

Etat de l'art sur les méthodes de calcul d'un pieu et d'un groupe de pieux sous chargement sismique

State of the art of pile foundations and pile groups design under seismic loading

Jesús Pérez-Herreros, Fahd Cuira

TERRASOL (groupe SETEC), France, j.perez@terrasol.com

Panagiotis Kotronis

Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, CNRS, GeM, Nantes, France

Sandra Escoffier

IFSTTAR, GERS, SV, Nantes, France

RÉSUMÉ : L'article proposé établit un état de l'art des principales méthodes de calcul usuellement pratiquées, en France et à l'étranger, pour le dimensionnement d'un groupe de pieux sous sollicitations sismiques. Outre les méthodes numériques directes consistant à modéliser l'ensemble fondation-pieux-sol à l'aide d'une discrétisation spatio-temporelle, la majorité des méthodes usuelles sont dérivées soit de méthodes « statiques » en assimilant l'action sismique à un chargement statique, soit de la dynamique des milieux continus avec un cadre d'application souvent limité à des configurations simples : sol monocouche, comportement élastique, etc. Une analyse comparative de ces méthodes usuelles sera proposée. La communication s'intéresse ensuite au concept du macroélément qui constitue le cadre de recherche dans lequel s'inscrit ce travail bibliographique. Ce concept est une nouvelle approche permettant le traitement des effets non-linéaires dans l'interaction sol-fondation. Les modèles de macroélément capturent la réponse du sol (champ proche ou lointain) ainsi que de la fondation en termes de forces, déplacements et rotations généralisées. Le travail introduit ici vise à étendre les capacités de ce concept à la prise en compte des effets fréquentiels dans l'analyse des interactions pieu-sol-pieu.

ABSTRACT: This paper presents a state of the art of pile foundations customary design practice under seismic loading, in France and abroad. Besides the use of space and time discretization using the finite element method to analyze the behavior of soil-pile-foundation sets as a whole, most usual methods in design practice are derived either from static approaches (seismic load is in this case applied in form of a static load) or from simplified configurations in the framework of dynamics (monolayer soil profile, elastic behavior, etc.). A comparative analysis of the most widely used approaches is presented. Then, the paper focuses on the macroelement concept, which is the research framework in which this bibliographical work takes place. This concept is a new approach for the simulation of non-linear soil-foundation interaction effects. Macroelement models capture the global response of the soil (near and far field) and of the foundation substructure in terms of generalized forces, displacements and rotations. The work introduced here intends to extend the capabilities of the macroelement concept to account for the effects of frequency in the analysis of pile-soil-pile interactions.

MOTS-CLÉS: chargement sismique, groupe de pieux, fondations profondes, interaction dynamique sol-structure, macroélément

KEYWORDS: earthquake loading, pile group, deep foundations, soil-structure dynamic interaction, macroelement

1 INTRODUCTION

La réponse dynamique d'une structure supportée par des fondations profondes constitue un problème complexe d'Interaction Sol-Structure (ISS) nécessitant des méthodes de calcul adaptées. Des classifications de ces méthodes, disponibles dans la littérature (Lysmer 1978, Idriss et Kennedy 1980, Novak 1991), mettent en évidence que l'étude des phénomènes d'interaction reste essentiellement limitée au cas des problèmes linéaires avec un intérêt particulier pour les méthodes de sous-structures. Les approches purement non linéaires restent exceptionnelles et leur champ d'application limité, de manière générale, aux calculs de vérification de structures exceptionnelles.

Bien que des codes comme l'Eurocode 8 (EN 1998) reconnaissent désormais l'effet de l'ISS, les approches disponibles pour le dimensionnement des fondations restent réduites et peu d'intérêt est donné au comportement non linéaire des fondations. L'exclusion des mécanismes non linéaires de dissipation d'énergie (importants dans le cas des forts séismes) conduit le plus souvent à un dimensionnement fortement conservatif des fondations. De ce fait il y a un intérêt

grandissant à développer de nouvelles approches permettant de prendre en compte ces phénomènes et ce, dès l'étape de dimensionnement.

Cet article présente dans un premier temps les différentes approches classiquement utilisées pour le dimensionnement d'un groupe de pieux sous sollicitations sismiques. Une nouvelle approche, le concept du macroélément pour les fondations profondes, est introduite par la suite.

2 ISS DYNAMIQUE POUR LES FONDATIONS PROFONDES

2.1 Méthode globale

Cette méthode consiste à résoudre en une seule étape, dans le domaine temporel ou fréquentiel, l'équation dynamique régissant le comportement du système global : structure, fondation et sol (Figure 1a).

La méthode des éléments finis est la technique de résolution la plus utilisée. Lorsque le problème est résolu dans le domaine temporel il est possible de prendre en compte des phénomènes non linéaires (comportement anélastique des matériaux, décollement ou glissement).

Dans le cas des fondations profondes cette approche permet la prise en compte de l'effet de l'interaction pieu-sol-pieu, de la fréquence et du niveau de sollicitation sur la réponse du système.

La taille maximale du maillage dépend de la fréquence maximale d'intérêt et des caractéristiques du sol à modéliser. L'utilisation d'un maillage grossier ne permettant pas la transmission correcte des hautes fréquences, il est d'usage d'imposer une dimension de maillage ne dépassant pas 1/5 à 1/8 de la longueur d'onde (Pecker 1984).

Cependant, cette méthode présente plusieurs désavantages. Les conditions aux limites sont introduites de manière artificielle via des éléments de frontière qui ne constituent une solution exacte au problème de propagation d'ondes à l'infini que dans le domaine fréquentiel ; dans le domaine temporel elles ne représentent qu'une solution approchée (Pecker 2011). De plus, il est nécessaire d'éloigner les frontières du modèle afin d'atténuer les ondes réfléchies avant qu'elles impactent la structure. La complexité des modèles et de l'interprétation des résultats augmente très rapidement avec la prise en compte des non linéarités dans la structure, le sol et à l'interface entre les deux. De ce fait, ce type d'analyse est généralement réservé à des vérifications ponctuelles et non à une démarche de dimensionnement.

2.2 Méthode de sous-structures

Pour des niveaux réduits de sollicitation sismique, le comportement du système peut être reproduit par le biais d'un calcul élastique équivalent. Sous l'hypothèse d'élasticité, le principe de superposition permet de résoudre le problème d'interaction en plusieurs étapes successives, chacune d'entre elles étant plus simple à résoudre que le problème global.

Plusieurs méthodes de sous-structures sont disponibles dans la littérature. Elles se différencient par la décomposition du modèle global en sous-modèles. On distingue les méthodes dites de frontière, où l'interaction entre le sol et la structure est prise en compte à l'interface sol-structure (Gutierrez and Chopra 1978, Kausel *et al.* 1978) et les méthodes de volume, où l'interaction est aussi prise en compte à tous les nœuds de la structure sous la surface du sol (Lysmer *et al.* 1981). Le présent article ayant pour but de présenter les généralités des méthodes de sous-structure, on se limite par la suite à présenter le théorème de superposition de Kausel illustré sur la Figure 1. Cette approche propose une résolution du problème d'ISS en trois étapes : (1) interaction cinématique, (2) calcul d'impédances et (3) calcul de la structure avec prise en compte d'ISS.

Classiquement les deux premières étapes sont réalisées dans le domaine fréquentiel. Les résultats sont utilisés par la suite dans le calcul de la réponse dynamique de la structure, qui est fait généralement dans le domaine temporel. L'ajout de l'impédance dynamique dans le modèle de calcul de structure nécessite le passage du domaine fréquentiel au domaine temporel, ce qui se traduit le plus souvent dans la pratique par le calage itératif soit de ressorts et d'amortisseurs visqueux constants placés à la base de la structure soit de modèles rhéologiques simples, tel que le modèle *monkey tail* (Zhang and Wolf 1998).

La méthode de sous-structuration dévient très intéressante dès lors qu'il est possible de résoudre de manière analytique certaines étapes de calcul. Dans le cas des fondations profondes, plusieurs expressions de fonctions d'impédance existent dans la littérature mais elles restent limitées à des configurations simples (Gazetas 1991).

Dans le cas des fondations profondes il est nécessaire de prendre en compte les effets d'interaction cinématique (Figure 1-b1). Quelques études paramétriques existent dans la littérature mais elles concernent des configurations simples

(pieu isolé, groupes de pieux simples, sol homogène, etc.) et leurs conclusions ne peuvent être utilisées qu'avec précaution (Gazetas 1984, Fan *et al.* 1991). Un calcul est donc nécessaire pour cette étape.

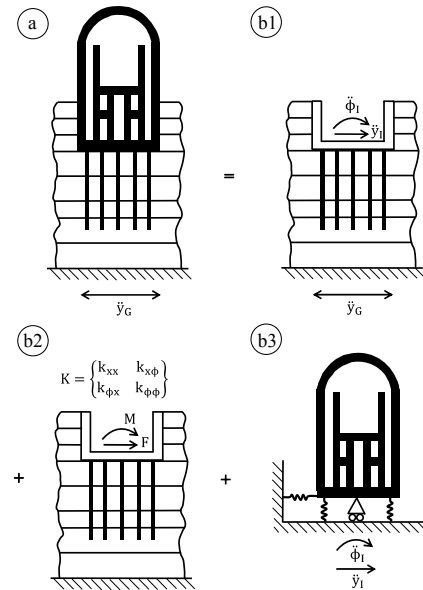


Figure 1. Théorème de superposition pour une structure fondée sur pieux : (a) solution globale, (b1) interaction cinématique, (b2) impédances dynamiques et (b3) calcul de la structure avec prise en compte d'ISS (modifiée à partir de Kausel *et al.* 1978)

D'autre part, comme dans le cas des méthodes directes, les problématiques liées à la dépendance de la taille du maillage vis-à-vis des fréquences de la sollicitation et le traitement des conditions aux limites du modèle restent présentes.

De manière générale, le comportement non linéaire du sol est pris en compte avec l'utilisation d'une loi de comportement de type viscoélastique linéaire équivalent dont les caractéristiques sont obtenues de manière itérative à partir du niveau moyen de déformation induit par la sollicitation. Ainsi, une des principales limitations de ces méthodes est l'impossibilité d'obtenir les déplacements irréversibles.

2.3 Méthodes de type Winkler non-linéaires

De nombreux articles ont fait l'objet de méthodes de modélisation des pieux suivant des approches de type Winkler. Dans ce qui suit sont présentés les aspects communs à ces diverses méthodes ainsi que leurs points forts et leurs désavantages. Une classification plus détaillée des différentes approches de type Winkler est présente dans Novak (1991).

Dans ces approches le système sol-pieu est discrétisé en couches horizontales contenant un segment de pieu ainsi qu'une couche de sol homogène infinie. La réponse de chacune des couches est supposée indépendante de celle des couches adjacentes (Figure 2a). Les méthodes proposées dans la littérature varient dans leur niveau de complexité mais partagent toutes cette hypothèse de base.

On distingue essentiellement deux familles de méthodes : celle qui repose sur des formulations de type courbes P-y « dynamiques » (i.e. Kagawa et Kraft 1980) et celle qui propose l'utilisation d'éléments rhéologiques discrets pour représenter le comportement du sol en champs proche et ceci pour chaque couche de sol. Pour des faibles sollicitations, Nogami et Konagai (1986 et 1988) ont proposé les modèles rhéologiques présentés en Figure 2-b2).

Pour de fortes sollicitations, le comportement du pieu est contrôlé par la réponse non linéaire du sol environnant à forte

distorsion et les phénomènes à l'interface pieu-sol : décollement, glissement/frottement. Pour contourner cette problématique, de nombreux auteurs ont incorporé aux modèles des ressorts et amortisseurs non linéaires, des éléments de contact, de frottement de type Coulomb, etc. (i.e. Matlock *et al.* 1978, Figure 2-b3), ou encore des modèles phénoménologiques reproduisant directement l'interaction sol-pieu à l'interface (Gerolymos et Gazetas 2005, Figure 2-b4).

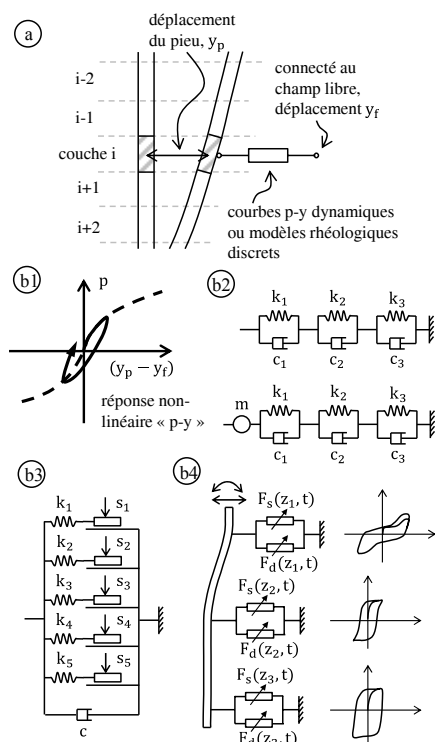


Figure 2. Méthodes de type Winkler : (a) concept, (b1) courbes « p-y » dynamiques (d'après Kagawa et Kraft 1980), (b2) éléments rhéologiques discrets pour la réponse axial (haut) et latéral (bas) d'un segment unitaire de pieu isolé (Nogami et Konagai (1986 et 1988)), (b3) modèle rhéologique avec des éléments de frottement de Coulomb (Matlock *et al.* 1978) et (b4) modèle phénoménologique (Gerolymos et Gazetas 2005)

Le principal avantage des approches de type Winkler réside dans la continuité qu'ils présentent avec les modèles usuellement pratiqués pour les analyses statiques. Par ailleurs, leur formulation souvent établie dans le domaine temporel facilite leur utilisation directe à la base d'un modèle de structure classique. Le comportement du sol étant condensé aux nœuds d'interface entre la fondation et le sol, le coût numérique est réduit. La prise en compte des non linéarités est liée aux caractéristiques particulières de chacune des méthodes.

Un des désavantages de cette approche est que l'effet de groupe (interaction pieu-sol-pieu) n'est généralement pas pris en compte. De plus, l'interaction entre les couches est négligée ainsi que les couplages entre les différentes directions. La majorité des modèles abordent uniquement le problème d'un pieu isolé soumis à une sollicitation de type dynamique (au niveau de la tête du pieu ou injectée au système à partir du champ libre). Lorsque l'effet de groupe est inclus dans le modèle, il est généralement pris en compte de manière simplifiée par le biais de facteurs d'interaction dynamiques (Kaynia et Kausel 1982).

Les modèles de ce type sont très versatiles mais sont limités par la difficulté de lier les caractéristiques des éléments discrets aux paramètres de sol usuels en géotechnique. Compte tenu de la grande quantité de méthodes disponibles et des hypothèses,

parfois très simplificatrices, à la base de ces formulations, leur utilisation nécessite une précaution particulière.

3 MACROELEMENT

3.1 Concept

Le concept du macroélément, introduit en géotechnique par Nova et Montrasio (1991) permet de préserver les principaux phénomènes mis en jeu dans un problème d'ISS, tout en évitant la complexité et le coût numérique d'analyses dynamiques non linéaires aux éléments finis.

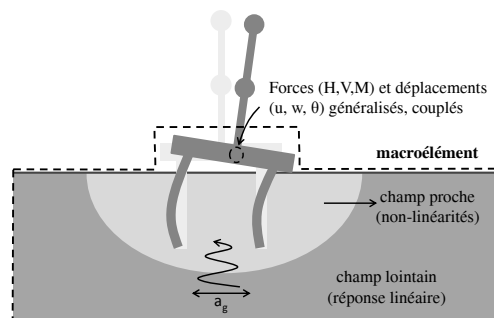


Figure 3. Concept du macroélément pour les fondations profondes (2D).

Le macroélément est un élément discret de liaison à comportement non-linéaire, placé à la base de la superstructure (Figure 3) et qui permet de substituer en totalité, ou en partie, le sol et la fondation. Il dispose d'une loi de comportement non-linéaire, décrite en termes de forces et de déplacements généralisés, établissant à l'échelle macroscopique les couplages dynamiques (linéaires et non linéaires) dans plusieurs directions entre la superstructure, le sol et la fondation.

La prise en compte des non linéarités et du couplage entre les degrés de liberté constitue l'apport principal de cette nouvelle approche pour le calcul des fondations profondes.

3.2 Etat de l'art

Les développements de cet outil heuristique ont concerné à l'origine les fondations superficielles (Crémer *et al.* 2001, Chatzigogos 2007, Grange 2009). L'extension du concept au cas des fondations profondes est très récente.

Correia (2011) a développé un macroélément pour un pieu isolé dans un sol cohérent et soumis à une sollicitation sismique latérale de type inertielle. Son approche est basée sur un modèle constitutif élastique non linéaire, représentant le comportement élastique à faibles déformations (via les impédances linéaires élastiques proposées par Gazetas (1991) et adoptées dans l'EC8 (2005)) avec décollement sol-pieu, couplé avec un modèle plastique de surface limite. L'amortissement radiatif n'est pas pris en compte de manière intrinsèque dans cette formulation mais il est cependant possible d'ajouter des amortisseurs visqueux en tête du pieu de manière analogue à un calcul de sous structure classique.

Un nouveau macroélément pour des fondations profondes soumises à des chargements monotones, cycliques et sismiques a récemment été développé (Li 2014, Li *et al.* 2016). Il permet de reproduire le comportement d'un pieu isolé et d'un groupe de deux pieux dans un sol frottant. Il est basé sur une loi de comportement hypoplastique et s'inspire du macroélément proposé par Salciarini et Tamagnini (2009) pour une fondation superficielle. La réponse à faible déformation du système est contrôlée par la raideur élastique calculée en tête de pieu. Le critère de rupture est défini à partir d'une formulation adimensionnelle prenant comme paramètres d'entrée la capacité portante d'un pieu isolé pour un chargement horizontal, pour un moment et pour un chargement vertical. L'effet de groupe est

introduit dans cette formulation sous forme d'un facteur de groupe constant qui vient modifier la surface de charge et de rupture.

Tel qu'il a été montré par Correia *et al.* (2012), les méthodes de type macroélément pour les fondations profondes permettent la prise en compte des mécanismes non-linéaires de dissipation d'énergie tout en limitant le coût numérique de calcul. Ainsi ce type d'approche propose un outil adapté aux méthodes de dimensionnement basées sur la performance sismique.

Toutefois, les macroéléments pour les fondations profondes développés à ce jour présentent plusieurs limitations qui ne permettent pas de reproduire (au moins de manière directe) la réponse d'un groupe de pieux sous sollicitation sismique. Ces formulations traitant à la base le problème d'un pieu isolé, l'effet de groupe n'est pas pris en compte de manière rigoureuse. Pour que cette méthode puisse présenter un apport significatif par rapport aux approches usuelles (en particulier le modèle de Winkler) il est nécessaire que les futurs développements intègrent, en plus des effets de non linéarité et de radiation, ceux liés à l'interaction pieu-sol-pieu et à la fréquence de sollicitation.

4 SYNTHÈSE

Le présent article présente l'état actuel des principales méthodes de calcul utilisées pour aborder la problématique des pieux isolés ou en groupe sous sollicitations sismiques. Outre les méthodes usuellement pratiquées dans les bureaux d'ingénierie, le concept du macroélément pour les fondations profondes est introduit. Cette approche s'inscrit dans une nouvelle philosophie de dimensionnement des systèmes de fondation qui a pour objectif de prendre en compte les mécanismes non-linéaires de dissipation d'énergie qui sont traditionnellement ignorés lors du dimensionnement.

Les caractéristiques et désavantages de chacune des méthodes sont récapitulés dans le Tableau 1. Actuellement des travaux de recherche sont en cours de manière à enrichir les possibilités du macroélément pour fondations profondes, notamment en ce qui concerne la prise en compte de l'effet de groupe et de la fréquence de la sollicitation sur la réponse du système. La résolution de ces problématiques permettra la mise en œuvre d'un outil de calcul adapté aux approches dynamiques de dimensionnement des fondations en capacité.

Tableau 1. Récapitulatif des approches d'ISS en dynamique pour les fondations profondes.

Méthode	Domaine	Coût numérique	Effet groupe	Effet fréquence	Non-linéarités	Couplage
Globale	Fréq./Temp.	Haut	Oui	Oui	Oui	Oui
Sous-structures	Fréq.	Moyen	Oui	Oui	Non	Oui
Winkler non-linéaire	Temp.	Réduit	-	-	Oui	Non
Macro-élément	Temp.	Réduit	(a)	(b)	Oui	Oui

(a) Le modèle proposé par Li (2014), Li *et al.* (2016) incorpore un facteur de groupe constant, (b) les formulations existantes ne prennent pas en compte l'effet de la fréquence de la sollicitation sur la réponse du système.

5 REFERENCES

Correia A.A. 2011. A pile-head macro-element approach to seismic design of monoshaft-supported bridges. PhD Thesis, ROSE School, IUSS Pavia, Italy.
 Correia A.A., Pecker A., Kramer S. and Pinho R. 2012. Nonlinear pile-head macro-element model: SSI effects on the seismic response of a monoshaft-supported bridge. 15 WCEE, Lisboa

Chatzigogos C.T. 2007. Comportement sismique des fondations superficielles: vers la prise en compte d'un critère de performance dans la conception. Thèse de l'Ecole Doctorale Polytechnique.
 Crémer C., Pecker A. and Davenne L. 2002. Modelling of nonlinear dynamic behavior of a shallow strip foundation with macroelement. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 6, Issue 2, pp. 175-211
 Norme EN 1998-5. 2005. Eurocode 8: Calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Partie 5: Fondations, ouvrages de soutènement et aspects pratiques. Association Française de Normalisation (AFNOR)
 Fan K., Gazetas G., Kaynia E. and Ahmad S. 1991. Kinematic seismic response of single piles and pile groups. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117, pp 1860-1879.
 Gazetas G. 1984. Seismic response of end-bearing single piles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3, pp. 82-93.
 Gazetas G. 1991. *Foundation vibrations*. Foundation Engineering Handbook, 2nd ed., Fang H.Y. (ed.), Van Nostrand Reinhold, New York, USA, pp. 553-593.
 Gerolymos N. and Gazetas G. 2005. Constitutive model for 1-D cyclic soil behavior applied to seismic analysis of layered deposits. *Soils and Foundations*, No. 45, pp. 147-159.
 Grange, S., Kotronis, P., and Mazars, J. 2009. A macro-element to simulate dynamic Soil-Structure Interaction. *Engineering Structures*, Vol. 31, pp. 3034-3046.
 Gutierrez J.A. and Chopra A.K. 1978. A substructure method for earthquake analysis of structures including structure-soil interaction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Ltd. 6, 51-69.
 Idriss J.M. and Kennedy R.P. 1980. Analysis for soil-structure interaction effects for nuclear power plants – Report by the Ad Hoc Group on Soil Structure Interaction of the Committee on Nuclear Structures and Materials of the Structural Division of ASCE.
 Kagawa T. and Kraft L.M. Seismic p-y responses of flexible piles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, pp 899-918.
 Kausel E., Whitman A., Murray J. and Elsabee F. 1978. The spring method for embedded foundations. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. No. 48
 Kaynia A.M. and Kausel E. 1982. Dynamic behavior of pile groups. 2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, Austin, TX, pp. 509-532.
 Li Z. 2014. Etude expérimentale et numérique de fondations profondes sous sollicitations sismiques. Pieux verticaux et pieux inclinés. Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes.
 Li Z., Kotronis P., Escoffier S., Tamagnini C. 2016. A hypoplastic macroelement for single vertical piles in sand subject to three-dimensional loading conditions. *Acta Geotechnica*, 11(2), 373-390.
 Lysmer J. 1978. Analytical procedures in soil dynamics – State of the art, ASCE Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Pasadena, California.
 Lysmer J., Raissi M., Tajirian F., Vahdani S., Ostadan F. 1981. SASSI – A system for analysis of soil-structure interaction – Geotechnical report No. 81-02, University of California, Berkeley.
 Matlock H., Foo S.H. and Bryant L.M. 1978. Simulation of lateral pile behavior under earthquake motion. Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, Pasadena, California.
 Nogami T. and Konagai K. 1986. Time domain axial response of dynamically loaded single piles. *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 112, pp. 1241-1252.
 Nogami T. and Konagai K. 1988. Time domain flexural response of dynamically loaded single piles. *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 114, pp. 1512-1525.
 Nova R. and Montrasio L. 1991. Settlement of shallow foundations on sand. *Géotechnique*, Vol. 41, N° 2, pp. 243-256.
 Novak M. 1991. Piles under dynamic loads. Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. St. Louis, Missouri, Paper No. SOA14.
 Pecker A. 1984. *Dynamique des sols*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
 Pecker A. 2011. *Dynamique des structures et des ouvrages*. Notes de cours. Ecole des Ponts et Chaussées, Paris.
 Salciarini D. and Tamagnini C. 2009. A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads. *Acta Geotechnica*, 4(3), pp. 163-176.
 Zhang C. and Wolf J.P. 1998. *Dynamic Soil-Structure Interaction*. Elsevier.