



HAL
open science

Algorithme "Temps-Fréquence" pour la dynamique non linéaire en interaction sol-structure

Christophe Obrebski, Didier Clouteau, Nicolas Greffet

► **To cite this version:**

Christophe Obrebski, Didier Clouteau, Nicolas Greffet. Algorithme "Temps-Fréquence" pour la dynamique non linéaire en interaction sol-structure. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01813063

HAL Id: hal-01813063

<https://hal.science/hal-01813063>

Submitted on 12 Jun 2018

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.

Public Domain

Algorithme "Temps-Fréquence" pour la dynamique non linéaire en interaction sol-structure

C. Obrembski*, **D. Clouteau***, **N. Greffet****

* *LMSSMat, CNRS UMR 8579, Ecole Centrale Paris*
obrembskic@mssmat.ecp.fr, clouteau@mssmat.ecp.fr

** *EDF R&D AMA, Clamart, France*
nicolas.greffet@edf.fr

RÉSUMÉ. En interaction dynamique sol-structure, les méthodes de couplage éléments finis - éléments de frontière sont généralement utilisées pour des modélisations de contact parfait entre les deux milieux. Pour les problèmes d'interaction sol-structure non-linéaires traités ici, une formulation "Temps-Fréquence" est présentée pour résoudre le couplage entre l'impédance dynamique du sol fréquemment dépendante et les phénomènes non linéaires provenant des décollements de la fondation pouvant apparaître lors d'épisodes sismiques de grande ampleur. Les décollements de fondation sont d'ordinaire pris en compte en simplifiant le domaine sol en simple ressorts non-linéaires ou en modélisant le domaine proche par éléments finis. Le schéma numérique utilisé est alors incrémental. Nous présentons une alternative intéressante à ce schéma pour supprimer cette approximation et approcher efficacement les non linéarités de contact entre le sol et la fondation.

ABSTRACT. Soil-structure interaction problems are modeled coupling finite elements and boundary elements, assuming linear interaction between the two domains. For nonlinear soil-structure interaction problems, a "Time-Frequency" algorithm is presented to solve the coupling problem of frequency dependant stiffness and nonlinear contact. Most of the time, these problems have to be analysed in the time domain while most effective linear models are in the frequency domain. In this paper, an approach to nonlinear interaction problems is elaborated coupling time and frequency domain. It allows the numerical computation of the soil stiffness in frequency domain and the residual term due to nonlinear forces in the time domain. The results given here validate the method and demonstrate its efficiency. Moreover, the importance of the partial uplift of foundation considering soil-structure interaction is illustrated.

MOTS-CLÉS : domaine fréquentiel, domaine temporel, interaction sol-structure, FEM-BEM, couplage non linéaire.

KEYWORDS: frequency domain, time domain, soil-structure interaction, nonlinear FEM-BEM.

1. Introduction

Face à l'accroissement des niveaux de chargement sismique, les exploitants d'installations industrielles (nucléaire notamment) doivent pouvoir justifier la tenue des installations existantes. La simulation numérique fine est alors un outil essentiel. Les modélisations doivent donc être plus précises et dans le cas étudié, pouvoir prendre en compte à la fois le décollement de la fondation, phénomène non linéaire, et l'impédance dynamique du sol, dépendant de la fréquence de sollicitation du système. La modélisation adoptée ici est basée sur une méthode de sous structuration. Le bâtiment Ω_b est modélisé par la méthode des éléments finis et le domaine sol Ω_s par éléments de frontière. Les éléments de frontière permettent de réduire le nombre de degrés de liberté uniquement à ceux liés à l'interface sol-structure. Ils permettent notamment de définir sur cette interface la contribution du demi-espace infini, homogène ou stratifié horizontalement.

2. Formulation générale de la méthode FEM-BEM

Le traitement de l'interaction sol-structure non linéaire a déjà fait l'objet de multiples recherches. Cependant, actuellement aucune méthode ne semble faire l'unanimité et beaucoup de formulations restent encore peu exploitées. Nous présentons ici une formulation linéaire et non linéaire de l'interaction sol-structure, puis une revue non exhaustive des différentes méthodes de résolution existantes.

2.1. Interaction sol-structure linéaire

La modélisation de l'interaction sol-structure est basée sur l'équation d'équilibre [1] exprimée dans le domaine sol Ω_s et la structure Ω_b (fig. 1).

$$\text{Div} \sigma_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{f}_i = \rho_i \ddot{\mathbf{x}}_i \quad (1)$$

où l'indice i peut être remplacé par s ou b suivant le domaine dans lequel l'équilibre est exprimé. En notant \mathbf{n} la normale à l'interface Σ_{bs} extérieure au domaine sol, les conditions de compatibilités [2] sont exprimées par :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_s &= \mathbf{x}_b \text{ sur } \Sigma_{bs} \\ \sigma_s(\mathbf{x}_s) \cdot \mathbf{n} &= -\sigma_b(\mathbf{x}_b) \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \quad (2)$$

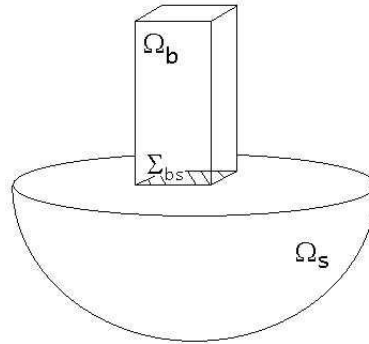


Figure 1. Définition des domaines.

De plus, dans le domaine Ω_s , les conditions de radiations à l'infini doivent être respectées. Ces conditions sont prises en comptes lors de la formulation intégrale de l'équation [1], ce qui donne :

$$\int_{\Omega_b} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) : \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{y}) dV + \int_{\Omega_b} \rho \ddot{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{y} dV + \int_{\Sigma_{b,s}} \mathbf{t}_s(\mathbf{x}_s) \cdot \mathbf{y} dS = \int_{\Omega_b} \mathbf{f} \cdot \mathbf{y} dV \quad (3)$$

Après discrétisation, l'équation [3] se met sous la forme décrite en [4]

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} *_t \mathbf{x} = \mathbf{F}^{ext}(t) \quad (4)$$

$\mathbf{K} *_t \mathbf{x}$ représente la convolution due à la dépendance fréquentielle de \mathbf{K} ; soit, dans le domaine fréquentiel :

$$[-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}(\omega)] \mathbf{x}(\omega) = \mathbf{F}^{ext}(\omega) \quad (5)$$

La résolution de l'équation [5] permet d'obtenir le spectre de réponse de la structure et en appliquant une transformée de Fourier inverse, la réponse temporelle de celle ci.

2.2. Prise en compte du décollement de la fondation

Lors du décollement, les conditions cinématiques [2] ne sont plus respectées au niveau de l'interface. Il faut donc introduire un saut de déplacement δ et écrire la nouvelle condition cinématique [6] :

$$\mathbf{x}_b = \mathbf{x}_s + \delta \text{ sur } \Sigma_{b,s} \quad (6)$$

Ces nouvelles conditions sont insérées dans l'équation [3] et permettent d'obtenir la nouvelle formulation discrétisée [7] :

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{F}^{nl}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) = \mathbf{F}^{ext}(t) \quad (7)$$

où sont inclus les effets non linéaires de décollement à l'interface et la dépendance fréquentielle de l'impédance de sol. Il est à noter que la résolution temporelle implique le calcul d'une convolution à chaque pas de temps, ce qui pour des calculs conséquents peut rapidement devenir coûteux.

2.3. Revue des méthodes existantes

Des méthodes purement temporelles ont été élaborées. Elles consistent à exprimer l'impédance dynamique du sol directement dans le domaine temporel. Cependant, les fonctions de Green, solutions analytiques de la propagation des ondes dans un milieu infini, ne sont déterminables en temps que pour un domaine homogène et limitent donc trop le champ d'application de cette méthode. La modélisation par éléments finis du domaine sol engendre un accroissement considérable du nombre de ddls à considérer

et une définition plus approximative des conditions aux limites du domaine sol. Les méthodes dites "hybrides" couplant à la fois domaine temporel et domaine fréquentiel développées par Kawamoto [KAW 83], Wolf et Darbre [WOL 88] [DAR 88], ont été utilisées dans le cas de modèles simplifiés ou d'isolation de fondation. L'algorithme appelé "HFTD" (Hybrid Frequency-Time Domain) est basé sur une linéarisation du modèle initial et la résolution fréquentielle du problème. Les effets non linéaires sont évalués *a posteriori* et ajoutés au second membre avant le lancement d'une nouvelle résolution du système. D'autres méthodes préfèrent une résolution temporelle et une estimation fréquentielle des effets dynamiques de l'impédance [SAV 02].

3. La méthode "Temps-Fréquence"

Clouteau et Devesa [CLO 02] ont élaboré un algorithme "Temps-Fréquence" permettant de coupler l'impédance dynamique du sol et la non linéarité due au décollement tout en gardant une décomposition modale de la structure et de son interface. Cette méthode est présentée en séparant la résolution linéaire et la prise en compte des non linéarités.

3.1. Linéarisation du problème et résolution fréquentielle

Initialement, le problème non linéaire se présente sous la forme décrite en [7]. La première opération importante est la linéarisation du problème autour du point d'équilibre statique qui doit être le point d'équilibre initial du système.

$$\mathbf{F}^{\text{nl}}(t) \approx \mathbf{K}_0 *_t \mathbf{x}(t) + \mathbf{C}_0 *_t \dot{\mathbf{x}}(t) \quad (8)$$

\mathbf{K}_0 et \mathbf{C}_0 doivent être égales aux caractéristiques initiales du problème pour que la première solution calculée n'engendre pas de résidu sur les premiers pas de temps. La première itération revient donc à la résolution du système :

$$[-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C}_0 + \mathbf{K}_0(\omega)]\mathbf{x}(\omega) = \mathbf{F}^{\text{ext}}(\omega) \quad (9)$$

La première solution \mathbf{x}_1 temporelle est obtenue par transformée de Fourier inverse :

$$\mathbf{x}_1(t) = F^{-1}(\mathbf{x}(\omega)) \quad (10)$$

Elle est obtenue pour l'intervalle de temps complet de la simulation.

3.2. Correction du terme non linéaire

A partir de la résolution linéaire précédente, la loi de comportement non linéaire permet de calculer les forces internes qui devraient exister dans notre système. L'estimation de ces forces internes permet d'obtenir le déséquilibre entre le système linéaire et non linéaire. Le résidu \mathbf{R} s'écrit :

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{F}^{\text{ext}}(t) - \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{F}^{\text{nl}}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \quad (11)$$

Ce résidu est ensuite utilisé pour calculer une correction \mathbf{dx} dans le domaine fréquentiel, avec la fonction de transfert $\mathbf{H}_0(\omega) = [-\omega^2\mathbf{M} + j\omega\mathbf{C}_0 + \mathbf{K}_0(\omega)]$:

$$\begin{aligned} \mathbf{dx}_{i+1}(\omega) &= \mathbf{H}_0^{-1}(\omega)\mathbf{R}_i(\omega) \\ \mathbf{x}_{i+1}(t) &= \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{dx}_{i+1}(t) \end{aligned} \quad (12)$$

Des techniques de fenêtrage du résidu doivent être utilisées suivant le problème étudié. Il faut à la fois assurer un résidu nul pendant un laps de temps suffisamment long avant la fin de la simulation mais également une correction nulle. Ceci provient de l'utilisation des transformées de Fourier qui font apparaître des oscillations en début de fenêtre si les conditions précédentes ne sont pas respectées.

4. Application : Modèle 2D en appui sur un tapis de ressorts non linéaires

Les résultats ci dessous correspondent à une plaque modélisée par EF (fig. 2a) et posée sur un tapis de ressorts non linéaires autorisant le décollement de la structure. On peut se rendre compte que la prise en compte du décollement peut avoir une importance capitale pour le dimensionnement. Cette résolution a été comparée avec

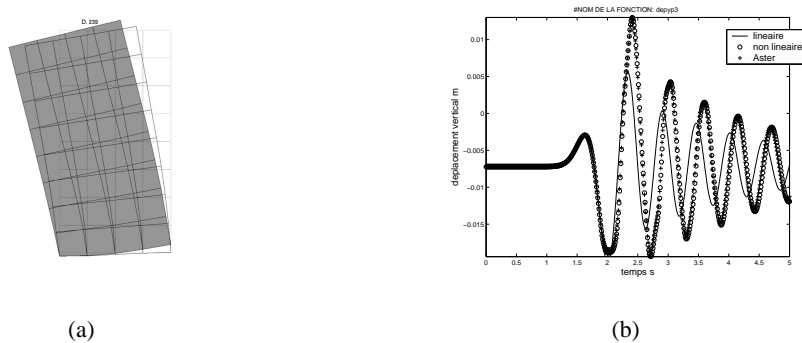


Figure 2. (a) Déformée : linéaire en blanc, non linéaire en gris, statique en pointillé
(b) Comparaison des déplacements TF avec un algorithme incrémental.

une modélisation effectuée dans le *Code_Aster*. Elle a donnée des résultats quasiment identiques du point de vue déplacements (fig. 2b) ou du point de vue accélérations (fig. 3).

5. Conclusion

La méthode présentée ici permet de coupler éléments finis et éléments de frontière en considérant le décollement possible entre chaque domaine (en quelques points de

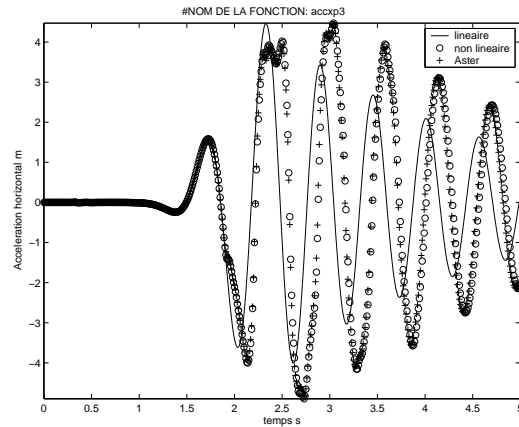


Figure 3. Accélérations pour un point au sommet du bâtiment, comparaison TF et algorithme incrémental

l'interface). Les résultats sont encourageants mais des tests plus complets sont encore nécessaires pour valider son exploitation. En effet, l'utilisation de ce type d'algorithme est encore peu répandu, et le retour d'expérience est faible. Il faut envisager encore notamment des tests sur une impédance fréquemment dépendante mais également une projection modale pour réduire la taille des systèmes envisagés.

6. Bibliographie

- [CLO 02] CLOUTEAU D., DEVESA G., « Décollement des fondations sous séisme : méthodes temporelles et temps/fréquence. », *Revue européenne des éléments finis*, 2002, p. 45-59.
- [DAR 88] DARBRE G. R., WOLF J. P., « Criterion of stability and implementation issues of hybrid frequency-time-domain procedures for non-linear dynamic analysis », *Earthquake Engineering and structural dynamics*, vol. 16, 1988, p. 569-581.
- [KAW 83] KAWAMOTO J. D., « Solution of nonlinear dynamic structural systems by a Hybrid Frequency-Time domain approach », *Research report R 83-5, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA*, , 1983.
- [SAV 02] SAVIDIS A., BODE C., « Soil Structure Interaction due to moving loads », *Wave 2002*, Chouh and Schmid, 2002, p. 47-59.
- [WOL 88] WOLF J., *Soil-Structure Interaction Analysis in Time Domain*, Prentice Hall, 1988, 4eme édition.