



**HAL**  
open science

# Méthodes efficaces et robustes pour traiter des non-linéarités sur cas industriels en interaction sol-structure

Georges Devesa, Nicolas Greffet

► **To cite this version:**

Georges Devesa, Nicolas Greffet. Méthodes efficaces et robustes pour traiter des non-linéarités sur cas industriels en interaction sol-structure. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01420722

**HAL Id: hal-01420722**

**<https://hal.science/hal-01420722>**

Submitted on 20 Dec 2016

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Méthodes efficaces et robustes pour traiter des non - linéarités sur cas industriels en interaction sol-structure

G. Devesa<sup>1</sup>, N. Greffet<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> EDF-R&D

1, Avenue Général de Gaulle – 92141 Clamart Cedex  
{georges-cc.devesa, nicolas.greffet}@edf.fr

---

## Résumé –

Pour le traitement efficace de cas industriels en Interaction sol-structure (ISS) comme le décollement de radier, a été développée la méthode numérique « Temps-Fréquence » où les non-linéarités localisées sont représentées par des résidus qui viennent corriger l'équation d'équilibre globale en temps, au cours d'un processus itératif résolu en fréquentiel. On a pu améliorer significativement l'industrialisation de cette approche sur des cas 3D par la combinaison d'une méthode de condensation et d'une approche alternative simplifiée strictement temporelle.

**Mots clés** – Non-linéarité, Interaction sol-structure, Temps-Fréquence, Condensation.

---

## 1 Contexte de l'utilisation de méthodes Temps-Fréquence

### 1.1 Description de la méthode Temps-Fréquence classique

Afin de pouvoir traiter efficacement certains types de non-linéarités en Interaction sol-structure (ISS), il est nécessaire de développer une méthode numérique adaptée. L'approche ISS totalement EF est très coûteuse dans le cadre ISS de par la nécessité de devoir mailler un volume suffisamment grand de domaine de sol. De plus, le problème non linéaire d'ISS sera résolu classiquement par intégration en temps et il sera alors difficile d'utiliser directement un modèle fréquentiel (impédance) de sol. Pour les cas où les non-linéarités sont localisées, comme le décollement de radier, et si l'on veut utiliser une description fréquentielle d'un modèle de sol éventuellement stratifié, une méthode particulière d'ISS est proposée ([1], [2]). C'est l'approche dite « Temps-Fréquence » où on essaie de traiter la plus grande partie du problème de manière fréquentielle (linéarité globale). Le bâtiment est discrétisé en éléments finis, alors que le domaine semi-infini de sol peut-être représenté par une impédance de sol dépendante de la fréquence ou par un tapis de ressorts de sol équivalent. Les non-linéarités dues au décollement de radier sont représentées par des résidus sous formes d'efforts imposés qui viennent corriger l'équation d'équilibre globale, au cours d'un processus itératif.

Tous les problèmes globaux linéaires sont résolus sur base modale et dans le domaine fréquentiel. Les étapes non linéaires sont, elles, obligatoirement calculées en temporel. On a donc, à chaque itération des passages temporel-fréquentiel à faire (par FFT), d'où le nom de la méthode. Du fait du traitement en partie fréquentiel, la méthode de résolution n'est pas à strictement parler du type incrémental, comme on le rencontre en temporel. Mais à chaque itération, on construit la solution approchée sur tout l'intervalle de temps d'étude. La convergence et la robustesse sont très dépendantes du choix des directions de recherches (corrections à chaque itération calculées avec un opérateur « tangent » moyenné sur tout ou partie de l'intervalle d'étude). Ce point a été appréhendé au travers de cas-tests représentatifs, en 2D puis en 3D.

On rappelle juste que le contact est traité par une technique simple de pénalisation, pour, d'une part faciliter le développement et, d'autre part, régulariser la solution. Pour améliorer la convergence, on a développé une stratégie de fenêtrage : on sous-découpe l'intervalle d'étude pour faciliter la convergence. Les bornes des fenêtres de sous-découpage sont choisies suffisamment loin des zones de décollement pour pouvoir assurer la continuité de la réponse entre intervalles de découpage lors du retour en temps par FFT inverse.

La méthode classique peut se schématiser comme sur la figure suivante :

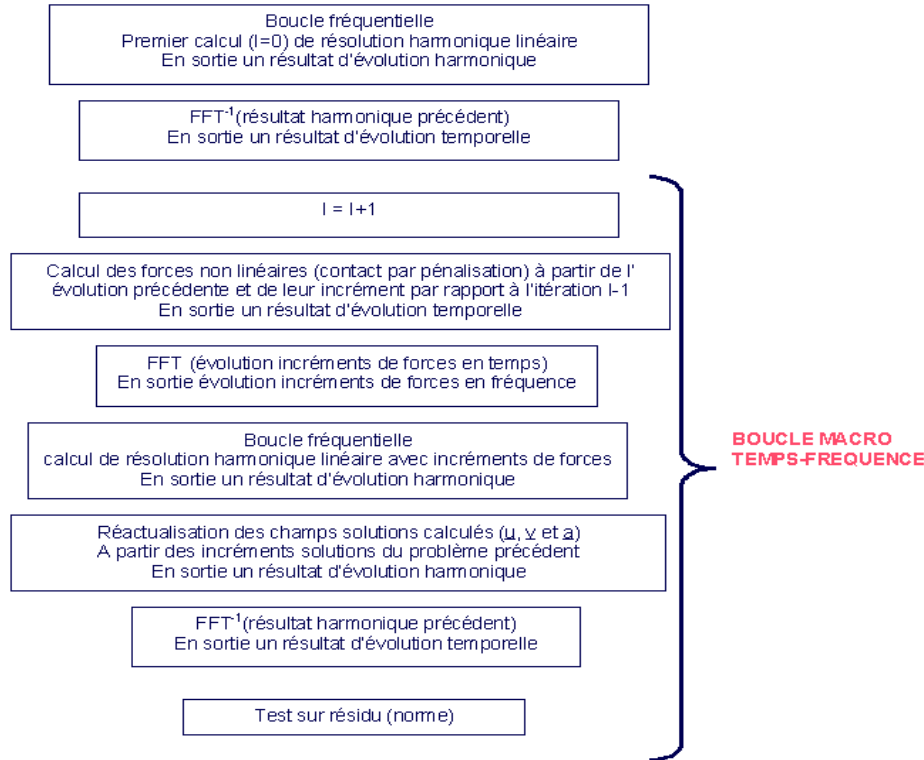


Figure 1 – schéma de la méthode Temps-Fréquence classique

## 1.2 Nécessité de méthodes alternatives à la méthode Temps-Fréquence

Malgré des résultats prometteurs pour les problèmes en 2D, la mise en œuvre de cette méthode a rencontré des difficultés sur des problèmes de taille significative en 3D, en particulier pour l'enceinte d'un bâtiment réacteur (BR) dont on a étudié le décollement sur un tapis de ressorts de sol. Ceci a conduit à s'interroger sur l'industrialisation de cette méthode utilisée telle quelle. La reprise de l'étude de cette méthode peut se justifier car depuis, on a pu traiter le décollement de cette structure 3D par une analyse dynamique temporelle pas à pas en obtenant des gains importants en performances et en coût de modélisation grâce notamment à l'introduction d'une méthode de condensation modale par sous-structuration dynamique. Une autre piste consiste à envisager une méthode alternative élaborée à partir d'une formulation simplifiée de l'expression du problème à résoudre dans la méthode Temps-Fréquence avec une variante strictement temporelle de cette méthode simplifiée. L'intérêt de cette étude sera alors l'apport de la combinaison de ces 2 pistes par rapport à l'utilisation de la méthode Temps-Fréquence classique pour pouvoir traiter le cas 3D industriel.

## 2 Introduction d'une méthode de condensation dynamique

On utilise avec la méthode Temps-Fréquence une méthode de condensation modale par sous-structuration dynamique conjointement à l'introduction comme sous-structure condensée de l'impédance de sol représentée par des matrices de rigidité et d'amortissement équivalents.

Cette méthode est dite de condensation modale car elle permet de condenser sur base modale des parties du modèle qui restent constamment linéaires et de limiter la résolution principale à la partie de modèle ayant des comportements non linéaires. Elle est implémentée dans un opérateur de calcul transitoire en dynamique non linéaire. Elle nécessite le calcul de bases modales de plusieurs sous-domaines linéaires donnant lieu à la création pour chacun d'un macro-élément dynamique. Pour chacun de ces sous-domaines, on calcule une base de modes propres et des modes statiques d'interface avec le modèle non linéaire. La résolution en temps s'opère sur un modèle mixte comprenant le modèle physique non linéaire et les modèles condensés dynamiquement des parties linéaires. Le nombre de degrés de liberté du système complet est donc celui du modèle physique non linéaire ajouté au nombre de l'ensemble des modes des sous-domaines linéaires. On peut considérer que la résolution s'effectue sur un espace physique comprenant le domaine non linéaire ainsi que les degrés de liberté d'interface entre le domaine non linéaire et les sous-domaines linéaires. En effet, on condense dynamiquement le comportement de ces domaines linéaires sur ces degrés d'interface et on y assemble algébriquement les termes des matrices de rigidité, masse, éventuellement amortissement, du domaine non linéaire aux termes des macro-éléments dynamiques au profil de stockage plein. Ces termes comprennent donc le complément de Schur pour la partie statique mais aussi les contributions des modes dynamiques qu'on associe à de nouveaux degrés de liberté d'interface « virtuels ». Cet artifice permettra la restitution sur base physique de résultats de champs cinématiques en n'importe quel point du modèle complet.

### 3 Méthodes de résolutions alternatives à la méthode Temps-Fréquence classique

#### 3.1 Variations par rapport à la méthode Temps-Fréquence classique

L'expression du problème résolu dans la méthode Temps-Fréquence a été modifiée sous une forme simplifiée afin de permettre également d'utiliser la méthode alternative strictement temporelle. Le principe consiste à résoudre à chaque itération  $i$  de la méthode sur la fenêtre temporelle le problème linéaire obtenu en recalculant à chaque fois le nouveau déplacement total et en corrigeant le second membre des forces extérieures avec un incrément de forces dues à la prise en compte de non-linéarités et calculées à partir du déplacement total de l'itération précédente  $i-1$ . Soit :

$$KX_i + MX''_i + F_{nl}(X_{i-1}, X'_{i-1}) = F_{ext} \Leftrightarrow KX_i + MX''_i = F_{ext} - F_{nl}(X_{i-1}, X'_{i-1}) \quad (1)$$

Il y a une petite différence avec la méthode Temps-Fréquence classique car cette méthode n'est pas incrémentale puisqu'on ne calcule pas une différence de déplacements entre 2 itérations de la méthode. On se contente de réévaluer directement le champ de déplacements total par résolution d'un problème linéaire après avoir réévalué seulement le second membre. Les opérateurs de résolution sont donc toujours les mêmes à chaque itération de la méthode et on n'a pas à utiliser un éventuel opérateur tangent pour la résolution de l'incrément de déplacement ni à faire de combinaison de résultats entre 2 itérations de la méthode.

A chaque étape, on résout donc le même problème linéaire avec un second membre corrigé. Cette méthode peut donc tout aussi bien être résolue en fréquentiel qu'en temporel. Comme dans la méthode Temps-Fréquence classique, le terme de correction du second membre est d'abord évalué en temporel avant un éventuel retour par FFT en fréquentiel.

Ce terme de correction  $F_{nl}(X_{i-1}, X'_{i-1})$  représente l'incrément de forces internes dues à la présence d'un comportement non linéaire par rapport aux forces internes calculées avec un comportement linéaire. Dans le cas d'application qui a servi à valider la méthode Temps-Fréquence classique : l'étude de décollements dynamiques de fondations, on se retrouve dans le cas favorable de non-linéarités localisées où en plus cette force correctrice ne dépend que du champ de déplacements et éventuellement des champs de vitesse et d'accélération.

Dans les zones susceptibles de décoller, dès qu'à un instant on se trouve en traction, on doit alors annuler la force de liaison. La force de correction  $F_{nl}$  sera donc à ces endroits une force de compression s'opposant exactement à la force linéaire de traction calculée à partir de l'état de déplacements de l'itération précédente. Rejetée au second membre en changeant son signe, cette force de correction redevient une force de traction supplémentaire qui va donc avoir pour effet d'augmenter le décollement par rapport à l'étape précédente. A la première itération, on part comme dans la méthode classique de la solution du problème purement linéaire où le décollement est sous-estimé. On observera lors des itérations suivantes une progression du décollement jusqu'à sa stabilisation.

On n'a pas spécialement statué ici sur un critère d'arrêt obtenu à partir d'une norme du résidu dont on n'a pas non plus discuté de la nature : valeur cumulée ou maximum sur la fenêtre de temps ? En fait, la solution se stabilise logiquement quand la force de correction du second membre se stabilise et celle-ci est directement reliée en proportion au décollement de la fondation. Il apparaît donc le plus simple de considérer comme critère d'arrêt la convergence du déplacement de décollement là où il est maximum dans l'espace et sur la fenêtre temporelle.

### 3.2 Modifications dans l'implantation de la méthode Temps-Fréquence et de la méthode alternative temporelle

L'organigramme d'implantation décrit au §1.1 est simplifié du fait des modifications de traitement de la méthode Temps-Fréquence et de la méthode alternative temporelle. Dans la nouvelle méthode Temps-Fréquence simplifiée, on a presque le même organigramme à la différence près qu'on n'a plus besoin de réactualiser les champs solutions de déplacement, vitesse et accélération puisqu'on les calcule directement à la fin de l'étape.

Avec la méthode alternative temporelle, la simplification va encore plus loin puisqu'on n'a pas besoin de faire une transformée FFT puisqu'on reste en permanence dans le domaine temporel. La principale modification consiste dans l'utilisation de l'opérateur transitoire à la place de l'opérateur harmonique comme opérateur de résolution du problème linéaire modifié.

Le calcul de la force de correction  $F_{nl}$  peut être étendu à tout comportement autre que le décollement quand la force de pénalisation peut s'exprimer par une loi en déplacement ou vitesse comme par exemple pour les appuis de type anti-sismique.

L'organigramme de la méthode temporelle simplifiée devient alors comme ci-dessous :

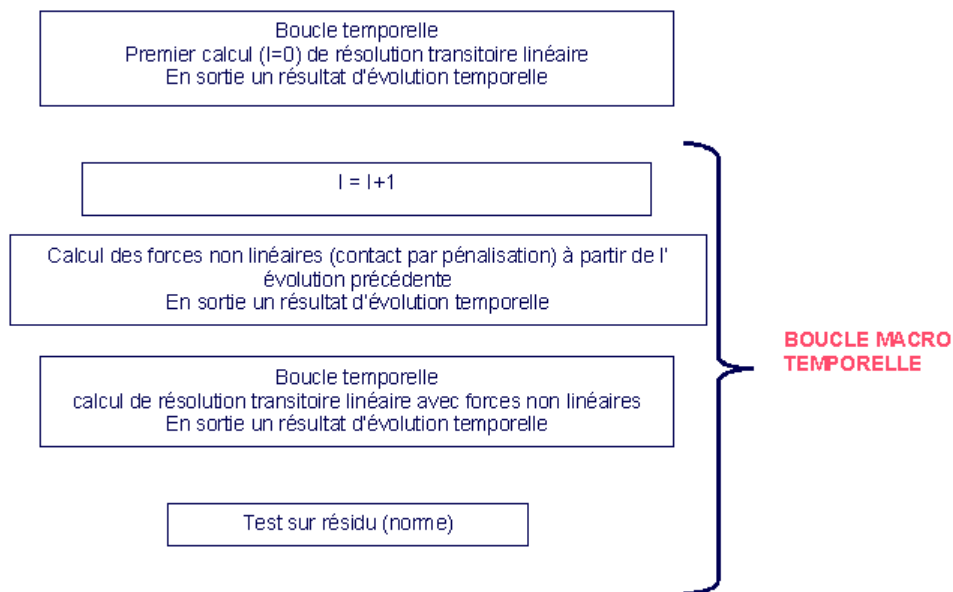


Figure 2 : organigramme de la méthode temporelle simplifiée

## 4 Application et évaluation des méthodes temps-fréquence et temporelle avec condensation modale à un cas industriel 3D

Ces méthodes conjointement à la condensation modale ont été appliquées au cas tenté pour la validation en 3D de la méthode Temps-Fréquence classique : l'enceinte interne d'un bâtiment réacteur et de sa fondation soumis à une excitation sismique mono-appui en accélération imposée d'amplitude 0.35 g (figure 3).

La mise en œuvre de la condensation modale sur la structure de bâtiment comportant environ 10000 degrés de liberté a déjà permis sur un cas d'étude transitoire pas à pas sur 5 secondes par pas de 0.01 de réduire d'un facteur 4 le temps de calcul sur le modèle complet par rapport au calcul sur le modèle condensé.

Si on procède à une première synthèse des comparaisons sur les résultats et les performances des méthodes simplifiées temps-fréquence et strictement temporelle à partir de ce cas 3D, on peut conclure dans un premier temps que la méthode temporelle est beaucoup plus économique en terme de performances : soit encore un gain de facteur 4 sur le temps de calcul par rapport à la méthode Temps-Fréquence ou à une analyse non linéaire pas à pas. On peut donc commencer à utiliser cette méthode pour avoir une idée globale du résultat, surtout pour une non-linéarité modérée. Toutefois, on peut également recommander la méthode de résolution fréquentielle car elle permettrait dans ce cas d'améliorer la représentation du sol par une impédance en tenant compte de sa variation en fonction de la fréquence.

On conclut donc, pour les 2 méthodes simplifiées, l'intérêt constaté sur ce cas, en termes d'économie et de performances, de leur utilisation associée à la condensation dynamique du bâtiment et à une meilleure représentation du sol, ce qui a permis d'obtenir après 6 étapes une solution de décollement (maximum de déplacement vertical positif sur la fondation) stabilisée proche de la solution non linéaire pas à pas (cf. figure 4). Enfin, leur intérêt commun d'analyse par rapport à la méthode Temps-Fréquence classique, outre la robustesse, demeure de s'affranchir de la stratégie de choix d'opérateur tangent sur tout ou partie de l'intervalle d'étude.

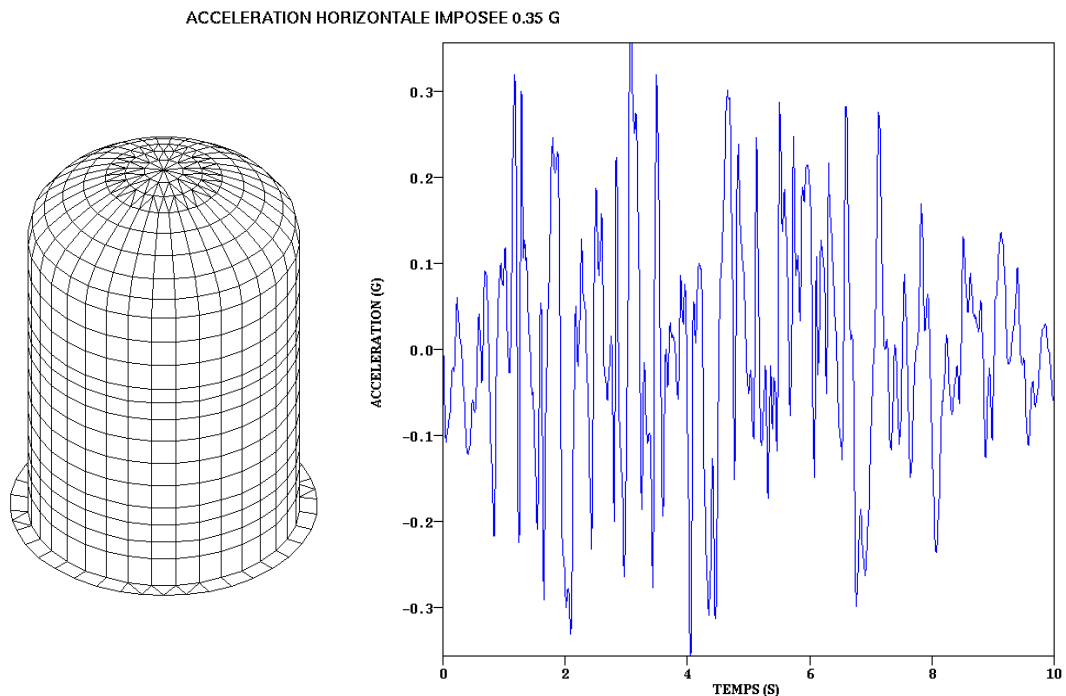
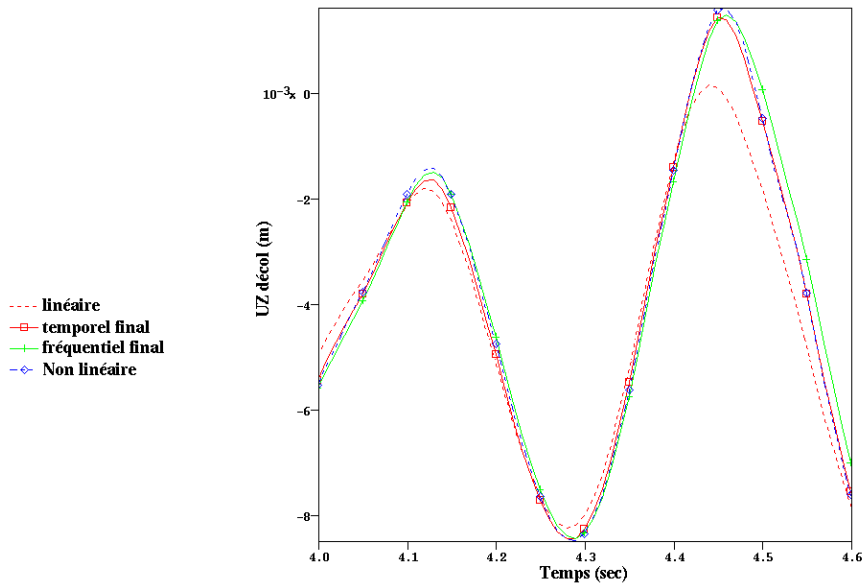


Figure 3 : décollement d'une enceinte de BR sous séisme : structure (g) et excitation (d)

ENCEINTE INTERNE BR AVEC SIGNAL SISMIQUE 0.35 G  
 Comparaison Méthodes d'analyse



ENCEINTE INTERNE BR AVEC SIGNAL SISMIQUE 0.35 G  
 Convergence méthode fréquentielle avec l'itération

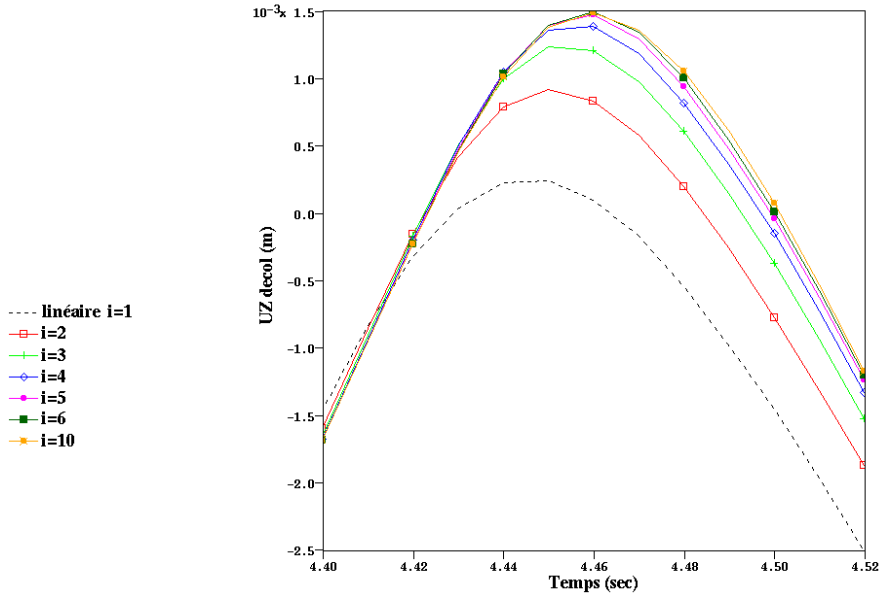


Figure 4 : décollement d'une enceinte de BR sous séisme : comparaison (h) et convergence (b) de la méthode itérative linéaire

## Références

- [1] C. Obrebski, D. Clouteau & N. Greffet, « *Time-Frequency domain analysis in non linear dynamic soil-structure interaction* », Proceedings of the 6th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2005, Vol. 2, p. 1255-1260, Paris, September 4-7, 2005
- [2] N. Greffet, C. Obrebski & D. Clouteau, « *New efficient numerical method for non linear seismic SSI simulation* », Int. Conf. on computational Methods for coupled Problems in Science and engineering, Coupled Problem in Science and Engineering, Santorin 2005.