Calcul de la valeur de G/G_o et $\bar{\xi}$ à partir de $\bar{\gamma}_{e,N}$ pour chaque couche de sol.

Les paramètres obtenus pour chaque couche de sol sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Calcul du module de cisaillement et d'amortissement par couche.

Modèle	N° Couche [-]	$\bar{\gamma}_{e,N}$ [-]	G/G_o [-]	\bar{G} [MPa]	$\bar{\xi}$ [%]	v_s [m/s]
S-1	1	2.0E-4	0.57	112.3	8.7	241
S-2	1	3.0E-4	0.47	44.3	12.8	160
	2	1.7E-4	0.60	118.2	8.7	247
S-3	1	6.2E-4	0.30	27.9	12.0	127
	2	2.2E-4	0.54	106.1	8.0	234
	3	6.3E-4	0.81	445.7	2.5	479

3.1. Définition du sol

Les propriétés obtenues dans le tableau précédent sont utilisées pour définir le modèle viscoélastique. Sur PLAXIS 2D, le modèle « *Linear Elastic* » et les coefficients de Rayleigh sont utilisés pour définir correctement le comportement du sol.

Le tableau suivant présente les paramètres du modèle viscoélastique utilisés pour l'analyse dynamique.

Tableau 3 : Paramètres des sols. Modèle unidimensionnel viscoélastique.

Modèle	N° Couche [-]	\bar{G} [MPa]	ν [-]	$\bar{\xi}$ [%]	\bar{f}_c [Hz]
S-1	1	112.3	0.35	8.7	2.03
S-2	1	44.3	0.35	12.8	1.70
	2	118.2	0.35	8.7	
S-3	1	27.9	0.35	12.0	2.61
	2	106.1	0.35	8.0	
	3	445.7	0.35	2.5	

Où ν c'est le coefficient du poisson et \bar{f}_c c'est la fréquence de résonance pondérée du sol, définie ci-dessous.

La première fréquence naturelle de résonance f_c d'un milieu élastique est définie en fonction de la vitesse d'onde de cisaillement v_s et de l'épaisseur H de la couche (Mylonakis & Rovithis, 2013) :

$$f_c = \frac{v_s}{4H} \quad (2)$$

Pour les milieux composés par deux couches ou plus, il existe une valeur de f_c différente pour chaque couche. Pourtant, de façon approximative, il est possible de calculer une valeur de fréquence de résonance moyenne du sol \bar{f}_c . Pour cela, il faut pondérer la vitesse d'onde en fonction de l'épaisseur de chaque couche :

$$\bar{f}_c = \frac{1}{\sum_i^n H_i} (H_i f_{c,i} + H_{i+1} f_{c,i+1} + \dots + H_n f_{c,n}) \quad (3)$$

L'amortissement du sol est défini à travers des coefficients de Rayleigh. L'amortissement ξ est appliqué pour l'intervalle de 1.5 Hz à 3.0 Hz afin d'assurer que pour une fréquence de résonance \bar{f}_c , l'amortissement du modèle correspond bien à celui mobilisé dans le modèle non-linéaire.

3.2. Géométrie du modèle

Les paramètres géométriques doivent être les mêmes que ceux utilisés pour le modèle non-linéaire (cf. §2.2).

3.3. Signal dynamique

Le modèle viscoélastique doit être sollicitée par un signal de fréquence constante afin de forcer la résonance du système et d'obtenir les déplacements horizontaux maximaux. Pour ce faire, une sollicitation de type harmonique est appliquée à la base du modèle sous la forme d'un déplacement uniformément réparti.

Le signal harmonique présente un comportement sinusoïdal de la forme $u(t) = A \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$, où A est l'amplitude et f la fréquence du signal.

La fréquence f doit être égale à la fréquence de résonance du sol \bar{f}_c . L'amplitude A du mouvement doit être trouvée par des approximations successives afin que l'accélération maximale en surface soit égale à la valeur de a_{surf} trouvée avec le modèle non-linéaire.

Par exemple, pour le modèle S-1, une première valeur arbitraire de $A = 1 \text{ mm}$ est utilisée. La valeur de a_{surf} obtenue étant faible, il faut augmenter l'amplitude. Après deux itérations, une valeur de $A = 2,34 \text{ mm}$ permet d'obtenir $a_{surf} = 3,17 \text{ m/s}^2$ (cf. §2.4) après stabilisation du mouvement comme présenté dans la figure suivante (figure à gauche).

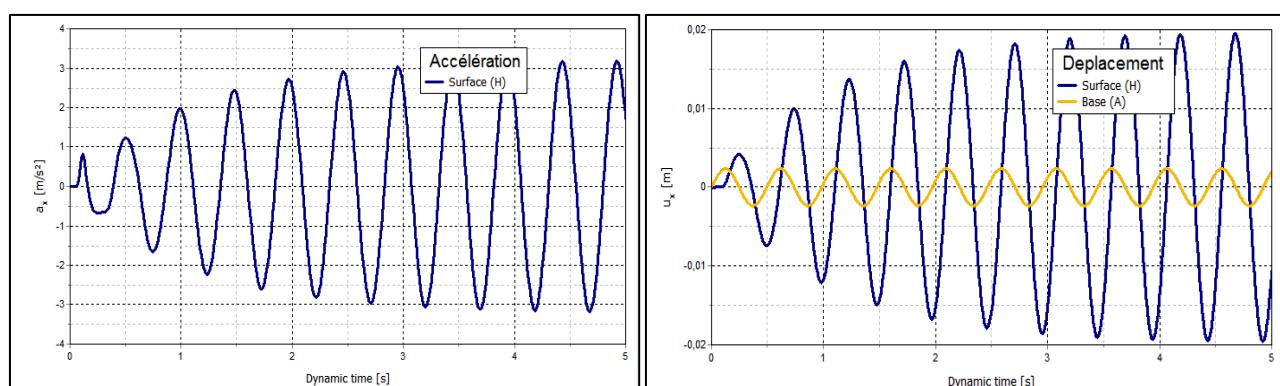


Figure 5 : Accélération en surface (à gauche) et déplacement à la base et en surface (à droite) du modèle viscoélastique S-1 en résonance.

3.4. Résultats

La Figure 5 (figure à droite) présente la variation du déplacement horizontal en surface pour le modèle viscoélastique en résonance. Après stabilisation du signal, le déplacement maximal en surface du modèle S-1 est de $u_x = 19,6 \text{ mm}$ obtenu à l'instant $t = 4,92 \text{ s}$.

De plus, il est possible d'obtenir le profil de déformation du sol à l'aide de PLAXIS 2D OUTPUT. Ce profil est relevé au pas de calcul où les déplacements sont maximaux. Dans le cas du modèle S-1, cela correspond à l'instant $t = 4,92 \text{ s}$.

Pour des cas simples (sol homogène monocouche et bicouche), il est possible de calculer la déformée théorique d'un milieu élastique équivalent. Le cahier 38 de l'AFPS présente les équations permettant de connaître la variation du déplacement horizontal du milieu en fonction de la profondeur (AFPS, 2007).

Les solutions théoriques ont été utilisées pour comparer les résultats obtenus avec PLAXIS 2D pour les profils de sols monocouche et bicouche. Les valeurs de déplacement en surface obtenues avec la méthode viscoélastique ont été utilisées comme les d_{max} des profils de déformation théoriques. Les figures ci-dessous présentent la comparaison des solutions analytiques avec les résultats obtenus sur PLAXIS 2D.

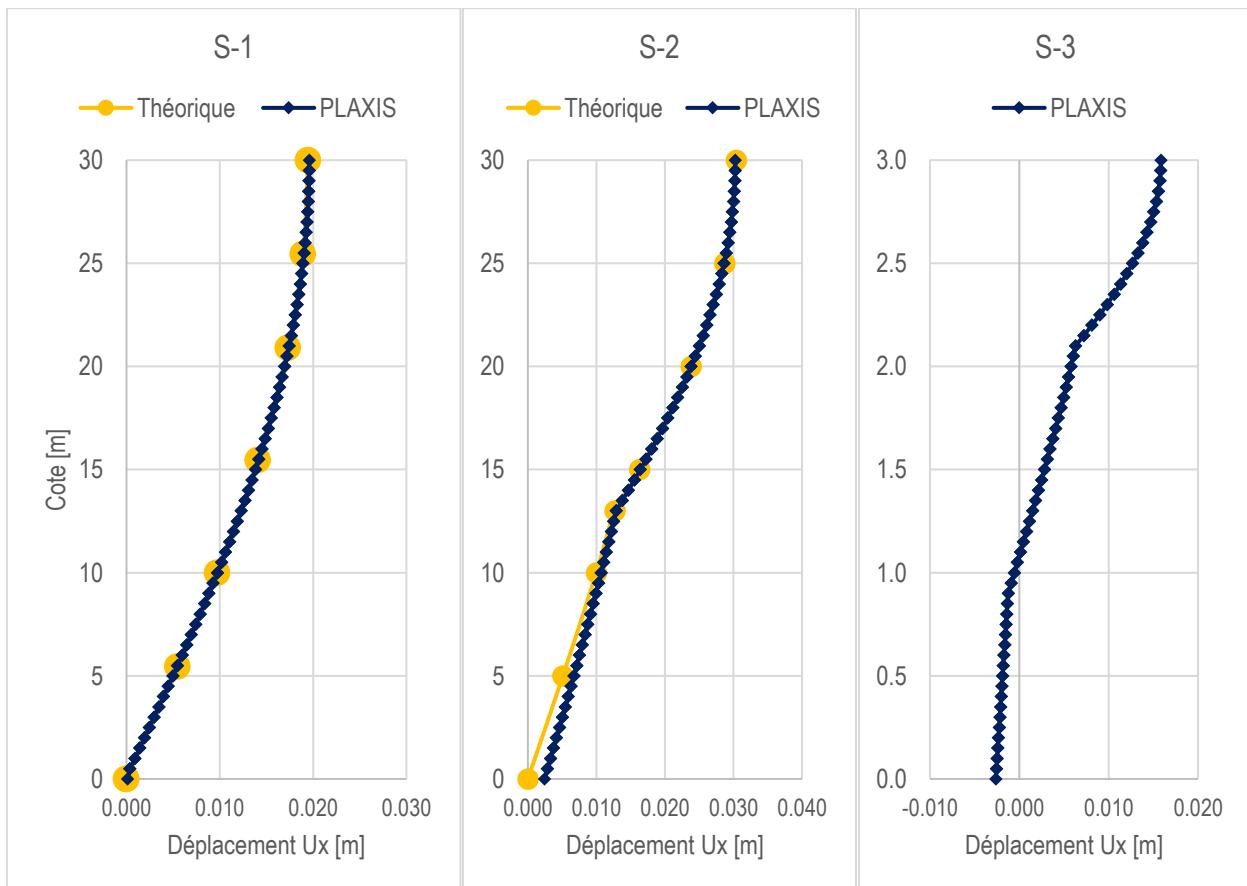


Figure 6 : Déformée théorique et numérique des modèles S-1, S-2 et S-3 sous séisme.

L'Eurocode 8 §3.2.2.4 présente une méthode pour obtenir le déplacement maximal en surface du sol d_g sous séisme (AFNOR, 2005).

$$d_g = 0,025 \cdot a_g S \cdot T_C T_D \quad (4)$$

Où a_g est l'accélération de calcul au niveau du substratum, S c'est le paramètre du site et T_C et T_D sont les périodes de vibration utilisés pour tracer le spectre de réponse élastique de calcul. Les valeurs du déplacement maximal en surface obtenus avec Plaxis sont comparées avec celles obtenus par l'équation 3 dans les mêmes conditions géologiques.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous pour une zone de sismicité 4 ce qui correspond à une accélération $a_g = 1.6 \text{ m/s}^2$.

Tableau 4 : Déplacement maximal en surface du sol en résonance.

Modèle	d_{max} Plaxis 2D [m]	Classe de sol	S	T_c [s]	T_D [s]	d_g EC8 [m]
S-1	0.020	C	1.5	0.4	2.0	0.048
S-2	0.030	D	1.6	0.6	1.5	0.058
S-3	0.016	C	1.5	0.4	2.0	0.048

4. Conclusions

Les profils de déformation maximale des modèles S-1 et S-2 donnent des résultats qui sont très proches des courbes théoriques données par les solutions analytiques. Cela permet de confirmer la cohérence des calculs numériques viscoélastiques sur PLAXIS 2D.

L'Eurocode 8 sous-estime de façon importante la valeur de la fréquence de résonance du sol, ce qui explique en principe les différences entre les déplacements maximaux donnés par la méthode viscoélastique et ceux calculés avec l'Eurocode 8.

La méthode décrite dans cette étude utilise un modèle complet qui tient compte du signal sismique et des propriétés du sol pour définir dans des configurations géologiques complexes (multicouches) les fréquences propres du massif de sol et le profil de déformées horizontales en fonction de la profondeur. Ce dernier pourra être utilisé ensuite pour l'étude de l'effet cinématique des inclusions rigides ou des pieux.

5. Références bibliographiques

- AFNOR. (2005). *NF EN 1998-1 : EUROCODE 8, Calcul des structures pour leur résistance aux séismes*. Saint-Denis: AFNOR.
- AFPS. (2007). Cahier Technique N° 38 - Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes. Paris: Association Française du Génie Parasismique .
- Atkinson, J., & Sallfors, G. (1991). *Experimental determination of soil properties*. Florence: Proceedings of the 10th ECSMFE.
- Benz, T. (2007). *Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences*. Thèse de doctorat, Stuttgart University, Germany.
- Brinkgreve, R., & Kumarswamy, S. (2016). *Material Models Manual of PLAXIS 2016*. Delft: Palxis bv.
- Floroiu, L.-G. (2016). *A contribution to Seismic Ground Response of Improved Foundation Soil*. Graz: Technische Universität Graz.
- Gingery, J. R. (2007). A simplified method for estimating shear strains for ovaling and racking analysis of tunnels. *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki.
- Hejazi, Y. (2010). *Influence de la prise en compte des modules en petites déformations des sols sur la modélisation numérique d'ouvrages géotechniques*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France.
- Mylonakis, G. E., & Rovithis, E. (2013). 1D Harmonic response of layered inhomogeneous soil : Exact and approximate analytical solutions. Dans M. Papadakakis, M. Fragiadakis, & V. Plevris, *Computational methods in earthquake engineering V2* (pp. 1-32). Dordrecht: Springer Science.
- RAP. (2013). *Proposition de jeux d'accélérogrammes compatibles avec les spectres réglementaires EC8*. Grenoble: Réseau Accélérométrique Permanent.