

EFFICACITÉ DE TRANCHÉES OU D'ÉCRANS POUR LA DIFFRACTION D'ONDES DE SURFACE

D. LE HOUEDÉC, S. MALEK et J. PICARD*

*Laboratoire de Mécanique des Structures, E.N.S.M., 1, rue de la Noë, F-44072 Nantes Cedex 03, France***Département des Matériaux, C.E.B.T.P., Domaine de St Paul, F-78470 Saint-Rémy-les-Chevreuse, France*

Résumé - Les tranchées et les écrans ont été utilisés depuis beaucoup d'années pour permettre la diffraction des ondes lors de la propagation des vibrations dans le sol. Leur efficacité a d'abord été examinée lors d'essais expérimentaux. Par la suite, avec le développement des moyens de calcul, différentes études théoriques basées sur des méthodes diverses (différences finies, éléments finis, équations intégrales...) ont été réalisées et ont conduit à des résultats parfois contradictoires. Par conséquent, l'objectif de cette étude consiste à présenter une méthode numérique permettant de mettre en évidence les paramètres essentiels de l'efficacité du dispositif. Cette méthode basée sur les éléments finis utilise un système de forces nodales appliquées sur les frontières et déduit de l'étude du massif stratifié en l'absence de discontinuité. Les résultats obtenus conduisent à des conclusions similaires à celles des autres auteurs.

Abstract - Since many years, trenches and screens have been used to scatter waves during the vibration propagation in ground. First, their efficiency has been examined by experimental tests. Later, with the computer development, various theoretical studies using different methods (finite-differences, finite-element, boundary element...) have been produced and have sometimes led to contradictory results. Consequently, the study purpose consists to present a numerical method allowing obviously the main parameters of barrier efficiency. This method uses a finite element process with a set of nodal boundary forces due to the propagation in semi-infinite regions representing the soil-medium. The deduced results lead to similar conclusions of other authors.

1 - INTRODUCTION

Lors d'une étude bibliographique que nous avons réalisée, et qui concernait un grand nombre de mesures expérimentales ou de résultats obtenus à la suite de différentes méthodes théoriques (différences finies, éléments finis, équations intégrales...), nous avons mis en évidence les problèmes concernant la discordance de diverses conclusions relatives aux critères à adopter de façon à obtenir une efficacité significative d'une barrière (tranchée, écran...) pour la réduction de la propagation des vibrations dans le sol. Pour justifier cette diversité des conclusions, il n'est pas inutile de rappeler les hypothèses essentielles des méthodes développées par différents auteurs, ainsi que de préciser les conclusions correspondantes.

Les premiers travaux théoriques dus à Aboudi /1, 2/ concernaient le cas d'un écran ayant des caractéristiques voisines de celles du sol et utilisaient pour la résolution une méthode de perturbations (développements limités d'ordre 1) associée à un schéma de différences finies pour l'exploitation numérique. Aboudi conseillait des écrans avec masses volumiques et vitesses de propagations faibles, la solution des tranchées ouvertes pouvant être choisie en priorité. Plus récemment, Fuyuki et Matsumoto /3/ ont également utilisé cette méthode de différences finies pour analyser la diffraction des ondes par une tranchée.

Les études de Segol, Abel et Lee /4, 5/ ont porté sur la réponse dynamique d'un massif multi-couches, reposant sur un substratum rigide, en présence d'une tranchée (et plus rarement d'un écran). La méthode des éléments finis est appliquée sur un domaine central comprenant la discontinuité et soumis d'une part à la force excitatrice, et d'autre part à des efforts nodaux exercés sur les frontières verticales du domaine. Ces efforts sont déduits à partir des caractéristiques physiques des couches ainsi que des modes et pulsations propres du massif sans discontinuité. A la suite de l'étude paramétrique réalisée, les auteurs conseillent l'utilisation de tranchées ouvertes dont l'efficacité est directement liée à leur profondeur. Par contre, les écrans rigides (en béton par exemple) étaient totalement exclus.

La méthode développée par Haupt /6, 7, 8/ possède quelques analogies avec celle présentée par Segol et coll. Les différences portent essentiellement sur la détermination des forces nodales appliquées sur les frontières verticales du domaine central étudié. Pour cela, Haupt utilise un procédé de "matrice d'influence". Les conclusions tirées de l'étude numérique contredisent celles de Segol, car Haupt accorde un préjugé favorable aux écrans en béton pour lesquels la section droite constitue le paramètre essentiel caractérisant le critère d'efficacité.

Des travaux plus récents dus par exemple à Emad et Manolis /9/ et à Beskos, Dasgupta et Vardoulakis /10/ utilisent sous des conditions de déformation plane une méthode de calcul par équations intégrales. Dans ce cas, les déplacements ou les contraintes sont supposés connus sur la frontière du domaine étudié. Concernant les conclusions, les auteurs estiment qu'en général les tranchées ouvertes sont plus efficaces mais ne déconseillent pas pour autant l'usage d'écrans de béton pour lesquels l'efficacité n'est significative qu'au delà d'une certaine valeur de la section droite de l'écran. Pour des mêmes cas d'étude, quelques résultats sont comparés avec ceux de Haupt. Qualitativement, ils impliquent des conclusions analogues ; toutefois, concernant les valeurs du coefficient de réduction d'amplitude, les valeurs peuvent parfois varier du simple au double.

Cette diversité de conclusions selon les auteurs ne peut qu'inciter à une étude plus poussée des différents facteurs influençant la diffraction des ondes lors du cheminement des ondes dans le sol. Dans le cadre d'une action menée en 1987 par le Ministère de l'Environnement et relative aux recherches sur le bruit et ses nuisances, nous avons proposé

une méthode d'investigation permettant de déterminer d'une manière rigoureuse un facteur d'efficacité (rapport moyen des amplitudes obtenues avec et sans écran) en fonction d'un certain nombre de données, comme celles concernant les caractéristiques de l'excitation, du massif et de la discontinuité (tranchée ou écran).

2 - PRESENTATION DE LA METHODE DE CALCUL

Pour atteindre les objectifs ci-dessus, nous avons choisi de retenir la méthode présentée par Segol et coll., et pour laquelle nous proposerons différents aménagements. Ce choix a été guidé par le fait qu'elle s'appuie sur une méthode classique d'éléments finis bien connue actuellement, et que par ailleurs elle est très facilement adaptable au cas de massifs stratifiés à substratum rigide. Dans les études précédentes, il semble que le paramètre relatif à la hauteur H du massif n'ait pas reçu d'attention particulière ; or, compte tenu des possibilités de réflexion d'ondes sur le substratum, on doit envisager une analyse convenable de cette influence.

2.1 - Hypothèses d'étude

Le sol, infini dans le plan horizontal, repose sur un substratum rigide situé à une hauteur H de la surface libre du massif. Celui-ci est discrétisé en couches horizontales, d'épaisseur constante, homogènes et caractérisées par leur masse volumique, leur module de Young et leur coefficient de Poisson. Le choix de l'épaisseur d'une part est lié à la longueur de l'onde transmise et d'autre part correspond au côté des éléments finis utilisés par la suite.

Dans un souci de simplification du problème, nous nous limitons au cas des déformations planes ; nous nous ramenons donc à l'étude d'un problème bidimensionnel. La source de vibrations est constituée par une excitation linéique, harmonique, d'amplitude et de fréquence constantes. Cette source est placée à la surface du massif, mais la méthode présentée est tout à fait applicable au cas d'une sollicitation enterrée.

2.2 - Etude du massif en l'absence de discontinuités

Cette première analyse a pour objectif de déterminer les modes et pulsations propres du massif. Pour cela, pour chaque couche (repérée par l'indice m), on admet que le vecteur déplacement en un point intérieur M (coordonnées x_1 et x_2) s'exprime de façon linéaire en fonction des déplacements obtenus aux interfaces inférieure et supérieure de la couche, c'est-à-dire par exemple pour le déplacement vertical du point M :

$$(1) \quad u_2(x_1, x_2, t) = N(x_2) U_2(x_1, t)$$

$$(2) \quad \text{avec } N(x_2) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x_2}{2b} & \frac{x_2}{2b} \end{bmatrix}$$

$$(3) \quad U_2(x_1, t) = \begin{Bmatrix} u_{2A}(x_1, t) \\ u_{2B}(x_1, t) \end{Bmatrix}$$

$u_{2A}(x_1, t)$ et $u_{2B}(x_1, t)$ désignant respectivement les déplacements verticaux des points A et B.

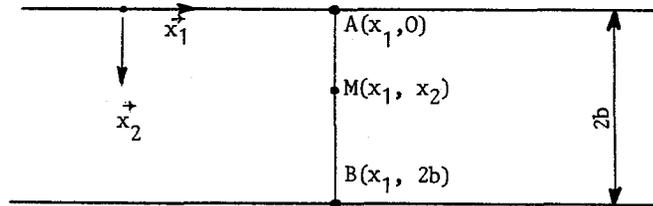


Fig. 1 - Discrétisation d'une couche du massif

Cette hypothèse n'est valable que si l'épaisseur de la couche considérée est très faible vis à vis de la longueur de l'onde transmise (travaux de Chao et Lee /11/). En pratique, un rapport de 1/12, éventuellement 1/10 est nécessaire pour respecter cette hypothèse. L'équation du mouvement d'une couche peut être obtenue en utilisant la méthode de Galerkin modifiée (méthode appliquée par Segol et coll.). Cette équation peut également être déduite à l'aide d'une méthode énergétique proposée par Dubigeon et rapportée par Malek /12/. Pour cela, on écrit que la somme du travail virtuel δQ des quantités d'accélération et de la variation virtuelle δE_d de l'énergie de déformation est nulle (ici, il n'y a pas de forces extérieures). Pour cela, nous avons les définitions suivantes :

$$(4) \quad \delta Q = \int_v \rho \ddot{u} \delta u \, dv = \int_0^\infty \int_0^{2b} (\rho \ddot{u}_1 \delta u_1 + \rho \ddot{u}_2 \delta u_2) \, dx_1 \, dx_2$$

ρ désignant ici la masse volumique du sol constituant la couche

$$(5) \quad \delta E_d = \int_v \bar{\Sigma} : \delta \bar{E} \, dv = \int_0^\infty \int_0^{2b} (\delta \epsilon_{11} \sigma_{11} + \delta \epsilon_{22} \sigma_{22} + \sigma \epsilon_{12} \sigma_{12}) \, dx_1 \, dx_2$$

σ_{ij} représentant les contraintes et ϵ_{ij} les déformations.

Pour une onde plane harmonique se propageant dans la direction \vec{x}_1 parallèle à l'interface, le vecteur déplacement a la forme suivante :

$$(6) \quad U_i(x_1, t) = U_i^0 \exp i (\omega t - k x_1)$$

où k désigne le nombre d'onde associé à la source de pulsation ω .

Les relations (1), (4) et (6) nous permettent d'obtenir l'expression :

$$(7) \quad \delta \mathcal{U} = - \{ \delta U_1^0, \delta U_2^0 \} [M] \begin{Bmatrix} U_1^0 \\ U_2^0 \end{Bmatrix} \omega^2 \int_0^\infty \exp 2i (\omega t - kx_1) \, dx_1$$

$$(8) \quad \text{avec } M = \rho \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_1 \end{bmatrix}$$

$$(9) \quad \text{et } C_1 = \int_0^{2b} N^t N \, dx_2$$

De même, en faisant appel à la relation (5), aux relations contraintes-déformations et à de multiples intégrations par parties, on déduit :

$$(10) \quad \delta E_d = - \{ \delta U_1^0, \delta U_2^0 \} [k^2 A_2 + ik A_1 + A_0] \begin{Bmatrix} U_1^0 \\ U_2^0 \end{Bmatrix} \int_0^\infty \exp 2i (\omega t - kx_1) \, dx_1$$

avec :

$$(11) \quad A_2 = \begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu)C_1 & 0 \\ 0 & \mu C_1 \end{bmatrix}$$

$$(12) \quad A_1 = \begin{bmatrix} 0 & \lambda C_2 - \mu C_3 \\ \mu C_2 - \lambda C_3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(13) \quad A_0 = \begin{bmatrix} \mu C_4 & 0 \\ 0 & (\lambda + 2\mu)C_4 \end{bmatrix}$$

avec :

$$(14) \quad C_2 = \int_0^{2b} N^t N_{,x_2} \, dx_2$$

$$(15) \quad C_3 = \int_0^{2b} N^t_{,x_2} N \, dx_2$$

$$(16) \quad C_4 = \int_0^{2b} N_{,x_2}^t N_{,x_2} dx_2$$

λ et μ désignant les coefficients de Lamé de la couche considérée.

Après assemblage des matrices élémentaires relatives à chaque couche et prise en compte d'une part de la continuité des contraintes et des déplacements aux interfaces et d'autre part des conditions aux limites (contraintes nulles à la surface du massif et déplacements nuls sur le substratum rigide) nous déduisons l'équation matricielle suivante :

$$(17) \quad [k^2 A_2^* + ik A_1^* + A_0^* - \omega^2 M^*] \{U^0\} = \{0\}$$

où les matrices A_0^* , A_1^* , A_2^* , M^* sont les matrices obtenues par assemblage des matrices A_0 , A_1 , A_2 , M ; auxquelles on a supprimé les 2 dernières lignes et colonnes pour tenir compte des conditions aux limites ; $\{U^0\}$ représente le vecteur déplacement des noeuds aux interfaces.

Pour une fréquence d'excitation donnée (c'est-à-dire pour ω donnée), il apparaît alors un problème aux valeurs propres en k . Pour un nombre n de couches, la résolution du système donne 4 valeurs propres complexes (2 à 2 opposées) et 4n vecteurs propres associés. Compte tenu de la nécessaire décroissance des ondes à l'infini, seulement 2n valeurs propres peuvent être conservées. Ainsi pour $x > 0$, on doit uniquement retenir les 2n valeurs telles que $k_s = \alpha_s + i\beta_s$ avec $\beta_s < 0$. On écrit alors que le vecteur déplacement des interfaces s'exprime sous forme d'une combinaison linéaire des vecteurs propres $\{U_s^0\}$ conservés, soit :

$$(18) \quad \{U\} = \sum_{s=1}^{2n} a_s \{U_s^0\} \exp i(\omega t - kx_1)$$

2.3 - Détermination des efforts nodaux

Par la suite, le massif sera décomposé en 3 domaines : un domaine central contenant l'excitation et la discontinuité, et 2 domaines latéraux s'étendant à l'infini. Pour l'analyse du domaine central, nous devons donc déterminer les efforts nodaux à appliquer sur ses frontières verticales de manière à caractériser l'influence des parties latérales. Pour cela, pour une couche, nous évaluons le travail virtuel.

L'utilisation de la fonction d'interpolation N et des relations contraintes-déformations permet de déduire l'expression du vecteur-force généralisée relatif à chaque couche. Compte tenu de la relation (18) et après assemblage pour les différentes couches, nous obtenons la relation suivante :

$$(20) \quad \{F_r\} = - [L] \{X_r\}$$

avec :

$$(21) \quad R = i A_2 V H V^{-1} + A_3$$

- où
- $\{F_r\}$ désigne le vecteur des efforts nodaux
 - $\{X_r\}$ le vecteur des déplacements nodaux sur la frontière verticale droite du domaine central
 - $[H]$ la matrice diagonale des valeurs propres conservées ($\beta_s < 0$)
 - $[V]$ la matrice des vecteurs propres associés
 - $[A_2]$ a déjà été définie dans la relation (11)
 - $[A_3]$ est une matrice assemblée à partir de la matrice élémentaire ci-dessous :

$$(22) \quad [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & \lambda & 0 & -\lambda \\ \mu & 0 & -\mu & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & -\lambda \\ \mu & 0 & -\mu & 0 \end{bmatrix}$$

et pour laquelle les 2 dernières lignes et colonnes ont été supprimées.

Les équations (20) et (21) concernent la partie droite du domaine central. Pour la partie gauche, nous déduisons de même :

$$(23) \quad \{F_g\} = - [L] \{X_g\}$$

avec :

$$(24) \quad L = - (i A_2 V' H' V'^{-1} + A_3$$

[H] désignant alors la matrice diagonale des valeurs propres telles que ($\beta_s > 0$).

2.4 - Réponse dynamique du domaine central

Le domaine maillé et discrétisé en éléments finis est constitué par la partie centrale du massif en présence de la discontinuité (tranchée ou écran). En un point de sa surface, s'exerce la charge excitatrice $P(t)$ et sur ses frontières verticales δD_1 et δD_2 sont appliquées les forces nodales liées aux déplacements des noeuds-frontières par les relations (20) et (23). Par la suite, on se limitera au cas des sollicitations harmoniques $P(t) = P \exp i\omega t$.

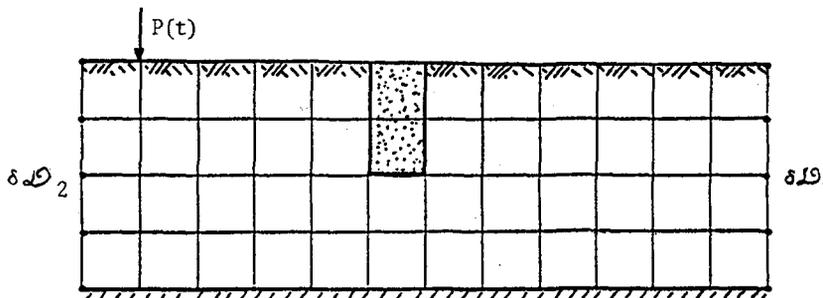


Fig. 2 - Maillage du domaine étudié

La discrétisation est réalisée à l'aide d'éléments rectangulaires à 4 noeuds et 8 degrés de liberté, la hauteur de chaque élément devant correspondre à l'épaisseur des couches choisie précédemment. Après assemblage des matrices masse \mathcal{M} et raideur \mathcal{K} , la mise en équation conduit à une relation matricielle de la forme :

$$(25) \quad [\mathcal{M}] \{X\} + [\mathcal{K}] \{X\} = \{F\}$$

où $\{X\}$ représente le vecteur des déplacements nodaux et $\{F\}$ fait intervenir d'une part la force excitatrice $\{P(t)\}$ et d'autre part les forces nodales $\{F_r\}$ et $\{F_d\}$ appliquées sur les frontières verticales du domaine. Ceci nous donne :

$$(26) \quad [\mathcal{M}] \{X\} + [\mathcal{K} + R^* + L^*] \{X\} = \{P(t)\}$$

où R^* et L^* sont les matrices R et L définies précédemment, et pour lesquelles on a ajouté un certain nombre de lignes et de colonnes de 0.

Dans le cas de $P(t) = P \exp i\omega t$, nous déduisons:

$$(27) \quad [\mathcal{K} + R^* + L^* - \omega^2 \mathcal{M}] \{X_0\} = \{P\}$$

où $\{X_0\}$ désigne le vecteur amplitude des déplacements nodaux. Pour une sollicitation ponctuelle verticale appliquée à un noeud du maillage, $\{P\}$ aura uniquement une composante non nulle.

R^* et L^* peuvent être établies dès lors que l'on connaît les dimensions du maillage utilisé. Les matrices \mathcal{K} et \mathcal{M} sont assemblées en tenant compte des caractéristiques physiques du sol et de la discontinuité (écran en particulier). Par la suite, on se contentera de déterminer les déplacements à la surface du massif, cette connaissance pouvant déjà nous apporter des informations intéressantes sur l'efficacité du dispositif.

Dans certains cas d'étude, pour tenir compte de la dissipation interne d'énergie dans les matériaux constituant le massif ou l'écran, on fait intervenir un facteur d'amortissement structural tel que dans la matrice raideur, à un élément k_{ij} se substitue l'élément $k_{ij} (1 + i\eta)$, η est alors un coefficient d'amortissement supposé constant (différent selon que l'on considère le sol ou l'écran).

3. ANALYSE DES RESULTATS

Pour chaque noeud du maillage, les déplacements verticaux et horizontaux figurant dans $\{X_0\}$ sont obtenus sous forme complexe. Pour prendre en compte le sens physique de la réponse, celle-ci sera caractérisée par la valeur maximale des

parties réelles des fonctions correspondantes. En pratique, dans l'étude numérique qui va suivre, nous nous limiterons à l'analyse des déplacements verticaux obtenus à la surface du massif supposé homogène ; mais l'application à un massif stratifié ne pose pas de problèmes particuliers. Par ailleurs, ce choix nous permet de procéder à une analyse comparative avec les résultats déduits par différents auteurs.

3.1 - Données de l'étude

Le domaine étudié est un massif sableux dont les caractéristiques sont les suivantes :

- . masse volumique : $\rho_s = 1720 \text{ kg/m}^3$
- . module d'Young : $E_s = 46 \text{ MPa}$
- . coefficient de Poisson : $\nu_s = 0,25$
- . coefficient d'amortissement : $\eta_s = 0,08$
- . profondeur h en général prise égale à 2λ , λ désignant la longueur d'onde de Rayleigh.

Cette longueur d'onde λ constituera par la suite la longueur de référence. Ainsi, sur la figure ci-après représentant la discontinuité, les longueurs H , B , T , D sont des grandeurs adimensionnelles.

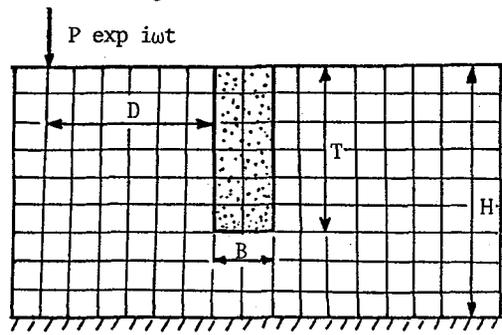


Fig. 3 - Dimensionnement de la discontinuité.

Lorsque la discontinuité est formée par un écran en béton, nous prendrons pour celui-ci les caractéristiques suivantes :

- . masse volumique : $\rho_T = 2350 \text{ kg/m}^3$
- . module d'Young : $E_T = 13500 \text{ MPa}$
- . coefficient de Poisson : $\nu_T = 0,25$
- . coefficient d'amortissement : $\eta_T = 0,4$

Pour quelques résultats, la tranchée a été remplie par un matériau très léger du type polystyrène, pour lequel nous avons choisi les données suivantes :

- . masse volumique : $\rho_T = 14 \text{ kg/m}^3$
- . module d'Young : $E_T = 1 \text{ MPa}$
- . coefficient de Poisson : $\nu_T = 0,25$
- . coefficient d'amortissement : $\eta_T = 0,2$

La fréquence de l'excitation a été prise égale à 320 Hz.

3.2 - Résultats préliminaires

Ces premiers résultats concernent les dispositions relatives au domaine central étudié. En effet, les choix concernant le nombre d'éléments par longueur d'onde, le nombre de couches à considérer, le bon fonctionnement des matrices R^* et L^* , la longueur du domaine maillé... doivent être préalablement analysés de façon à justifier la précision des résultats, et éventuellement permettre une réduction des temps de calcul.

La figure 4 nous montre les écarts relatifs obtenus en utilisant un découpage avec 10 et 20 éléments par longueur d'onde. Nous constatons que les écarts sont de l'ordre de 5%, sauf au droit de la force excitatrice. Mais cette zone n'offrant pas d'intérêt pour le problème d'isolation vibratoire qui nous concerne, nous nous contenterons par la suite de considérer 10 éléments par longueur d'onde.

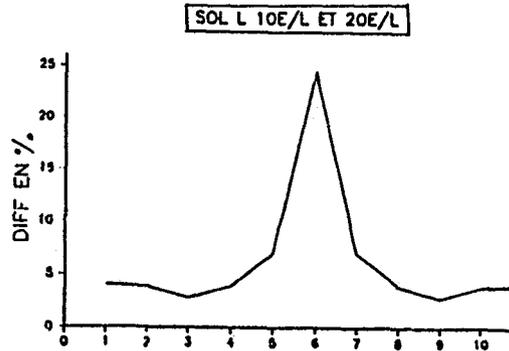


Fig. 4 - Influence du nombre d'éléments par longueur d'onde

Une autre analyse a porté sur l'épaisseur des couches. Une première étude a été réalisée avec 30 couches d'épaisseur constante. Le second cas traitait un massif avec 20 couches d'épaisseur variable, la couche de surface ayant une épaisseur de $\lambda/11$, et la dernière couche en contact avec le substratum rigide une épaisseur de $\lambda/4$. Les résultats montrent des écarts relatifs en général de l'ordre de 10 % au maximum.

Pour analyser le bon fonctionnement des matrices L^* et R^* caractérisant l'influence des forces nodales appliquées sur les frontières verticales du domaine central, nous avons considéré plusieurs longueurs du domaine maillé, allant de 2 à 3λ , la force excitatrice se trouvant toujours placée à une distance égale à λ de la frontière gauche du domaine. Les résultats obtenus aussi bien dans le cas d'un massif sans discontinuité que pour un sol avec discontinuité montrent que les écarts relatifs sont très faibles, ce qui montre que la propagation des ondes vers l'infini se réalise correctement sans réflexion sur les frontières verticales.

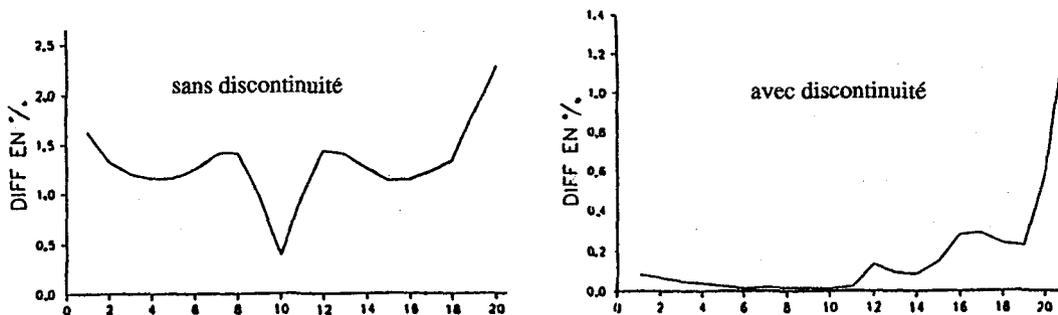


Fig. 5 - Fonctionnement des matrices L^* et R^*

Ce fonctionnement est encore efficace même si la force excitatrice se trouve sur la limite du domaine maillé. Les écarts relatifs obtenus dans ce cas sont inférieurs à 3 %, ce qui est tout-à-fait acceptable.

3.3 - Analyse paramétrique

Comme nous l'avons déjà précisé, pour cette analyse, nous nous ramenons à des facteurs adimensionnels (les longueurs sont par exemple rapportées aux longueurs d'onde λ). Ceci nous permet une généralisation plus appropriée des résultats. Pour définir le facteur d'efficacité du dispositif, nous pourrions envisager d'utiliser le rapport des amplitudes des déplacements obtenus avec et sans discontinuité. Toutefois, cette définition peut conduire à des interprétations délicates (une valeur nulle du déplacement du massif sans discontinuité conduirait par exemple à un facteur infini). Aussi, suivant la méthodologie présentée par Haupt, nous avons défini un "rapport moyen d'efficacité" ou "coefficient de réduction σ_r " par le rapport des 2 aires suivantes :

- d'une part l'aire de l'enveloppe des déplacements verticaux obtenus à la surface du sol sur une longueur de 4λ derrière la discontinuité ;
- d'autre part l'aire de l'enveloppe des déplacements verticaux à la surface du sol libre (sans discontinuité) sur le même domaine d'intégration ;

c'est-à-dire :

$$(28) \quad \sigma_r = \frac{L_1}{L_2}$$

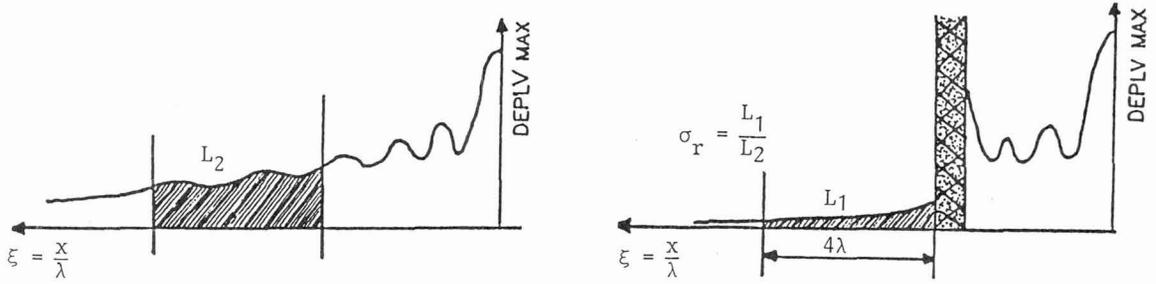


Fig. 6 - Définition de σ_r

Les résultats qui suivent présentent les variations de σ_r en fonction des caractéristiques de la discontinuité (dimensions B, T ; position D) et de la hauteur H du massif.

La figure 7 montre par exemple pour une valeur de BT donnée les variations de σ_r en fonction de T. Dans ce cas, pour un écran en béton, pour $T \geq 0,4$, σ_r est pratiquement constant. Par contre, pour la tranchée, la décroissance de σ_r avec T est permanente.

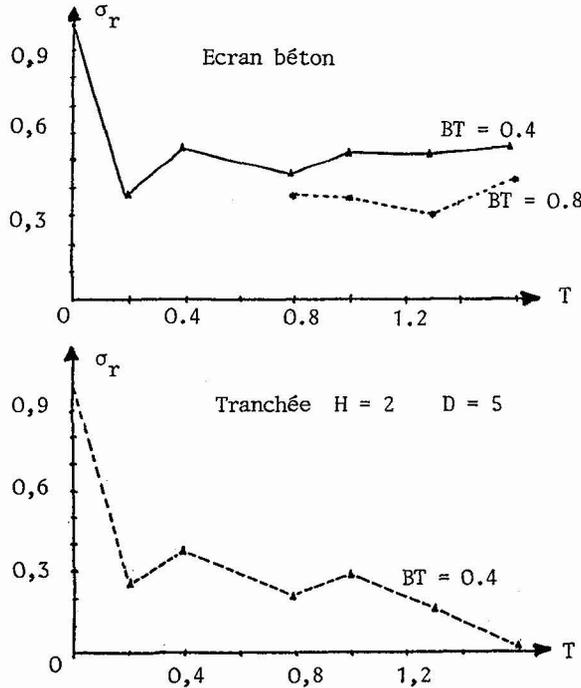


Fig. 7 - Variations de σ_r en fonction des dimensions de la discontinuité

Ceci signifie que pour une tranchée, le paramètre principal est sa profondeur. Par contre, pour un écran en béton, sa section droite constitue le facteur essentiel. Par ailleurs, à dimensions égales, une tranchée est généralement plus efficace qu'un écran en béton. Toutefois, cette dernière solution peut donner des résultats acceptables ($\sigma_r \approx 0,5$ pour le cas analysé).

La figure 8 présente les variations de σ_r en fonction de la distance D entre la source et la discontinuité. Nous nous apercevons que cette distance a un effet négligeable sur le coefficient de réduction.

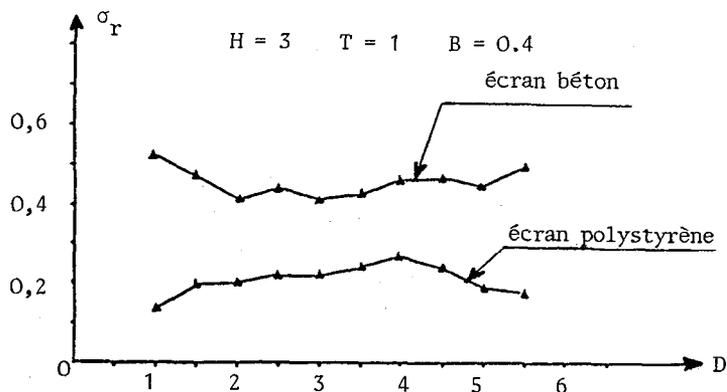


Fig. 8 - Variation de σ_r en fonction de D .

Pour compléter l'étude, nous avons également analysé l'influence de la hauteur H du massif. Les résultats correspondants sont reportés sur la figure 9 où nous justifions le fait que pour $H \geq 2$, le coefficient de réduction ne subit pas de variations importantes. Le choix de $H = 2$ réalisé par Haupt constitue donc une hypothèse raisonnable de calcul.

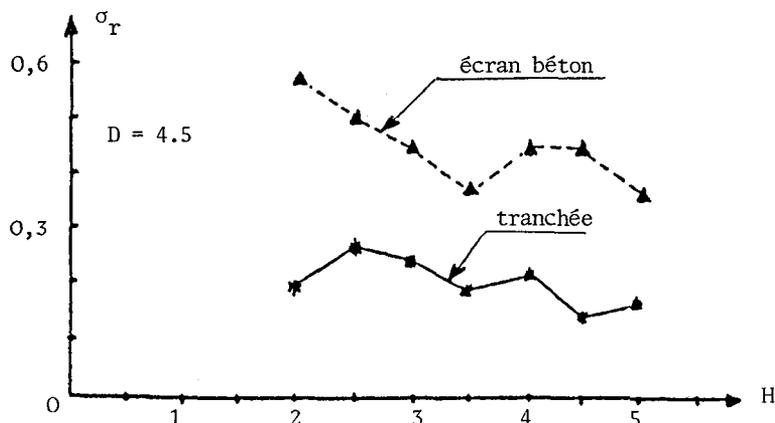


Fig. 9 - Variations de σ_r en fonction de H .

4 - CONCLUSIONS.

Pour les conclusions relatives à cette étude, nous allons reprendre les résultats les plus significatifs de l'analyse paramétrique en les rapprochant des idées émises par différents auteurs. Pour un écran en béton ($H = 2\lambda$, $D = 5\lambda$), au delà d'une certaine profondeur ($T \geq 0,2$), le paramètre caractéristique est la surface réduite de l'écran BT ; plus BT est grand, plus l'efficacité est meilleure. Ces conclusions rejoignent celles de Haupt comme celles correspondant au cas où les caractéristiques du sol et de l'écran ne sont pas très éloignées. Pour les tranchées ouvertes ($H = 2\lambda$, $D = 5\lambda$), nous concluons comme Beskos et Segol que la largeur adimensionnelle n'est pas un paramètre important et d'autre part l'efficacité augmente avec la profondeur T de la barrière. D'autre part, à dimensions égales, une tranchée ouverte est généralement plus efficace (du moins pour les caractéristiques utilisées) qu'un écran en béton mais dans ce cas une réduction du niveau des amplitudes de l'ordre de 70 % est néanmoins tout à fait envisageable.

Tant pour un écran en béton que pour une tranchée remplie de polystyrène (résultats voisins de la tranchée ouverte), nous avons pu vérifier que la distance entre la source et l'écran joue un rôle parfaitement négligeable sur σ_r . D'autre part, si l'épaisseur du massif H est supérieure à 2λ , nous remarquons que les résultats concernant σ_r varient peu, ce qui signifie qu'alors, l'influence des réflexions d'ondes sur le substratum rigide devient négligeable.

Dans cette présentation, nous avons en particulier exposé sommairement les résultats les plus significatifs concernant les critères d'efficacité d'une barrière de discontinuité du type tranchée ou écran, permettant une réduction de l'amplitude des vibrations lors de leur propagation dans le sol. Les conclusions que nous avons tirées de ces résultats concordent globalement avec toutes celles émises dans la bibliographie (Aboudi, Segol, Haupt, Beskos...) et qui semblaient a priori contradictoires parce que sans doute établies avec des conditions ou des paramètres différents, sans parler des diverses méthodes utilisées (différences finies, éléments finis, équations intégrales...).

Cette "mise en ordre" dans la diversité des conclusions justifie l'intérêt primordial de cette étude. Malgré tout, elle est loin de répondre à toutes les préoccupations relatives aux phénomènes étudiés : ainsi l'interaction avec les structures avoisinantes n'a pas été envisagée ; par ailleurs l'analyse ayant été limitée au cas des déformations planes, les conclusions déduites sont-elles généralisables aux problèmes tridimensionnels ?

5 - REFERENCES

- /1/ Aboudi J., Bull. of Seism. Soc. of Amer. 61 n° 3 (1971) 747
- /2/ Aboudi J., Journ. of the Eng. Mech. Div. ASCE 99 Feb. (1973) 69
- /3/ Fuyuki M., Matsumoto Y., Bull. of Seism. Soc. of Amer. 70 n°6 (1980) 2051
- /4/ Segol G., Abel J.F., Lee P.C.Y., Journ. of the Geotech. Eng. Div. ASCE 101 Nov. (1975) 1177
- /5/ Segol G., Lee P.C.Y., Abel J.F., Journ. of the Eng. Mech. Div. ASCE 104 n°3 (1978) 621
- /6/ Haupt W.A., Proceed. DMSR - Karlsruhe vol. 1 (1977) 335
- /7/ Haupt W.A., Proceed. 9th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Tokyo, vol.2 (1977) 251
- /8/ Haupt W.A., Proceed. 10th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Stockholm, vol.3 (1981) 215
- /9/ Emad K., Manolis G.D., Journ. of Eng. Mech. 111 n°2 (1985) 279
- /10/ Beskos D.E., Dasgupta B., Vardoulakis I.G., Comput. Mech. 1 (1986) 43
- /11/ Chao T., Lee P.C.Y., Journ. of the Acoust. Soc. of Amer. 57 n°1 (1975) 78
- /12/ Malek S., Rapport DEA, Univ. Nantes (1989)