

Simulation hybride de l'interaction sol-structure non linéaire sous excitation sismique via une approche de décomposition en sous-domaines

Hybrid simulation of nonlinear soil-structure interaction under seismic excitation using a subdomain decomposition approach

Fatima OSMAN^{1,2*}, Sijia LI¹, Walid LARBI¹, Naim AYOUB², Rawad ASSAF², Joseph PAIS²

1 Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), Laboratoire de Mécanique des Structures et des Systèmes Couplés (LMSSC), Paris, France

2 Graitec Innovation, Paris, France

*[*fatima.osman@lecnam.net](mailto:fatima.osman@lecnam.net)*

RESUME : Cette étude se concentre sur l'interaction sol-structure (ISS) sous excitation sismique, à l'aide d'une méthode hybride directe. Classiquement, un schéma implicite est privilégié en dynamique des structures afin de prendre en compte les non-linéarités matérielles, tandis qu'un schéma explicite s'avère plus efficace pour l'étude de la propagation des ondes dans le sol. Dans ce contexte, une méthode hybride directe est proposée, dans laquelle le couplage par sous-domaines associe un schéma implicite de Newmark pour la structure et un schéma explicite pour le sol. Les séismes engendrent des impacts répétés entre le sol et la fondation, induisant un comportement non linéaire à l'interface. Afin de modéliser ce contact non linéaire, le nouvel algorithme hybride traite le contact à l'interface en respectant les conditions HSM, par l'introduction de multiplicateurs de Lagrange sous forme d'impulsions dans les équations dynamiques de chaque sous-domaine. L'algorithme est validé sous MATLAB à travers deux applications. Dans un premier temps, un problème de référence unidimensionnel de deux barres en contact met en évidence une bonne concordance avec l'approche entièrement explicite. Dans un second temps, un cas bidimensionnel de contact sol-fondation confirme la performance de la méthode proposée, notamment en termes de précision et de réduction du temps de calcul. Ce travail fournit un cadre robuste et efficace pour la simulation de problèmes d'ISS non linéaires dans le domaine temporel.

ABSTRACT : This study focuses on soil-structure interaction (SSI) under seismic excitation, using a direct hybrid method. Traditionally, an implicit scheme is preferred in structural dynamics to account for material nonlinearities, while an explicit scheme is more effective for modeling wave propagation in soils. In this context, a direct hybrid approach is proposed, in which the subdomain coupling strategy combines an implicit Newmark scheme for the structure with an explicit scheme for the soil. Earthquakes induce repeated impacts between the soil and the foundation, leading to nonlinear behavior at the interface. To address this challenge, the proposed hybrid formulation enforces the Hertz-Signorini-Moreau (HSM) contact conditions by introducing Lagrange multipliers in the form of impulses within the dynamic equations of each subdomain. The algorithm is implemented and validated in MATLAB through two applications. First, a one-dimensional benchmark problem involving two bars in contact shows good agreement with the full explicit approach. Subsequently, a two-dimensional soil-foundation contact problem confirms the performance of the proposed method, particularly in terms of accuracy and computational efficiency. This work provides a robust and efficient framework for the simulation of nonlinear SSI problems in the time domain.

Mots-clés : Interaction sol-structure ; méthode hybride directe ; contact non-linéaire ; décomposition en sous-domaines.

1 INTRODUCTION

L'étude de l'interaction sol-structure (ISS) et de ses effets sur la réponse des ouvrages soumis à une excitation sismique est un aspect essentiel de la conception structurelle. Lors d'un séisme, la fondation et le sol environnant peuvent entrer en contact ou se

séparer à plusieurs reprises, générant un comportement dynamique non linéaire. La principale difficulté réside dans la modélisation de ces non-linéarités de contact, qui apparaissent de manière intrinsèque dans ce type de phénomènes. Seuls quelques cas simples peuvent être résolus analytiquement ; dans la plupart des situations, il est nécessaire de recourir à des approches

numériques, notamment à la méthode des éléments finis (EF) (Acary, 2016; Fahad et al., 2022).

La littérature sur l'analyse par éléments finis (EF) des problèmes de contact (Laursen, 2003) met en évidence deux approches principales : la méthode de la pénalité et la méthode du multiplicateur de Lagrange. L'approche par pénalité (Huněk, 1993) est largement utilisée dans les logiciels d'éléments finis en raison de sa simplicité et de sa rapidité de mise en œuvre. Toutefois, elle manque de précision pour les problèmes de contact mécanique, car elle ne satisfait pas strictement les conditions de contact entre deux corps et autorise une certaine pénétration, dépendante du choix du paramètre de pénalité.

Le principe de la méthode des multiplicateurs de Lagrange (Papadopoulos and Solberg, 1998) repose sur l'introduction de degrés de liberté supplémentaires dans l'équation du mouvement semi-discrétisée afin de traiter le problème de contact dynamique, discret dans l'espace mais continu dans le temps. Bien que cette formulation entraîne une augmentation du coût de calcul, elle permet une meilleure précision, les conditions de contact y étant imposées de manière stricte. Un avantage majeur, par rapport à la méthode de pénalité, réside dans l'absence de tout paramètre numérique additionnel, tel que le coefficient de pénalité.

Dans la littérature, des schémas explicites de différences centrées (Carpenter et al., 1991; Fekak et al., 2017) ainsi que des schémas implicites (Armero and Petöcz, 1998; Leine et al., 2009; Moreau, 1999; Simo et al., 1992; Simo and Tarnow, 1992) ont été utilisées pour intégrer les équations de contact discrétisées. La méthode des multiplicateurs de Lagrange a été appliquée à des problèmes de contact au sein d'un seul domaine, soit à l'aide d'un schéma explicite de différence centrée, soit à l'aide d'un schéma implicite.

Dans cette étude, le contact entre la fondation et le sol soumis à une excitation sismique est analysé, comme illustré par la Figure 1, qui présente la fondation, la structure et le sol environnant. Des couches absorbantes de type Kosloff sont également utilisées pour atténuer les ondes parasites et éliminer les réflexions aux limites du domaine (Li et al., 2019). En dynamique des structures, les schémas d'intégration temporelle implicites sont traditionnellement employés pour traiter les non-linéarités matérielles avec la méthode de Newton-Raphson. En revanche, pour les problèmes de propagation d'ondes dans les sols, les schémas explicites sont privilégiés en raison de leur efficacité numérique et de leur simplicité de mise en œuvre.

Cette différence dans les schémas d'intégration temporelle motive le développement d'une méthode

hybride de couplage entre sous-domaines pour traiter le contact non linéaire entre le sol, intégré avec un schéma explicite, et la fondation, intégrée avec un schéma implicite. Des multiplicateurs de Lagrange sont introduits à l'interface entre les deux sous-domaines afin d'assurer le respect des conditions de contact. Cette approche se distingue notamment de la méthode récente proposée par (Fekak et al., 2017), dans laquelle un schéma explicite est appliqué à l'ensemble de la zone de contact tandis qu'un schéma implicite est utilisé pour le domaine sans contact, la continuité cinématique étant assurée par la méthode GC proposée par (Combesure et al., 2009).

Tout d'abord, la section 2 présente les conditions de Signorini pour le contact unilatéral, ainsi que la discrétisation temporelle de la méthode de couplage explicite/implicite développée pour traiter les problèmes d'impact et de contact. La section 3 est ensuite consacrée à la validation de l'algorithme au moyen de deux applications numériques réalisées sous MATLAB. Le premier cas d'étude correspond à un problème de référence impliquant deux barres en contact, permettant d'évaluer la méthode lorsqu'elle associe différents schémas d'intégration temporelle dans les deux sous-domaines. Le second concerne un problème d'interaction sol-fondation sous chargement gravitationnel, dont les résultats sont comparés à une solution de référence obtenue à l'aide d'un calcul entièrement explicite.

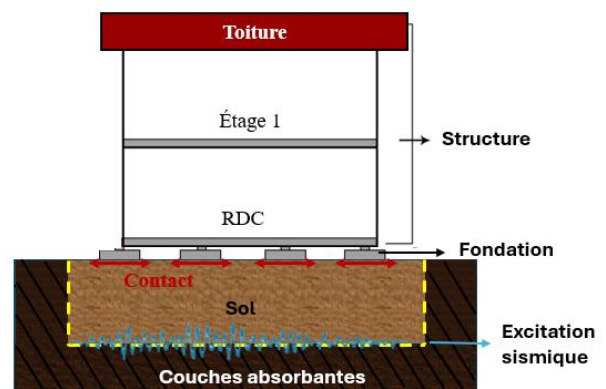


Figure 1. Modèle d'interaction sol-structure montrant le contact à l'interface et les couches absorbantes.

2 METHODE HYBRIDE DE COUPLAGE DE SOUS-DOMAINES POUR LES PROBLEMES IMPACT/CONTACT

Dans cette section, les conditions de contact unilatéral entre deux corps déformables en contact sont d'abord présentées. La discrétisation temporelle de la méthode de couplage explicite/implicite, proposée afin de modéliser avec précision le comportement d'interaction sol-structure, est ensuite décrite. Dans cette nouvelle formulation, le sol est intégré à l'aide du

schéma de différences centrées, en raison de sa simplicité et de son efficacité pour la modélisation de la propagation des ondes, tandis que la fondation est intégrée par un schéma de Newmark implicite afin de prendre en compte les non-linéarités matérielles et géométriques.

2.1 Formulation des conditions du contact unilatérales

On considère les contraintes de contact unilatéral entre deux corps déformables en interaction, notés Ω_1 et Ω_2 , comme illustré à la Figure 2. Les domaines Ω_1 et Ω_2 représentent les configurations des corps déformables, tandis que $\Gamma_{N,\alpha}$ et $\Gamma_{D,\alpha}$ désignent respectivement les conditions aux limites de Neumann et de Dirichlet associées à chaque corps ($\alpha = 1, 2$). Les interfaces de contact entre les deux corps sont notées $\gamma_{C,1}$ et $\gamma_{C,2}$.

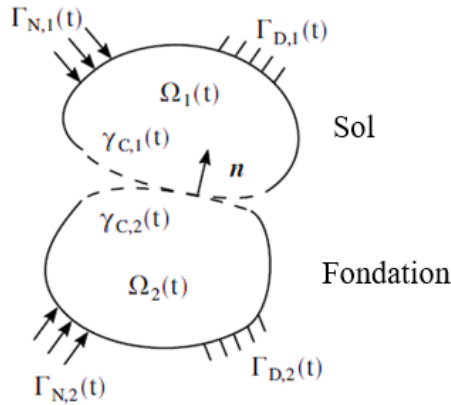


Figure 2. Deux corps déformables en contact : Ω_1 et Ω_2 .

Dans la direction normale, pour l'ensemble des points de contact, les conditions de contact s'écrivent comme suit :

$$g_N = [(\underline{X}_2 + \underline{u}_2) - (\underline{X}_1 + \underline{u}_1)] \cdot \underline{n}_1 \geq 0 \quad (1)$$

$$\tau_N = \underline{\sigma}_\alpha \cdot \underline{n}_\alpha \cdot (-\underline{n}_\alpha) \geq 0, \alpha = 1, 2 \quad (2)$$

$$g_N \cdot \tau_N = 0 \quad (3)$$

Où $\underline{\sigma}_\alpha$ désigne le tenseur des contraintes de Cauchy dans le domaine Ω_α , \underline{X}_α et \underline{u}_α représentent respectivement les coordonnées initiales et le champ de déplacement des nœuds de contact appartenant à $\gamma_{C,1} \cup \gamma_{C,2}$, et \underline{n}_α est le vecteur normal à $\gamma_{C,\alpha}$ ($\alpha = 1, 2$).

La première inégalité (1) définit la condition de non-pénétration entre deux corps. Le terme g_N est appelé le gap. L'inégalité (2) exprime la condition de non-traction au niveau de l'interface de contact : les corps sont soit inactifs l'un vis-à-vis de l'autre, soit en compression ($\tau_N < 0$). L'équation (3) est la condition

de complémentarité, indiquant que les deux corps sont soit séparés ($\tau_N = 0, g_N > 0$), soit en contact ($g_N = 0, \tau_N < 0$). L'ensemble de ces relations constitue les conditions de Hertz–Signorini–Moreau (HSM).

Ces conditions peuvent être reformulées en termes de vitesse, comme indiqué à l'équation (4), où i_N désigne l'impulsion de contact et \dot{g}_N la composante normale de la vitesse relative :

$$\begin{cases} si \ g_N > 0, i_N = 0 \\ si \ g_N = 0, \begin{cases} \dot{g}_N = (\dot{\underline{u}}_2 - \dot{\underline{u}}_1) \cdot \underline{n}_1 \geq 0 \\ i_N \leq 0 \\ \dot{g}_N \cdot i_N = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 Discrétisation temporelle de la méthode de couplage hybride pour le contact entre sous-domaines explicites et implicites

Les schémas d'intégration temporelle implicites sont couramment utilisés en dynamique des structures afin de traiter les non-linéarités géométriques et matérielles, tandis que les schémas explicites sont privilégiés pour les problèmes de propagation d'ondes dans les sols, en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur efficacité numérique. Dans ce contexte, une approche hybride de couplage par sous-domaines est proposée pour modéliser le contact non linéaire entre le sol et la structure, dans laquelle le sol (Ω_1) est intégré à l'aide d'un schéma temporel explicite, tandis que la fondation (Ω_2) est intégrée à l'aide d'un schéma implicite.

En partant de la méthode des éléments finis (EF), et en s'appuyant sur les conditions de contact entre deux corps déformables, l'équation semi-discrète de la dynamique de contact non régulière pour un problème de contact/impact s'écrit sous la forme :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(t) = \mathbf{F}_{ext}(t) + \mathbf{F}_c(t) \quad (5)$$

où \mathbf{M} , \mathbf{C} et \mathbf{K} sont respectivement les matrices de masse, d'amortissement et de raideur. Les vecteurs $\mathbf{F}_{ext}(t)$ et $\mathbf{F}_c(t)$ représentent les forces extérieures et les forces de contact. $\mathbf{U}(t)$, $\dot{\mathbf{U}}(t)$ et $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ correspondent respectivement aux vecteurs de déplacements, vitesses et accélérations.

2.2.1 Intégration temporelle explicite dans le sous-domaine (Ω_1)

En appliquant le schéma explicite de différences centrées à l'équation (5), l'équation d'équilibre discrétisée de la dynamique non régulière dans le sous-domaine 1 s'écrit :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{1,lump} \dot{\mathbf{U}}_1^{n+\frac{1}{2}} &= \mathbf{M}_{1,lump} \dot{\mathbf{U}}_1^{n-\frac{1}{2}} + \mathbf{I}_1^n + \\ \Delta t \left(\mathbf{F}_1^{ext,n} - \mathbf{K}_1 \mathbf{U}_1 - \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{U}}_1^{n-\frac{1}{2}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Le terme $\mathbf{I}_1^n = \mathbf{L}_1^T \boldsymbol{\lambda}^n$ représente l'impulsion d'impact dans le sous-domaine 1, \mathbf{L} étant la matrice booléenne localisant les points de contact entre les sous-domaines Ω_1 et Ω_2 , et $\boldsymbol{\lambda}$ désigne le vecteur des multiplicateurs de Lagrange.

La partie régulière de la vitesse, notée $\dot{\mathbf{U}}_1^{free,n+\frac{1}{2}}$, est calculée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{1,lump} \dot{\mathbf{U}}_1^{free,n+\frac{1}{2}} &= \mathbf{M}_{1,lump} \dot{\mathbf{U}}_1^{n-\frac{1}{2}} + \\ \Delta t \left(\mathbf{F}_1^{ext,n} - \mathbf{K}_1 \mathbf{U}_1 - \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{U}}_1^{n-\frac{1}{2}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

d'où:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{U}}_1^{free,n+\frac{1}{2}} &= \dot{\mathbf{U}}_1^{n-\frac{1}{2}} + \Delta t (\mathbf{M}_{1,lump})^{-1} \\ \left(\mathbf{F}_1^{ext,n} - \mathbf{K}_1 \mathbf{U}_1 - \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{U}}_1^{n-\frac{1}{2}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

La contribution non régulière de la vitesse due au contact, notée $\dot{\mathbf{U}}_1^{contact,n+\frac{1}{2}}$, est alors donnée par :

$$\dot{\mathbf{U}}_1^{contact,n+\frac{1}{2}} = (\mathbf{M}_{1,lump})^{-1} \mathbf{L}_1^T \boldsymbol{\lambda}^{n+\frac{1}{2}} \quad (9)$$

2.2.2 Intégration temporelle implicite dans le sous-domaine (Ω_2)

Pour le sous-domaine 2 correspondant à la fondation, l'équation (5) est intégrée à l'aide du schéma implicite de Newmark, avec les paramètres $\gamma = 0,5$ et $\beta = 0,25$, assurant une stabilité inconditionnelle du schéma. L'équation d'équilibre discrétisée s'écrit alors sous la forme :

$$\begin{aligned} \widehat{\mathbf{M}}_2 (\dot{\mathbf{U}}_2^{n+1} - \dot{\mathbf{U}}_2^n) &= \gamma \Delta t (\mathbf{F}_2^{ext,n+1} - \\ \mathbf{K}_2 \mathbf{U}_2^p - \mathbf{C}_2 \dot{\mathbf{U}}_2^p) + \gamma \mathbf{I}_2^{n+1} \end{aligned} \quad (10)$$

Où \mathbf{U}_2^p et $\dot{\mathbf{U}}_2^p$ désignent respectivement les déplacements et les vitesses prédits à l'aide du prédicteur de Newmark, et \mathbf{I}_2^{n+1} représente l'impulsion de contact appliquée au sous-domaine 2.

Avec $\widehat{\mathbf{M}}_2 = \mathbf{M}_2 + \beta \Delta t^2 \mathbf{K}_2 + \gamma \Delta t \mathbf{C}_2$

La partie régulière de la vitesse dans le sous-domaine 2, notée $\dot{\mathbf{U}}_2^{free,n+1/2}$, est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{U}}_2^{free,n+1} &= \dot{\mathbf{U}}_2^n + \Delta t \gamma \widehat{\mathbf{M}}_2^{-1} \\ \left(\mathbf{F}_2^{ext,n+1} - \mathbf{K}_2 \mathbf{U}_2^p - \mathbf{C}_2 \dot{\mathbf{U}}_2^p \right) \end{aligned} \quad (11)$$

La contribution non régulière de la vitesse associée au contact $\dot{\mathbf{U}}_2^{contact,n+1}$ dans le schéma de Newmark s'écrit :

$$\dot{\mathbf{U}}_2^{contact,n+1} = \gamma \widehat{\mathbf{M}}_2^{-1} \Delta t \mathbf{F}_c^{n+1} \quad (12)$$

Lorsque les conditions de contact définies par les équations (1) à (3) sont satisfaites, la condition de continuité cinématique à l'interface entre les deux sous-domaines s'écrit :

$$\mathbf{L}_1 \dot{\mathbf{U}}_1^{n+1} + \mathbf{L}_2 \dot{\mathbf{U}}_2^{n+1} = 0 \quad (13)$$

Les multiplicateurs de Lagrange associés au contact normal sont alors obtenus en résolvant le système local d'impact/contact :

$$\mathbf{H} \boldsymbol{\lambda}^{n+1} = \mathbf{b}^{n+1} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \mathbf{b}^{n+1} = -\mathbf{L}_1 \dot{\mathbf{U}}_1^{free,n+1} - \mathbf{L}_2 \dot{\mathbf{U}}_2^{free,n+1} \\ \mathbf{H} = \mathbf{L}_1 (\mathbf{M}_{1,lump}) \mathbf{L}_1^T + \gamma \mathbf{L}_2 \widehat{\mathbf{M}}_2^{-1} \mathbf{L}_2^T \end{cases} \quad (15)$$

3 APPLICATIONS NUMERIQUES

Afin d'évaluer la robustesse ainsi que la précision de l'algorithme proposé, deux cas d'étude sont examinés. Le premier correspond à un problème de référence mettant en interaction deux barres identiques en contact, tandis que le second concerne l'analyse de l'interaction sol-fondation.

3.1 Deux barres identiques en contact

Étant donné que l'algorithme développé constitue une formulation nouvelle, il est pertinent d'entamer sa validation à l'aide de problèmes de référence bien établis, largement étudiés dans la littérature, et pour lesquels des solutions de référence exactes sont disponibles. Dans ce contexte, un problème d'impact unidimensionnel, couramment utilisé dans les travaux consacrés aux problèmes de contact et illustré à la Figure 3 (Hughes et al. 1976; Taylor & Papadopoulos 1993), est tout d'abord considéré.

Ce problème consiste en deux barres élastiques linéaires identiques se déplaçant initialement l'une vers l'autre avec la même vitesse. Les barres sont modélisées à l'aide des paramètres suivants : un module d'élasticité $E=2.1 \times 10^{11}$ Pa, une masse volumique $\rho=7847$ kg/m³, une longueur initiale $L=0.254$ m, une section transversale $A=0.645 \times 10^{-3}$ m², un gap initial $d=0.2$ mm, ainsi qu'une vitesse initiale $v_0=5$ m/s.

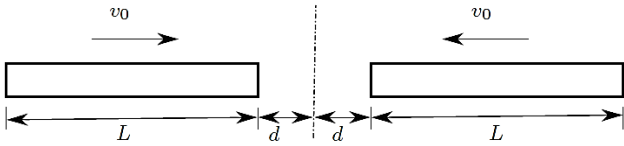


Figure 3. Deux barres identiques en contact

Une solution analytique complète pour ce problème est disponible dans la référence (Carpenter et al. 1991). Les barres sont discrétisées à l'aide de 20 éléments finis élastiques linéaires de longueur identique. Le pas de temps utilisé pour la résolution numérique est fixé à $\Delta t = 10^{-6}$ s.

Les résultats numériques sont obtenus en utilisant un schéma explicite de différences centrées pour la barre gauche, et un schéma implicite de Newmark pour la barre droite. Ils sont ensuite comparés à ceux issus d'un schéma entièrement explicite de différences centrées, tel que présenté par Fekak et al. (2017).

Les Figure 4 - 6, illustrent respectivement l'évolution du déplacement, de la vitesse et de la force de contact au niveau du nœud de contact de la barre gauche (barre 1) et de la barre droite (barre 2). En termes de déplacement, les résultats obtenus par l'algorithme hybride coïncident parfaitement avec ceux fournis par le schéma entièrement explicite (Figure 4). Un bon accord entre le schéma explicite complet et l'approche hybride est également observé en termes de vitesse et de forces de contact. Les oscillations mises en évidence sont similaires à celles rapportées par Serfözö & Pere (2022) lors de l'utilisation du schéma implicite de Newmark. Ces oscillations soulignent l'importance d'une analyse approfondie du bilan énergétique du nouvel algorithme, qui fera l'objet de travaux futurs. Les résultats obtenus demeurent néanmoins satisfaisants et confirment le potentiel de l'approche proposée pour l'étude des interactions sol-structure.

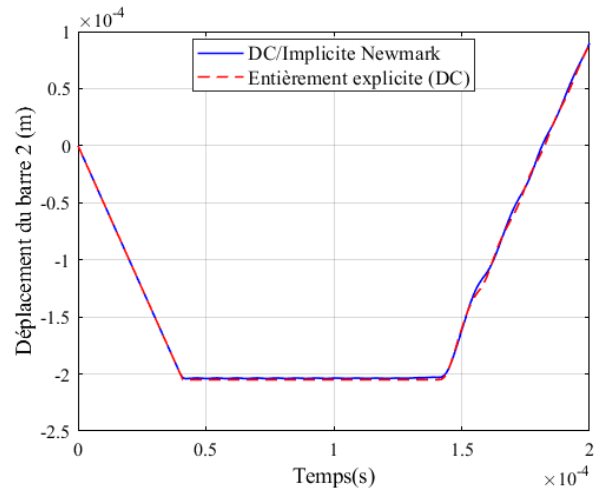
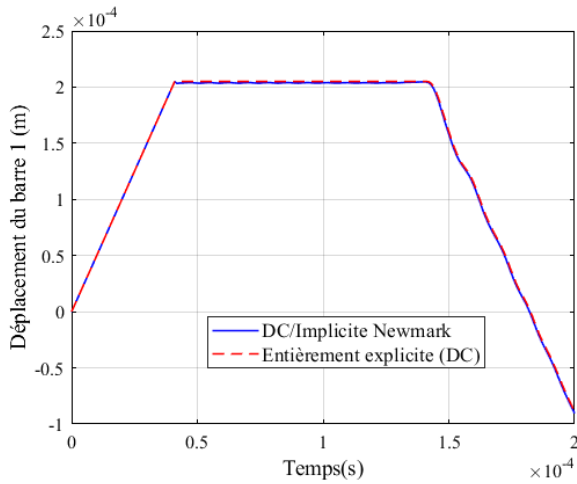


Figure 4. Déplacement du nœud de contact pour la barre gauche et la barre droite.

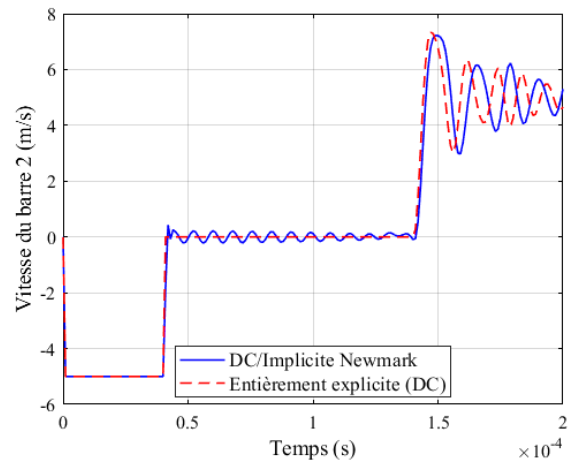
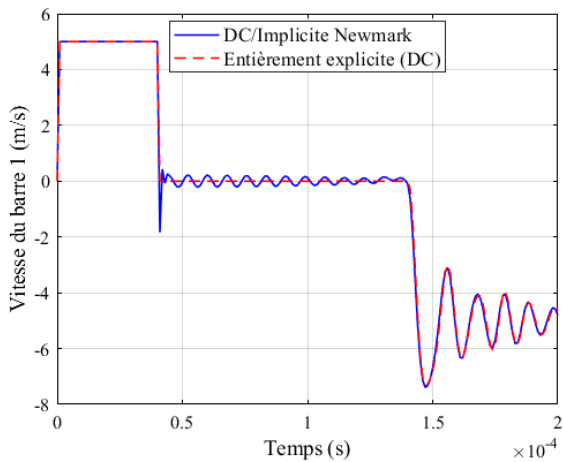


Figure 5. Vitesse du nœud de contact pour la barre gauche et la barre droite.

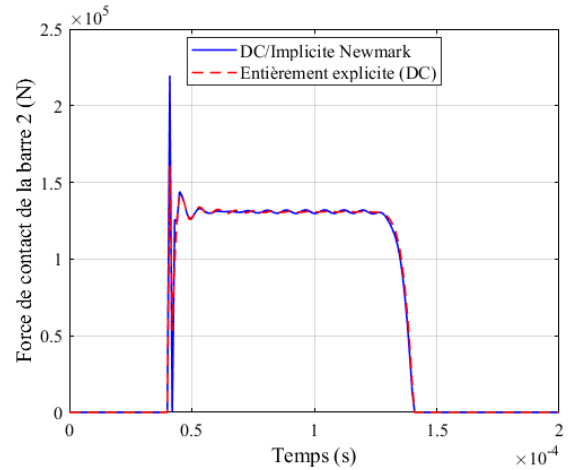
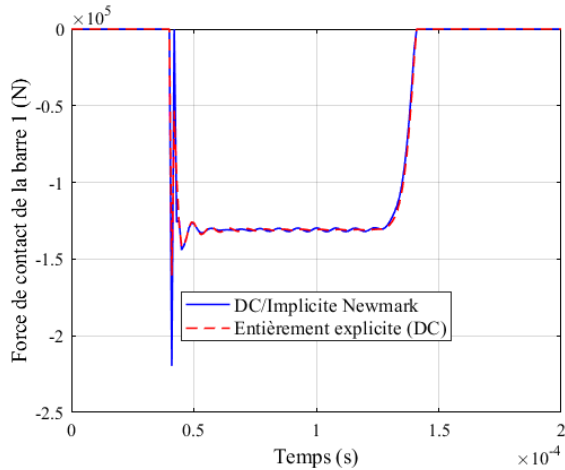


Figure 6. Force de contact au niveau du nœud de contact pour la barre gauche et la barre droite.

3.2 Problème d'interaction sol-fondation

Un problème bidimensionnel est à présent étudié (Figure 7). Il consiste en un domaine de sol multicouche, composé de deux couches superposées. La couche supérieure est caractérisée par un module d'Young $E_1=1000$ MPa, tandis que la couche inférieure possède un module $E_2=2000$ MPa. Les deux couches partagent le même coefficient de Poisson ($\nu = 0.24$), la même masse volumique ($\rho = 2500$ kg/m³), et une épaisseur identique ($L=125$ m). Sur la base de ces propriétés mécaniques, la vitesse des ondes de compression (ondes P) dans la première couche est estimée à environ 632 m/s.

Le modèle étant destiné à l'étude de l'interaction sol-structure sous excitation sismique, et devant représenter la propagation des ondes dans un domaine non borné, il est nécessaire d'assurer la dissipation des ondes à l'infini. Par conséquent, des couches absorbantes avec amortissement croissant (Absorbing Layers with Increasing Damping, ALID) sont mises en œuvre, comme illustré à la Figure 7.

Un maillage uniforme d'éléments finis est utilisé, constitué des éléments rectangulaires à quatre nœuds avec des fonctions de forme linéaires et une taille de maillage de 5 mètres.

Une fondation superficielle est implantée sur le sol, avec une longueur de 10 m et une épaisseur de 1 m. La taille de la maille dans la direction horizontale est cohérente avec celle du sol (5 m), tandis que dans la direction verticale, elle est fixée à 1 m. Le béton constituant la fondation correspond à la classe C20/25, avec un module de Young de 30 GPa et une masse volumique de 2400 kg/m³. Un point d'observation situé à $X=20$ m dans le sol est retenu afin de comparer les résultats numériques.

Dans ce type de problème, le modèle est d'abord soumis à une charge de gravité, qui doit être appliquée de manière progressive afin d'éviter l'apparition d'oscillations numériques lors de sa mise en place. Le chargement gravitaire dépendant du temps est ainsi défini par une augmentation linéaire de son intensité entre $t = 0$ s et $t = 10$ s jusqu'à la valeur nominale, après quoi il est maintenu constant.

Les déplacements horizontal et vertical au point d'observation sont présentés respectivement aux Figure 8 et 9. On observe clairement que les résultats obtenus avec le nouvel algorithme s'accordent très bien avec ceux de la méthode entièrement explicite traditionnelle. Par ailleurs, comme illustré à la Figure 10, les forces de contact totales sont identiques pour les deux algorithmes.

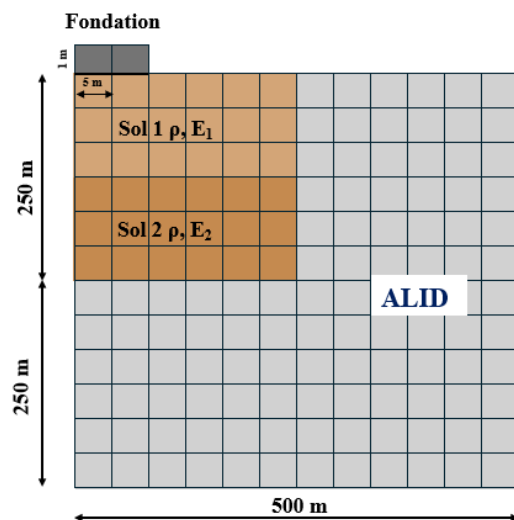


Figure 7. Modèle sol-fondation.

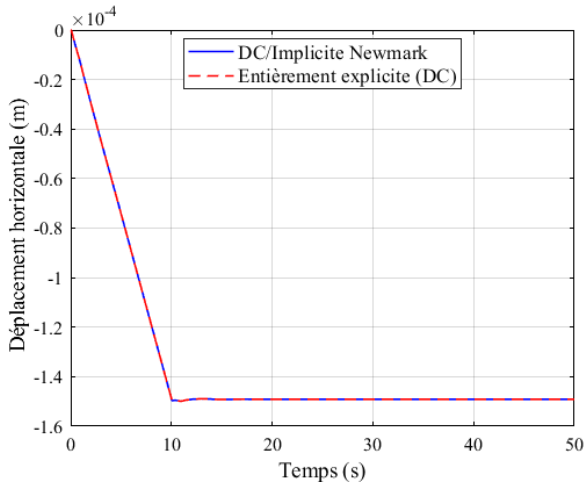


Figure 8. Déplacement horizontal au point d'observation sous chargement gravitaire.

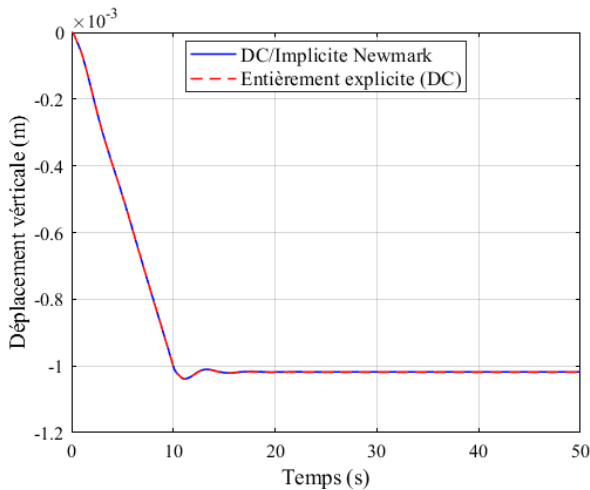


Figure 9. Déplacement vertical au point d'observation sous chargement gravitaire.

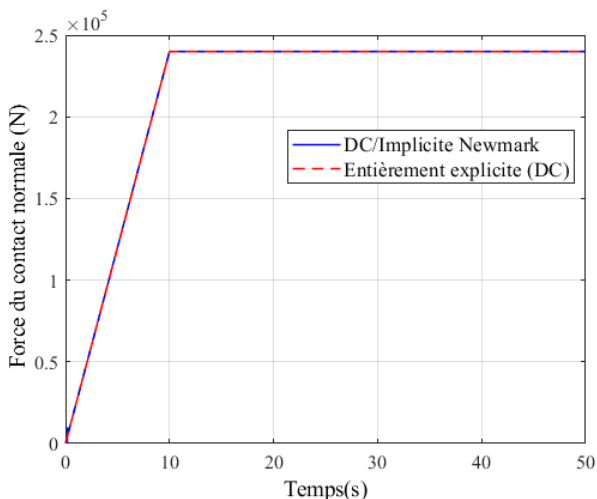


Figure 10. Force de contact totale à l'interface sol-fondation.

L'algorithme proposé est également évalué du point de vue du temps de calcul, comme récapitulé dans le Tableau 1. En se basant sur les propriétés mécaniques

du sol et de la fondation, le pas de temps critique associé à l'utilisation d'un schéma d'intégration temporelle explicite est de 0.0002 s pour la fondation et 0.005 s pour le sol.

Comme le schéma implicite de Newmark est inconditionnellement stable, le pas de temps retenu pour l'algorithme hybride est fixé à 0,005 s, qui correspond au pas de temps critique du sol. Alors que pour l'approche entièrement explicite (DC), le plus petit pas de temps entre le sol et la fondation doit être utilisé, soit 0,0002 s.

Par conséquent, comme le montre le Tableau 1, le temps de calcul pour l'approche entièrement explicite est plus élevé que celui de l'approche hybride proposée, ce qui met en évidence l'avantage de cette dernière en termes d'efficacité computationnelle.

Tableau 1. Temps de calcul pour différents algorithmes.

Algorithme	Pas du temps (s)	Temps de calcul (s)
DC/Implicite Newmark	0.005	165
Entièrement DC	0.0002	775

4 CONCLUSION

Dans cet article, une nouvelle méthode hybride de couplage par sous-domaines est proposée afin de traiter les problèmes d'impact et de contact entre deux sous-domaines intégrés à l'aide de schémas d'intégration temporelle différents. Le développement de cette approche est motivé par les problèmes d'interaction sol-structure, pour lesquels la structure requiert généralement un schéma d'intégration implicite afin de prendre en compte les non-linéarités matérielles, tandis qu'un schéma explicite s'avère plus approprié pour la modélisation efficace des phénomènes de propagation d'ondes dans le sol. La méthodologie proposée est implémentée et validée sous MATLAB à travers deux applications illustratives. Tout d'abord, un problème de référence unidimensionnel impliquant deux barres identiques en contact est analysé, et la formulation reproduit avec une excellente concordance les déplacements, les vitesses et les forces de contact par rapport à une solution entièrement explicite. Ensuite, une étude de cas bidimensionnelle de l'interaction sol-fondation soumise à un chargement gravitationnel est examinée. Les résultats obtenus mettent en évidence la capacité de l'approche à réduire le temps de calcul par rapport à une simulation entièrement explicite. Les résultats se révélant très précis et satisfaisants, les travaux futurs viseront à étendre l'étude à l'introduction d'une superstructure en béton dans la seconde simulation, ainsi qu'à l'application d'une onde sismique à la base

du sol multicouche afin d'analyser l'interaction sol-structure (ISS) sous chargement sismique. La performance de la méthode hybride sera ensuite comparée à un calcul entièrement explicite pour évaluer l'influence de l'ISS sur la réponse structurelle, tant en termes d'efficacité computationnelle que de précision numérique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acary, V., 2016. Energy conservation and dissipation properties of time-integration methods for nonsmooth elastodynamics with contact. *Z Angew Math Mech* 96, 585–603. <https://doi.org/10.1002/zamm.201400231>
- Armero, F., Petőcz, E., 1998. Formulation and analysis of conserving algorithms for frictionless dynamic contact/impact problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 158, 269–300. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(97\)00256-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(97)00256-9)
- Carpenter, N.J., Taylor, R.L., Katona, M.G., 1991. Lagrange constraints for transient finite element surface contact. *Numerical Meth Engineering* 32, 103–128. <https://doi.org/10.1002/nme.1620320107>
- Combescure, A., Mahjoubi, N., Gravouil, A., Greffet, N., 2009. Une méthode variationnelle en temps pour le couplage de schémas hétérogènes en dynamique transitoire, in: 9e Colloque National En Calcul Des Structures. Giens, France.
- Fahad, M., Nagy, R., Fuleki, P., 2022. Creep model to determine rut development by autonomous truck axles on pavement. *Pollack* 17, 66–71. <https://doi.org/10.1556/606.2021.00328>
- Fekak, F.-E., Brun, M., Gravouil, A., Depale, B., 2017. A new heterogeneous asynchronous explicit–implicit time integrator for nonsmooth dynamics. *Comput Mech* 60, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s00466-017-1397-0>
- Hughes, T.J.R., Taylor, R.L., Sackman, J.L., Curnier, A., Kanokkulchai, W., 1976. A finite element method for a class of contact-impact problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 8, 249–276. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(76\)90018-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(76)90018-9)
- Huněk, I., 1993. On a penalty formulation for contact-impact problems. *Computers & Structures* 48, 193–203. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(93\)90412-7](https://doi.org/10.1016/0045-7949(93)90412-7)
- Laursen, T.A., 2003. *Computational Contact and Impact Mechanics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04864-1>
- Leine, R.I., Aeberhard, U., Glocker, C., 2009. Hamilton's Principle as Variational Inequality for Mechanical Systems with Impact. *J Nonlinear Sci* 19, 633–664. <https://doi.org/10.1007/s00332-009-9048-z>
- Li, S., Brun, M., Djeran-Maigre, I., Kuznetsov, S., 2019. Hybrid asynchronous absorbing layers based on Kosloff damping for seismic wave propagation in unbounded domains. *Computers and Geotechnics* 109, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.01.019>
- Moreau, J.J., 1999. Numerical aspects of the sweeping process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 177, 329–349. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(98\)00387-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00387-9)
- Papadopoulos, P., Solberg, J.M., 1998. A Lagrange multiplier method for the finite element solution of frictionless contact problems. *Mathematical and Computer Modelling* 28, 373–384. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(98\)00128-9](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(98)00128-9)
- Serfőző, D., Pere, B., 2022. Application analysis of time stepping methods for impact problems. *Pollack* 17, 30–35. <https://doi.org/10.1556/606.2022.00599>
- Simo, J.C., Tarnow, N., 1992. The discrete energy-momentum method. Conserving algorithms for nonlinear elastodynamics. *Z. angew. Math. Phys.* 43, 757–792. <https://doi.org/10.1007/BF00913408>
- Simo, J.C., Tarnow, N., Wong, K.K., 1992. Exact energy-momentum conserving algorithms and symplectic schemes for nonlinear dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 100, 63–116. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(92\)90115-Z](https://doi.org/10.1016/0045-7825(92)90115-Z)
- Taylor, R.L., Papadopoulos, P., 1993. On a finite element method for dynamic contact/impact problems. *Numerical Meth Engineering* 36, 2123–2140. <https://doi.org/10.1002/nme.1620361211>