



**HAL**  
open science

## Modélisation d'échantillons numériques de sol armé sous sollicitations dynamiques

Jean-Baptiste Payeur, Alain Corfdir, Emmanuel Bourgeois

► **To cite this version:**

Jean-Baptiste Payeur, Alain Corfdir, Emmanuel Bourgeois. Modélisation d'échantillons numériques de sol armé sous sollicitations dynamiques. Congrès Français de Mécanique (CFM 2013), Aug 2013, Bordeaux, France. pp.PAYEURJ, 79S9MXTN. hal-00932589

**HAL Id: hal-00932589**

**<https://enpc.hal.science/hal-00932589>**

Submitted on 17 Jan 2014

**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.

# Modélisation d'échantillons numériques de sol armé sous sollicitations dynamiques

JB. PAYEUR<sup>a</sup>, A. CORFDIR<sup>a</sup>, E. BOURGEOIS<sup>b</sup>

a. Université Paris-Est, Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, 6-8 avenue Blaise Pascal, cité Descartes, Champs-sur-Marne 77455 Marne-la-Vallée

b. Université Paris-Est, IFSTTAR, 14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne 77447 Marne la Vallée Cedex 2

## Résumé :

*Les murs en sol renforcé présentent de nombreux avantages, mais leur réponse à des sollicitations dynamiques est relativement mal connue, ce qui freine leur emploi dans le domaine ferroviaire, notamment pour les lignes à grande vitesse.*

*On se propose d'étudier le comportement de ces ouvrages par voie numérique, en effectuant une étude paramétrique. L'étude porte sur un modèle de remblai simplifié, modélisé par éléments finis, en deux dimensions, soumis à une impulsion à son sommet et sous les hypothèses de comportement élastique linéaire. Le renforcement du sol renforcé est modélisé soit en considérant des barres discrètes, soit en utilisant un modèle homogénéisé. On compare les résultats obtenus pour ces deux modèles avec ceux obtenus pour le remblai non renforcé. L'étude examine l'influence de la durée et de la direction (horizontale ou verticale) de l'impulsion.*

*Les réponses en déplacements et contraintes pour les trois modèles sont analysées. Les résultats indiquent que les barres du renforcement améliorent globalement de la rigidité du massif sans modifier radicalement la réponse du massif à une impulsion. Par ailleurs, l'utilisation du modèle homogénéisé pour ce type d'ouvrages, considérée comme acceptable en statique, semble aussi justifiée en dynamique. Enfin, des différences entre les temps d'évolution des contraintes, notamment au niveau des barres, sont mis en évidence.*

**Mots clefs:** Sol renforcé, chargement ferroviaire, dynamique, modélisation numérique

## 1 Introduction

Le comportement dynamique des ouvrages en terre armée sous sollicitations de type TGV a été étudié expérimentalement au CER de Rouen en 2009 [1], mais peu de développements théoriques ou numériques ont été entrepris : jusqu'à présent, la réponse sismique aussi bien que l'analyse modale de ce type d'ouvrage ont été étudiées [2] pour des fréquences plus faibles que celles entrant en jeu dans le cas de sollicitations ferroviaires [3]. De plus, les auteurs ne se sont pas intéressés aux phénomènes propagatifs lors de ces calculs. La présente étude se focalise donc sur la réponse d'un massif renforcé au cours de la propagation d'une impulsion, dans le but de mettre en évidence les phénomènes clés qui caractérisent le comportement d'un tel massif sous sollicitations dynamiques.

On effectue une étude paramétrique sur un échantillon numérique, modélisé par éléments finis, de remblai armé en étudiant l'influence de la durée et de la direction de sollicitation. Le renforcement est soit modélisé par des éléments de barres (approche discrète), soit en utilisant un modèle homogénéisé et son influence est caractérisée par comparaison avec le remblai non renforcé. Le comportement de l'échantillon numérique est étudié en déformations planes, dans le cas de déformations élastiques linéaires qui correspondent bien à une impulsion dynamique de faible amplitude. Le logiciel utilisé est CESAR-LCPC et le module dynamique DYNI. On ne considère pas d'amortissement.

On simule la propagation des ondes dans le massif résultant d'une impulsion appliquée au sommet de l'échantillon, et on s'intéresse aux ordres de grandeur des contraintes et déformations, et à la comparaison entre les différents modèles. Plusieurs questions sont abordées :

- la présence de barres influe-t-elle sur la valeur des grandeurs (contraintes et déplacement) en différents points du massif au cours du chargement ?
- le modèle homogénéisé et le modèle discret donnent-ils des résultats identiques ?

- y a-t-il un déphasage entre l'établissement d'un maximum de traction dans la barre et le maximum de contrainte verticale ? Un tel déphasage introduirait une dépendance de l'état de l'interface barre-remblai par rapport au temps qui pourrait éventuellement avoir une influence sur le fonctionnement du renforcement au cours du chargement (et donc aussi potentiellement sur la stabilité de l'ouvrage).

## 2 Paramètres de modélisation

### 2.1 Géométrie de l'échantillon numérique considéré

On considère une colonne de sol constituée d'une couche de ballast, d'une sous-couche et d'une couche de remblai (figure 1). L'échantillon est symétrique ; en particulier, on ne représente pas le parement d'un vrai mur en terre armée. Le remblai peut être non renforcé ou renforcé : dans ce cas, le renforcement est pris en compte soit avec des barres discrètes (éléments linéiques fonctionnant en traction-compression, sans prise en compte de leur rigidité de flexion), soit homogénéisé avec le matériau en utilisant le modèle multiphasique proposé par de Buhan et Hassen [4] (dans sa version la plus simple, où le déplacement relatif entre les phases représentant le sol et les renforcements est négligé). Les conditions aux limites bloquent les deux composantes du déplacement en bas tandis que les faces latérales sont libres de contraintes.

La figure 1 donne la géométrie de l'échantillon numérique ainsi que les positions des points où sont relevés les déplacements horizontaux et verticaux (notés  $u$  et  $v$ ) et ainsi que les contraintes verticale et de cisaillement  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{xy}$ . Ces points sont pris sur la partie supérieure du remblai afin de pouvoir étudier les variations de grandeurs avant toute réflexion sur les bords.

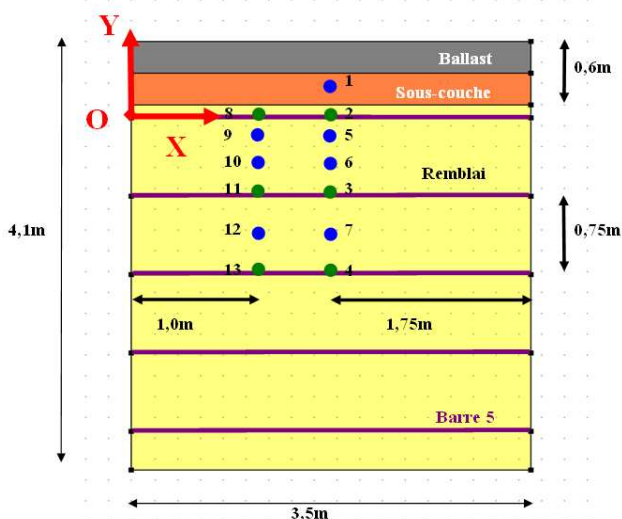


FIGURE 1 – Echantillon numérique considéré

	Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson (-)	Masse volumique ( $t/m^3$ )
remblai	150	0,3	2,08
ballast	450	0,2	1,7
sous-couche	270	0,3	2,33
barres	$2,1 \cdot 10^5$	-	-

TABLEAU 1 – Paramètres des matériaux

### 2.2 Paramètres mécaniques

Le comportement de tous les matériaux est supposé élastique linéaire, avec les valeurs listées dans le tableau 1 (choisies sur la base des travaux de Soyez [1]). Pour éviter d'introduire des paramètres supplémentaires difficiles à identifier, aucun amortissement n'est pris en compte dans les simulations.

La section de chaque barre est égale à  $S = 5 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} = 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . Pour le calcul 2D utilisant des barres discrètes, compte tenu du fait que dans la troisième direction, deux barres situées dans le même plan horizontal sont distantes de  $d=75 \text{ cm}$ , on attribue à chaque barre une "section" équivalente  $S' = S/d = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$ . Pour le calcul avec le modèle homogénéisé, la fraction volumique des armatures, calculée comme le rapport entre  $S$  et l'aire forfaitaire associée à chaque barre, est prise égale à  $\eta = S / (3,5 \times 0,75) / 5 = 4,4 \cdot 10^{-4}$ .

Dans les deux modèles, on a considéré une interface parfaitement adhérente.

## 3 Chargement

Dans le cas de cette étude et par souci de simplification, le chargement consiste à appliquer une contrainte uniforme, verticale ou horizontale, sur la face supérieure de l'échantillon. La contrainte appliquée varie au cours du temps pour représenter une impulsion de courte durée. Le cas du chargement vertical peut être

assimilé au poids du train, qui est la principale sollicitation appliquée à un remblai réel. Un chargement horizontal peut également être pris en compte, pour représenter les efforts appliqués sur les voies dans les virages. La valeur maximale de la contrainte appliquée est prise égale à  $P = 47$  kPa, qui correspond à une charge par roue de 90 kN rapportée à une surface de 1,9 m<sup>2</sup>.

On étudie trois impulsions : l'une brève, d'une durée de 10 ms (voir figure 2), et deux autres plus longues (30 ms et 50 ms). Les deux dernières sont de l'ordre de grandeur de la durée d'une sollicitation imposée par une roue de train à la vitesse de 300 km/h et 200 km/h respectivement, tandis que la première permet de suivre avec une bonne précision l'onde incidente en la découplant des ondes réfléchies sur les bords.

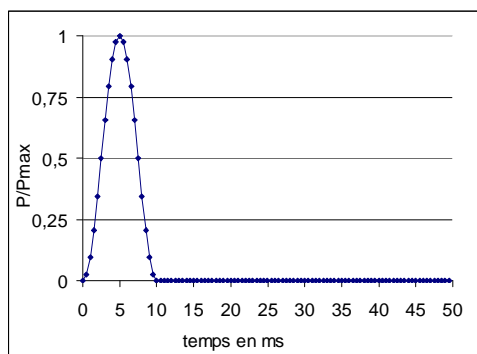


FIGURE 2 – Sollicitation de 10 ms

sollicitation	verticale			horizontale		
	10 ms	33 ms	50 ms	10 ms	33 ms	50 ms
durée	10 ms	33 ms	50 ms	10 ms	33 ms	50 ms
$\sigma_{yy}$ (kPa)	-40	-40	-55	15	22	32
$\sigma_{xy}$ (kPa)	6	2,5	1,5	30	35	35
u (mm)	-0,09	-0,12	-0,12	1,6	4,5	5,5
v (mm)	-0,4	-1,2	-1,4	0,35	1	1,2

TABLEAU 2 – Contraintes et déplacements du modèle non-armé au point 10 (valeur du premier pic)

## 4 Résultats

Comme on n'a pas considéré d'amortissement, des phénomènes de réflexions multiples sont présents aux pas de temps élevés. On s'intéresse donc principalement au premier 'pic' de chaque signal. La figure 3 présente différentes courbes représentatives des résultats obtenus, qui ne peuvent tous être représentés ici par manque de place. A titre d'illustration, on présente les grandeurs caractéristiques du modèle non renforcé dans le tableau 2 et les différences entre les trois modèles dans le tableau 3.

### 4.1 Influence de la présence du renforcement

On compare ici le modèle non renforcé avec les deux autres, pour les trois durées d'impulsion. Pour l'impulsion de 10 ms et le premier pic de signal, il n'y a pas de différences entre les modèles renforcés et le modèle non renforcé, pour la contrainte  $\sigma_{yy}$  et pour les deux directions de chargement. En revanche, dans le cas du chargement vertical, le modèle non renforcé donne des déplacements jusqu'à 1,5 fois plus grands que la moyenne des modèles renforcés. Pour la contrainte de cisaillement et le déplacement vertical, la différence entre le modèle non renforcé et les autres modèles est moins marquée.

Pour les deux autres impulsions et au premier pic du signal, les trois modèles diffèrent peu pour une sollicitation horizontale : les grandeurs du modèle non renforcé sont environ 5% plus élevées que celles données par le modèle discret. En revanche, pour une sollicitation verticale, la contrainte de cisaillement et le déplacement horizontal sont jusqu'à deux fois plus grands avec le modèle non renforcé qu'avec le modèle discret. La contrainte de compression verticale et la déformation verticale ne présentent pas de différences.

durée de sollicitation	10 ms	30 ms	50 ms
$ u_{\text{discret}} - u_{\text{sans-barres}} $ (mm)	0,02	0,06	0,03
$ u_{\text{sans-barres}} $ (mm)	0,09	0,12	0,10
écart relatif	21%	47%	30%

durée de sollicitation	10 ms	30 ms	50 ms
$ u_{\text{discret}} - u_{\text{homogénéisé}} $ (mm)	0,00	0,02	0,01
$ u_{\text{discret}} $ (mm)	0,07	0,08	0,08
écart relatif	0%	19%	13%

TABLEAU 3 – Différences absolues et relatives du déplacement horizontal (valeur du premier pic) selon le modèle de remblai, pour une sollicitation verticale au point 10.

## 4.2 Influence de la façon de modéliser du renforcement

Les résultats indiquent une bonne concordance entre les modèles homogénéisé et discret tant en déphasage qu'en norme, pour les sollicitations horizontales et verticales de 10 ms et pour les sollicitations horizontales de 33 ms et 50 ms. En particulier, la différence est beaucoup plus faible qu'entre le modèle non renforcé et le modèle discret pour les pas de temps élevés, même s'il se produit des réflexions qui ne sont pas réalistes sur les bords du domaine (mais ne sont pas pénalisantes dans le cadre d'une étude paramétrique).

En revanche, le modèle homogénéisé donne des contraintes de cisaillement et des déplacements horizontaux supérieurs, d'environ 30%, à ceux donnés par le modèle discret pour les sollicitations verticales de 33 ms et 50 ms. Cependant, le modèle homogénéisé reste plus proche du modèle discret que le modèle non renforcé. Enfin, un examen attentif des résultats montre que la différence entre modèle discret et homogénéisé est maximum au niveau des barres dans tous les cas de figures.

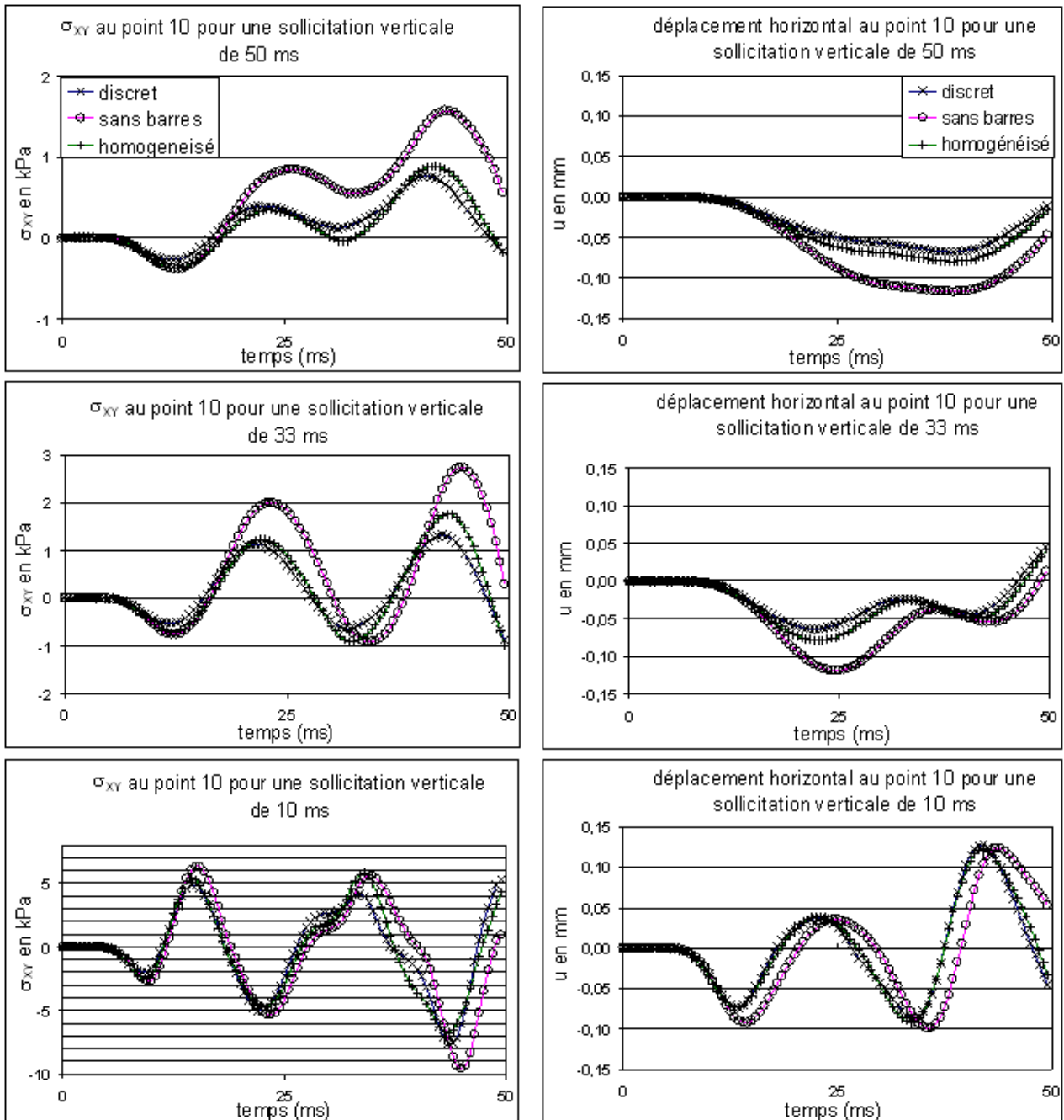


FIGURE. 3 – Contrainte de cisaillement et déplacement horizontal au point 10

### 4.3 Temps d'arrivée

On s'intéresse à la vitesse d'établissement de la contrainte de compression verticale, de la contrainte de cisaillement et de la traction dans la barre en fonction de la position dans l'échantillon. Le temps d'arrivée est défini comme le moment où 50% de l'amplitude du signal est atteinte. On s'intéresse uniquement à l'impulsion de 10 ms. En effet, pour ce signal, la durée de l'impulsion est bien inférieure au temps nécessaire pour qu'une onde P se propage entre un point de mesure et le bord le plus proche. L'impulsion de 10 ms permet donc de suivre précisément les ondes générées dans le massif sans être perturbé par les réflexions d'ondes aux bords. La différence entre les vitesses d'établissement des grandeurs permet également de quantifier les déphasages des contraintes les unes par rapport aux autres et d'étudier la variation de ce déphasage avec la profondeur. On compare ces vitesses aux vitesses  $V_p$  et  $V_s$  des ondes de compression et de cisaillement dans le cas de la propagation unidirectionnelle d'ondes planes.

#### 4.3.1 Pour une sollicitation verticale

La figure 4 montre que la contrainte verticale se propage à la vitesse  $V_p$  théorique, à la précision du calcul près. De plus, aucun signal (que ce soit déplacement ou contrainte) ne va jamais plus vite que  $V_p$ . Par ailleurs, ni la contrainte de cisaillement, ni la traction dans la barre ne peuvent être reliées à la propagation d'une onde de cisaillement de vitesse  $V_s$ .

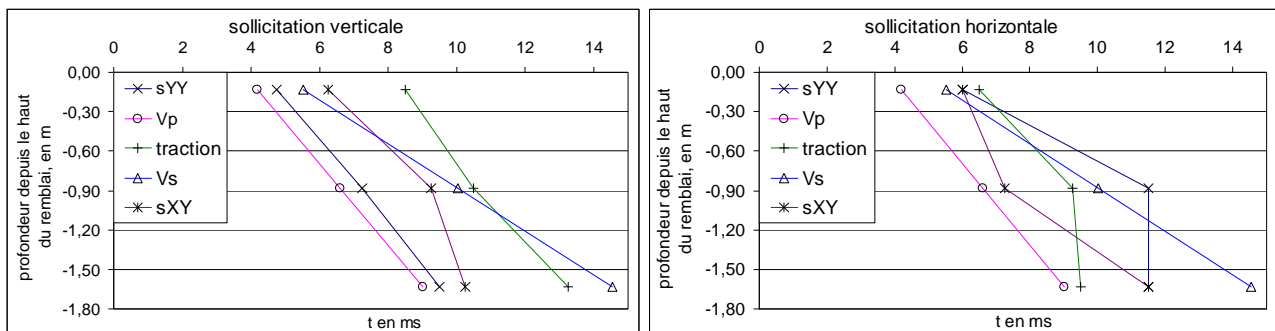


FIGURE 4 – Temps d'arrivée des contraintes, tractions et ondes P et S aux points 8, 11 et 13.

#### 4.3.2 Pour une sollicitation horizontale

Le temps d'arrivée des contraintes correspond toujours à une vitesse inférieure à la vitesse théorique des ondes de compression  $V_p$ . Dans le haut du massif, il correspond environ à la vitesse  $V_s$ , tandis que plus bas, la vitesse d'établissement est comprise entre  $V_p$  et  $V_s$ .

Pour cette sollicitation, on ne peut pas comparer simplement les vitesses  $V_p$  et  $V_s$  aux vitesses d'établissement des contraintes. Il n'est donc pas possible a priori de relier l'évolution du déphasage entre  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{xy}$  ou la traction dans la barre au point considéré avec la profondeur.

Les résultats obtenus mettent en évidence un déphasage manifeste entre la traction dans la barre et la contrainte verticale, mais la variation de ce déphasage avec la profondeur est complexe.

## 5 Discussion

### 5.1 Comparaison massif armé et non armé

Les résultats obtenus permettent de conclure quant à l'influence des barres de renforcement dans la réponse élastique du remblai considéré sous chargement impulsionnel. Les barres contribuent à la rigidité du massif uniquement dans leur direction principale. De plus, cette contribution dépend de la durée de la sollicitation.

La contribution des armatures à la stabilité de l'ouvrage est déterminante en statique. En dynamique, la réponse globale du massif armé sous chargement impulsionnel est gouvernée avant tout par la géométrie et les caractéristiques mécaniques du remblai, et les armatures ne modifient pas radicalement la réponse de l'échantillon. Leur influence ne peut cependant pas être négligée au regard des présents résultats. Il convient aussi de rappeler que les calculs présentés ici ont été effectués en 2D, et sans glissement entre le remblai et les armatures, ce qui peut conduire à surestimer leur contribution réelle.

## 5.2 Pertinence d'une approche homogénéisée

Les différences absolues entre les résultats fournis par le modèle homogénéisé et le modèle discret dépend remarquablement peu de la grandeur étudiée, de la direction de chargement ou de la durée de l'impulsion considérée. De plus, cette différence est comparable à celle que l'on trouve en comparant ces deux modèles sous chargement statique [5].

De manière plus précise, dans le cadre des hypothèses considérées ici, la différence entre les modèles est de l'ordre de 30% dans le cas le plus défavorable. On notera qu'en deux dimensions, rien n'assure que le modèle discret fournit toujours un résultat plus représentatif. D'autre part, l'utilisation d'un modèle homogénéisé se traduit par des calculs plus rapides, ce qui pourrait être déterminant pour des simulations tridimensionnelles.

## 5.3 Déphasages et vitesses de propagation

Le déphasage entre  $\sigma_{xy}$  et  $\sigma_{yy}$  ne peut être comparé à la différence  $V_p-V_s$ , qui correspondrait à une distinction totale entre ondes P, associées aux contraintes de compression et ondes S, associées aux contraintes de cisaillement. Les champs de contrainte  $\sigma_{xy}$  et  $\sigma_{yy}$  ne sont pas associés à une seule onde, mais résultent de multiples réflexions aux interfaces (une onde de compression qui rencontre une interface se réfléchit en onde de compression et aussi en onde de cisaillement). On ne peut donc utiliser des relations simples reposant sur la propagation d'ondes planes unidirectionnelles pour rendre compte du comportement de l'échantillon considéré, excepté éventuellement au milieu et au niveau de la première barre.

L'étude de la dépendance temporelle de la traction dans la barre et de la contrainte verticale et donc du déphasage entre les deux, peut fournir une base pour discuter, dans une prochaine étude, le fonctionnement de l'interface au cours du temps et sa mise en plasticité éventuelle.

## 6 Conclusion et perspectives

L'étude paramétrique présentée ici a permis de caractériser le fonctionnement global d'un remblai armé sous impulsions. Ce fonctionnement est donné principalement par la géométrie et les caractéristiques mécaniques du remblai. La raideur des barres a essentiellement une influence sur les déplacements horizontaux et la contrainte de cisaillement au sein du remblai.

Par ailleurs, les résultats semblent indiquer que la modélisation homogénéisée des barres peut être envisagée en dynamique. Enfin, des déphasages importants entre les différentes grandeurs apparaissent au cours de la propagation de l'impulsion, notamment au niveau des barres, mais ils ne sont pas quantifiables par une loi simple. Ceci pose la question des conditions de fonctionnement de l'interface barre-remblai sous chargement dynamique, et de la stabilité de l'ouvrage sous ce type de chargement.

Dans une prochaine étude on s'intéressera donc à l'influence de ce déphasage sur l'état de l'interface dans le cas d'un massif réel. On pourra effectuer une modélisation tridimensionnelle d'un massif renforcé, en utilisant une version plus complète du modèle multiphasique pour tenir compte précisément de cette interface barre-sol.

Enfin, on pourra s'intéresser à un chargement plus réaliste qu'une impulsion en étudiant par exemple le remblai armé sous chargement ponctuel harmonique. La répartition discrète des barres devra alors à nouveau être considérée, car on peut envisager que les ventres et les nœuds des trains d'ondes se propageant pourraient se placer entre les barres, provoquant ainsi des résonances spécifiques.

## Références

- [1] Soyez L., Contribution à l'étude du comportement des ouvrages de soutènement en sol renforcé, soumis à des charges d'exploitation ferroviaires. Thèse de doctorat de l'ENPC, 2009.
- [2] Hatami K., Bathurst R.J., Effect of structural design on fundamental frequency of reinforced-soil retaining walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 137-157, 2000.
- [3] Kouroussis G., Modélisation des effets vibratoire du trafic ferroviaire sur l'environnement. Thèse de doctorat de la Faculté Polytechnique de Mons, 2009.
- [4] De Buhan P. Hassen G., Multiphase approach as a generalized homogenization procedure for modelling the macroscopic behaviour of soils reinforced by linear inclusions. *EJM*, 27, 662-679, 2008.
- [5] Bourgeois E., Le Kouby A. and Soyez L., Influence of the strip-backfill interaction model in the analysis of the behaviour of a mechanically stabilized earth wall. *Soils and Foundations*, 52(3), 550-561, 2012.