

52/86

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

(En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat)

SUJET

DYNAMIQUE DES SOLS

Rèponse Dynamique

D'un Profil De Sol

Proposé par :

L. E. M.

Etudié par :

H. BOULAZREG

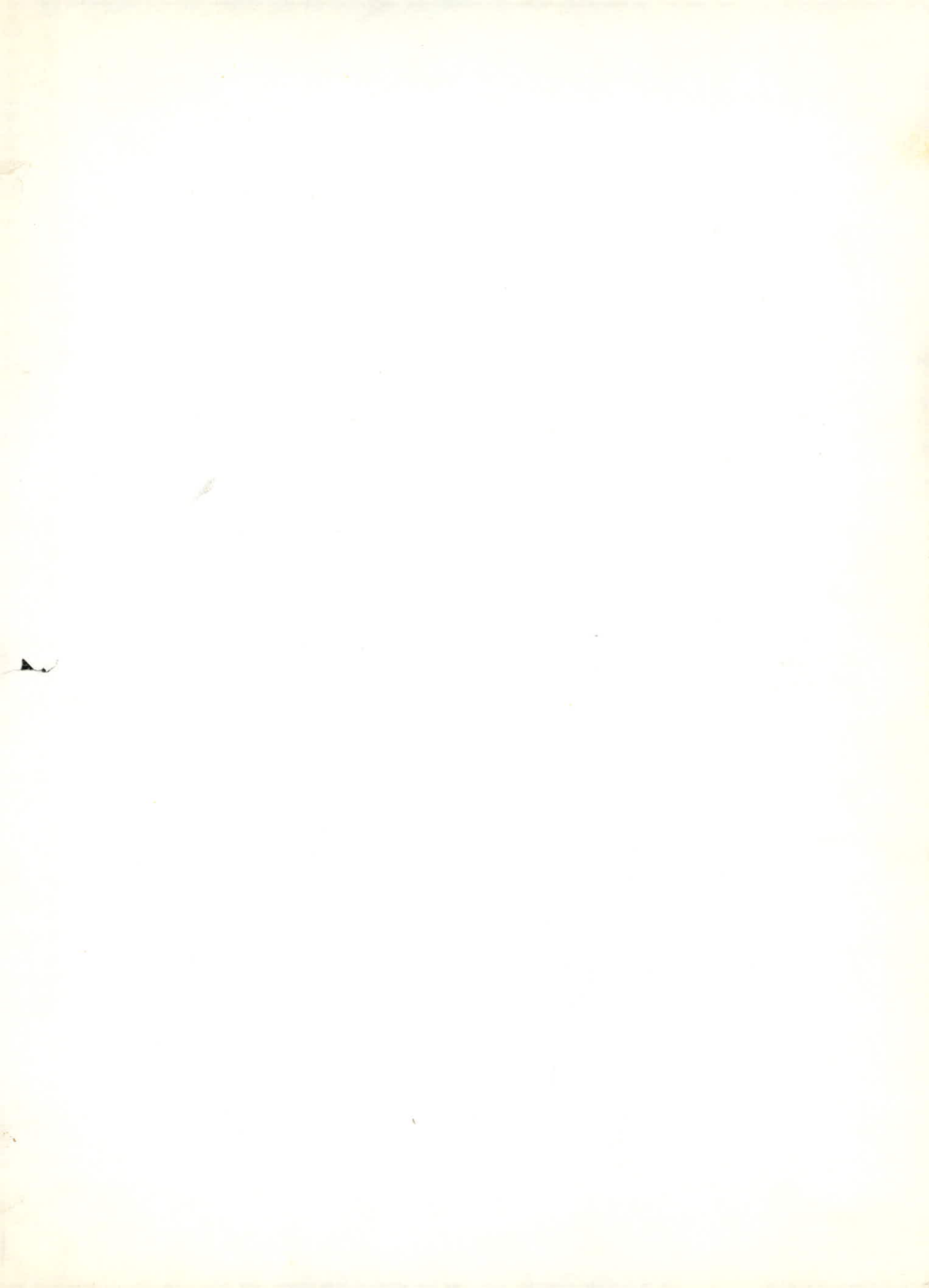
N. KHELIF

Dirigé par :

B. ZEGHLACHE

A. L'HOCINE

PROMOTION : JUIN 1986



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



وزارة التعليم والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

(En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat)

SUJET

DYNAMIQUE DES SOLS

Rèponse Dynamique

D'un Profil De Sol

Proposé par :

L. E. M.

Etudié par :

H. BOULAZREG

N. KHELIF

Dirigé par :

B. ZEGHLACHE

A. L'HOCINE

PROMOTION : JUIN 1986

* Remerciements *

Nous remercions le Laboratoire des Etudes Maritimes pour la proposition du sujet, ainsi que les organismes du C.T.C et du L.T.P.C qui ont contribué aux documents acquis.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé à réaliser ce travail soit par leur soutien moral ou par leur participation à nos travaux.

* Dédicace *

Pour nos très chers parents ,
Pour nos frères et sœurs ,
Ainsi que pour leurs enfants ,
Pour nos amis ,
Pour nos enseignants ,
Nous dédions ce modeste travail.

H. Boulazreg & N. Khelif

- SOMMAIRE -

Introduction	1
Notion de sismologie	2
Schémas à une dimension	5
Comportement dynamique des sols	9
Theorie de l'élasticité	14
Méthode de détermination des paramètres dynamique	21
Position du problème	28
Equation d'onde	31
Solution de l'équation d'onde unidimensionnelle	37
Calcul d'une réponse dynamique d'un profil de sol élastique soumis à une excitation à sa base	43
Exemple d'un cas de sol à 3 couches	51
Méthode des caractéristiques en milieu élastique	53
Programme CHARSOIL	60
Etude d'un exemple	79
Interprétation des résultats	93

INTRODUCTION:

des sols sont le siège de phénomènes dynamiques, soit qu'ils servent d'assises à un ouvrage sollicité dynamiquement par les charges d'exploitations, soit qu'ils constituent le milieu dans lequel une excitation dynamique se propage et se transmet aux constructions avoisinantes.

Notre sujet a pour but d'essayer d'aborder le problème de la réponse dynamique d'un profil de sol soumis à une excitation donnée.

Avant d'aborder le problème proposé, nous avons essayé de donner des notions générales concernant les caractéristiques du sol, l'élasticité ainsi que les types d'ondes internes.

Nous nous sommes limités au cas des ondes réfractées se propageant dans un milieu élastique en premier temps puis viscoélastique en exploitant le programme CHAR_SOIL.

Nous espérons avoir donné satisfaction à notre promoteur, et souhaitons qu'il donnera aux prochaines promotions des idées pour des thèmes plus particuliers.

NOTIONS DE SISMOLOGIE :

I-Origine des tremblements de terre :

des tremblements de terre correspondent à une libération d'énergie dans la croûte terrestre, et qui peut être provoquée par :

- Des glissements le long des failles géologiques.
- Changement d'état dans les roches (changement de volume dû à des changements de contraintes).
- Une activité volcanique produisant des séismes d'intensité relativement faible au voisinage immédiat du volcan.

- D'autres raisons comme des explosions ou la sismicité induite par certains grands réservoirs.

des séismes les plus importants sont ceux provoqués par les mouvements aux frontières des plaques tectoniques comme par exemple le cas de l'Algérie.

II-Mécanisme général de production des séismes :

des séismes tectoniques apparaissent comme des conséquences des lentes déformations qui affectent les régions supérieures du globe terrestre et au cours desquelles des quantités considérables d'énergie s'accumulent dans les matériaux constitutifs sous forme

d'énergie de déformation.

dorsqu'en un point moins résistant ou plus sollicité que les autres, un équilibre limite est dépassé, il se produit une rupture qui s'étend très rapidement de proche en proche aux régions voisines. Elles s'accompagnent de la brusque libération de l'énergie potentielle accumulée dans la déformation et donnent naissance à un ébranlement qui se propage au loin sous la forme d'ondes sismiques, que l'on classifie selon la façon dont elles se propagent à travers la terre :

- Ondes Internes :

* Ondes P : produisant des déplacements dans le sens de la propagation du train d'ondes.

* Ondes S : produisant des déplacements dans deux directions perpendiculaires au sens de propagation des ondes.

- Ondes de surface : qui voyagent le long de la frontière entre deux milieux et à la surface de la terre (ondes de Rayleigh).

III - Caractérisation des tremblements de terre :

1) Magnitude M :

la magnitude M d'un tremblement de terre se

détermine à partir d'un sismogramme selon la définition donnée par Richter qui représente une mesure indirecte de l'énergie libérée par le séisme, laquelle provoque les dégâts.

Entre la magnitude M et l'énergie libérée a été établie la relation suivante =

$$E = 10^{1,8 + 1,5M} \text{ (kJoules).}$$

2) Intensité I:

d'intensité d'un séisme est une mesure de son pouvoir destructeur en un site donné. Un tremblement de terre aura donc une seule magnitude, alors que son intensité pourra varier d'un site à un autre.

3) Foyer au centre =

C'est l'endroit où se produit la perturbation qui provoque le mouvement. Sa détermination s'effectue par recoupement des différents enregistrements sismographiques.

4) Épicentre =

C'est la projection verticale du centre.

5) Distance focale, distance à l'épicentre =

Ce sont les distances de la station d'enregistrement respectivement au foyer et à l'épicentre.

:

SCHEMAS A UNE DIMENSION:

L'étude de quelques schémas à une dimension correspondant à des modèles mécaniques simples servira d'introduction à des études plus complexes des lois de comportements de la matière.

Comme nous ne pouvons approfondir l'étude pour tous les cas, on a juste donné les principaux modèles utilisés.

1 - Cas d'une élasticité parfaite - Schéma de Hooke -

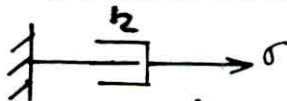


$$\sigma = k \cdot \varepsilon$$

ε : Déformation instantanée.

k : constante du matériau.

2 - Cas d'une viscosité parfaite - Modèle de Newton -



$$\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$$

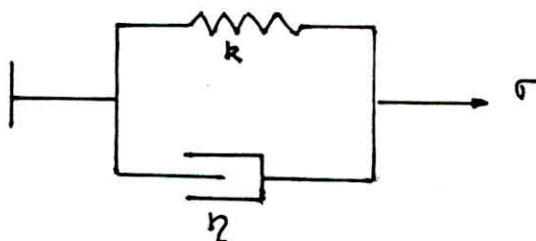
$\dot{\varepsilon}$: vitesse de déformation.

η : constante.

Si $\varepsilon = 0$ quand $t = 0$ on aura : $\varepsilon = \frac{\sigma \cdot t}{\eta}$

3 - Cas d'une visco-Elasticité :

a - Schéma de Terzaghi



En appliquant une tension σ constante entre t_0 et t_1 , l'amortisseur retarde l'extension du ressort qui sans lui s'allongerait immédiatement de σ/k .

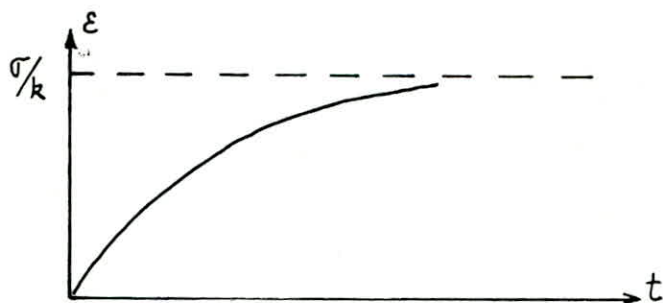
d'Équation du mouvement s'écrit donc:

$$\eta \dot{\epsilon} + k \epsilon = \sigma$$

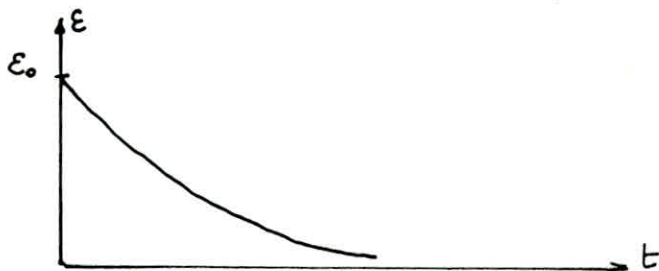
a1 - Si à $t=0$, $\epsilon=0$:

la solution de l'équation différentielle s'écrit sous la forme:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{k} \left(1 - e^{-\frac{k}{\eta} t} \right)$$



a2 - si le système est tendu jusqu'à ϵ_0 puis relâché, la déformation au temps t sera: $\epsilon = \epsilon_0 e^{-\frac{k}{\eta} t}$



Si m est la masse par unité de surface, l'équation du mouvement s'écrit: $m \ddot{\epsilon} + \eta \dot{\epsilon} + k \epsilon = 0$

C'est l'équation différentielle des oscillations harmoniques avec amortissement dont la solution générale s'écrit sous

La forme :

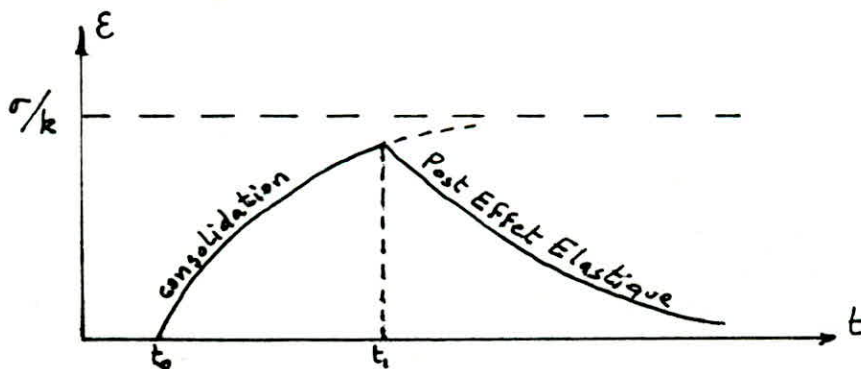
$$\varepsilon = A e^{-\eta t / 2m} \cos \left[(\eta^2 - 4km)^{1/2} \cdot t / 2m + B \right]$$

où A et B sont des constantes déterminées à partir des conditions initiales.

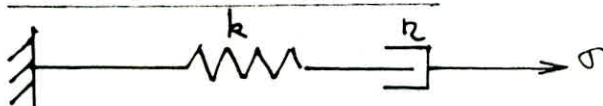
Ce modèle est le plus simple et est utilisé pour représenter l'amortissement des ondes dues au tremblement de terre.

En mécanique des sols, ce phénomène de fluage est appelé consolidation.

Si à l'instant t_1 , la contrainte est supprimée, l'amortisseur retarde le retour du ressort à sa position d'origine, il y a post-effet élastique.



b. Schéma de Maxwell:



Dans ce cas, le ressort et l'amortisseur sont en série, la même contrainte σ agit sur le ressort et l'amortisseur.

Si ε_1 et ε_2 sont les déformations respectives du ressort et de l'amortisseur, on aura:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{k} \quad , \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma}{\eta}$$

La déformation totale sera: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$

ou alors: $\dot{\varepsilon} = \left(\frac{\dot{\sigma}}{k} \right) + \left(\frac{\sigma}{\eta} \right)$.

si au temps $t = 0$, on a une déformation ε_0 , la contrainte au temps t sera donnée par:

$$\sigma = k \varepsilon_0 e^{-kt/\eta}$$

COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES SOLS :

- d'étude du comportement du sol a toujours été faite pour des sollicitations statiques.

On a jusqu'ici ignoré les sollicitations dynamiques qui sont à l'origine de grandes déformations du sol. Ainsi et ce n'est qu'après de très graves accidents comme ceux enregistrés lors des séismes de Nigata et d'Alaska (1964) que les ingénieurs géotechniciens se sont penchés sur ce problème.

En observant des structures de même type fondées sur des sols de nature différente et soumises à une même action dynamique, ces structures présentent des comportements différents. Le sol a donc une grande influence sur la nature du mouvement, d'où la nécessité de l'étude du comportement des sols sous chargements dynamiques pour parvenir en zone sismique à une conception fiable des ouvrages qui y sont fondées, c'est en particulier le cas pour les ouvrages importants comme les centrales nucléaires, les barrages, etc...

La déformabilité d'un sol en régime dynamique peut être considérée comme entièrement caractérisée par trois variables qui sont:

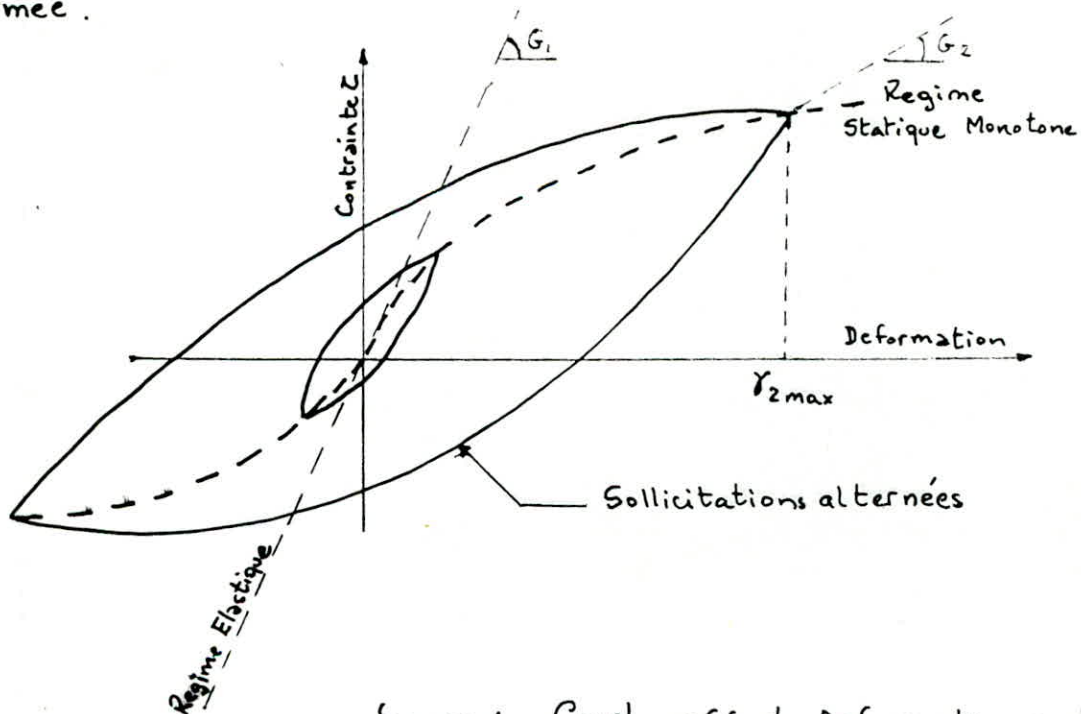
- le module de déformation par glissement G (noté aussi: μ).
- le degré d'amortissement β (rapport de l'amortissement

à l'amortissement critique)

- Le coefficient de poisson ν .

Ces trois variables avec la masse volumique sont celles qui interviennent de façon générale dans les problèmes de propagation d'onde, d'interaction ou de réponse.

Les variables G et β sont des caractéristiques des lois déformations-contraintes. Ces lois ne sont pas linéaires aux grandes déformations, et pour les faibles déformations leur linéarité n'est qu'approchée, donc quelle que soit l'amplitude, le diagramme figuratif d'un cycle de déformations alternées est, après stabilisation, constitué par une boucle d'hysteresis fermée.



- figure 1. Courbe effort - Déformation cyclique

L'apparition d'une boucle d'hysteresis met en évidence une dissipation d'énergie dans le matériau.

Plus la déformation atteinte au cours du cycle est importante, plus l'aire de la boucle augmente et plus cette dissipation est grande.

Le rapport d'amortissement β est défini comme suit:

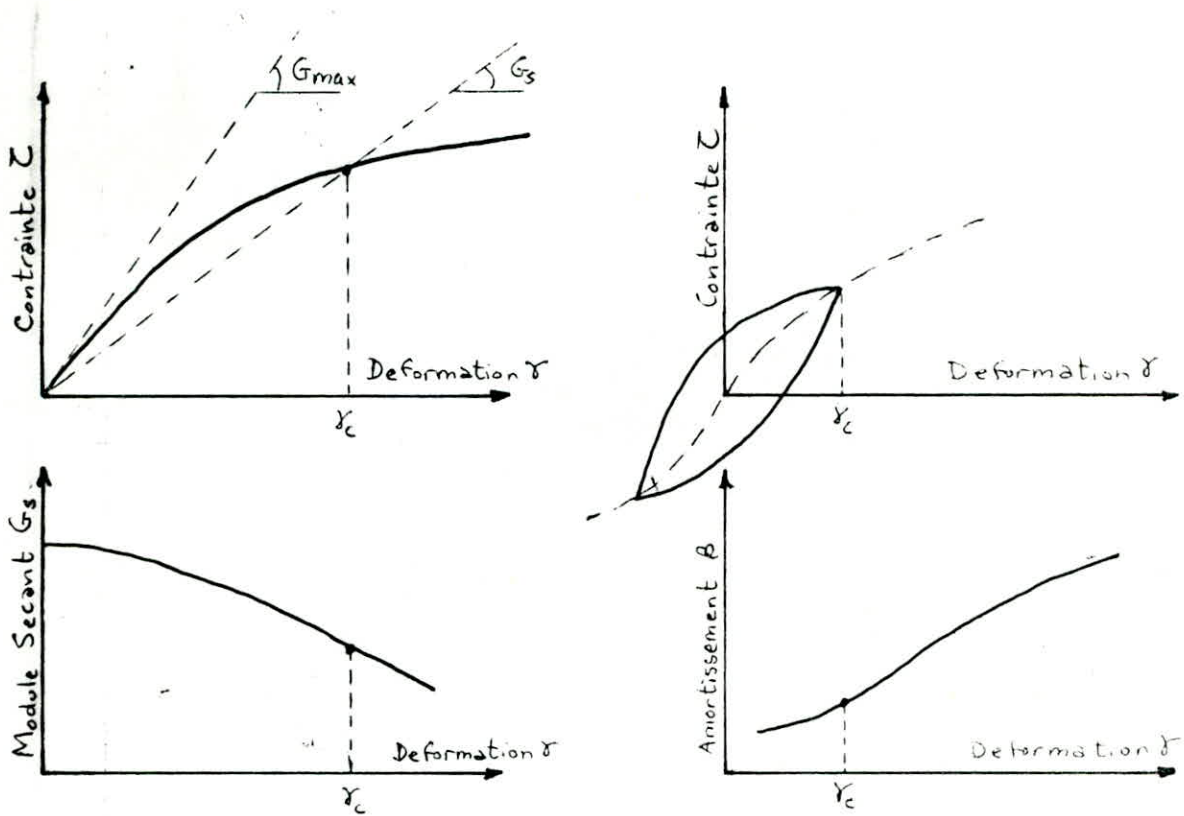
$$\beta = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{G_s \cdot \gamma_{\max}^2} \quad (1)$$

où: ΔW : aire de la boucle représentant l'énergie totale dissipée au cours du cycle.

W : Énergie élastique emmagasinée par le système.

G_s : module sécant obtenu en joignant l'origine à l'extrémité de la boucle, ce module, maximal au voisinage de l'origine, décroît avec la déformation et en conséquence le comportement du sol est fortement non linéaire.

Les figures suivantes présentent les variations du module de cisaillement sécant G_s et de l'amortissement β en fonction de la déformation. Ces représentations résultent de la figure 1 et de la formule 1. Elles mettent en évidence les deux paramètres fondamentaux caractérisant le comportement du sol: G_s et β qui dépendent de la déformation.



Grandeurs caractéristiques du comportement dynamique

Un grand nombre de lois de comportements dynamiques des sols ont été développées mais il ne semble pas qu'un accord ait été atteint pour la loi la plus appropriée. Les modèles linéaires ont le mérite de la simplicité mais ne représentent qu'imparfaitement le comportement du sol. Les modèles non linéaires sont en cours de développement, ils présentent quelques difficultés de mise en œuvre et l'utilisation est plus lourde.

Cependant l'introduction de modèles linéaires équivalents semble être un compromis acceptable, ils sont utilisés dans

les programmes de calcul de réponse dynamique de sol et d'interaction sol-structure .

Modèle linéaire équivalent:

C'est une façon simple de résoudre les problèmes de réponse dynamique de systèmes non linéaire en les remplaçant par des systèmes viscoélastiques linéaires équivalents .

Cette méthode , utilisée par Schnabel, Lysmer, Seed (1972), introduit un modèle linéaire avec un amortissement indépendant de la fréquence . Ce modèle a été par la suite modifiée par Lysmer (1975) dont le modèle linéaire a une réponse en terme d'amplification identique à celle d'un oscillateur simple .

Si G_s , w et β sont les caractéristiques de l'oscillateur simple, le modèle équivalent a la même période propre et un module de cisaillement complexe de la forme :

$$G^* = G_s [1 - 2\beta^2 + 2i\beta \sqrt{1 - \beta^2}] .$$

La courbe effort-déformation de ce modèle est exprimée en notation complexe par : $\tau = G^* \gamma$.

Ce type de modèle est utilisé dans les programmes de calcul de réponse dynamique de sol (Shake) et d'interaction sol-structure (FLUSH). Son utilisation ne nécessite que la

connaissance du module sécant G_s et du pourcentage d'amortissement critique β qui sont aisément mesurables au laboratoire.

Ce modèle linéaire équivalent doit être utilisé en conjonction avec un processus itératif permettant de choisir des valeurs du module G^* et de l'amortissement β compatibles avec le niveau moyen de distorsion induite. De cette façon le caractère non linéaire du sol est pris en compte de façon approximative.

THEORIE DE L'ELASTICITE:

La propagation des ondes élastiques à travers le sol dépend des propriétés des roches d'où la nécessité de l'étude des concepts fondamentaux de l'élasticité.

Quand on applique des forces à la surface d'un corps solide, la dimension et la forme de ce dernier changent; et des forces internes s'opposent à ce changement, le corps tend à revenir dans son état initial lorsque les forces externes sont annulées. Cette propriété s'appelle élasticité.

Nous dirons qu'un corps est élastique s'il retrouve son état initial après avoir été déformé.

La théorie de l'élasticité lie donc les forces extérieures

appliquées à la surface d'un corps aux modifications en dimension et en forme qui en résultent

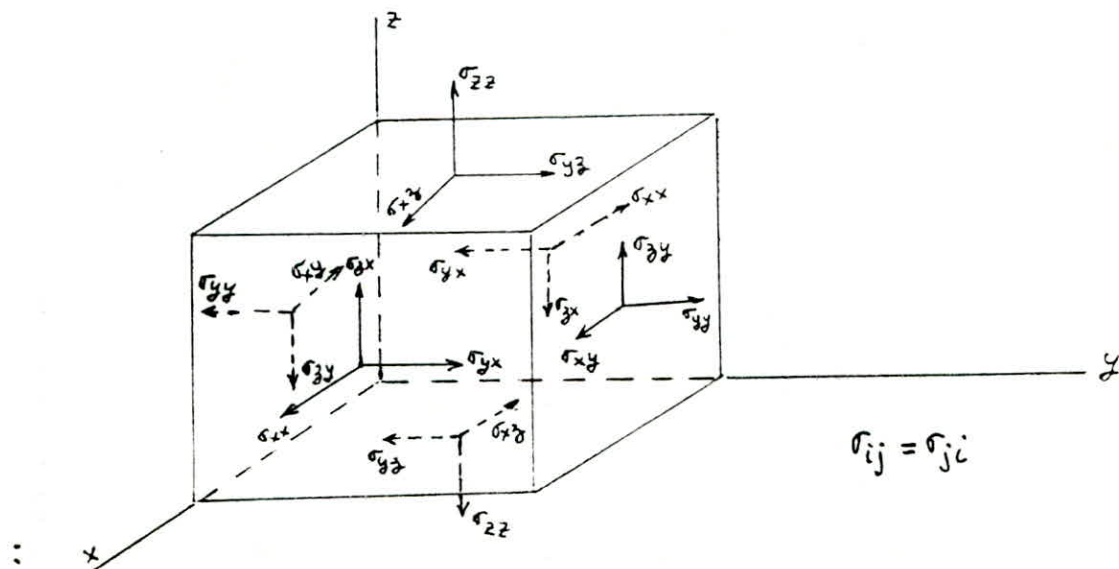
1. Notion de contrainte:

La contrainte est définie comme étant une force par unité de surface (dimension d'une pression).

Si la force est perpendiculaire à la surface, on parle de contrainte normale (ou pression), et lorsque la force est tangentielle à l'élément de surface, la contrainte est dite de cisaillement.

Dans le cas général, toute force qui n'est ni perpendiculaire ni parallèle à la surface élémentaire peut être décomposée en deux composantes normale et tangentielle.

Soit un cube élémentaire à l'intérieur d'un corps soumis à des contraintes; celles-ci agissent sur les six faces du cube.



τ_{ij} : contrainte parallèle à l'axe des i et agissant sur une surface perpendiculaire à l'axe des j .

σ_{ii} : contrainte normale $i = x, y, z$.

τ_{ij} : contrainte tangentielle ($i \neq j$) $i, j = x, y, z$.

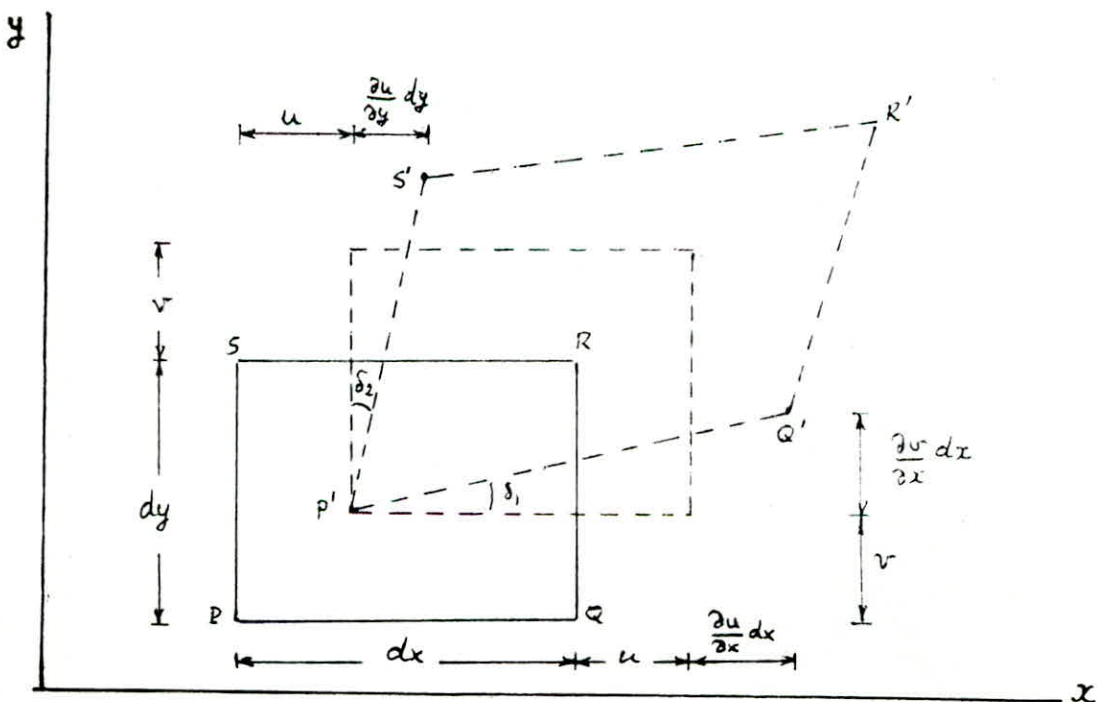
Quand le milieu est en équilibre statique, les contraintes doivent s'équilibrer.

2. Déformation:

La déformation est le changement de formes et de dimensions d'un corps élastique soumis à des contraintes.

2.1. Analyse d'une déformation à deux dimensions:

* Considérons un rectangle $PQRS$ dans le plan x, y soumis à des contraintes :



soient u et v les déplacements selon x et y respectivement, du point P en P' .

On ne pourra parler de déformations que si les composantes de déplacements des autres sommets sont différents de u et v .

Dans le cas contraire il n'y a pas de déformation mais seulement un déplacement du rectangle de quantité u et v dans le système considéré.

En général, les variations de u et de v sont beaucoup plus petites que les quantités dx et dy ; on suppose donc que les termes $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial y}$, etc..., sont assez petits pour que leurs puissances et leurs produits soient négligeables; il vient alors:

1° PQ s'allonge de la quantité $(\frac{\partial u}{\partial x} dx)$ et PS de $(\frac{\partial v}{\partial y} dy)$; ainsi $\frac{\partial u}{\partial x}$ et $\frac{\partial v}{\partial y}$ sont des elongations dans la direction des axes, on les appelle déformations Normales.

2° des angles infinitésimaux δ_1 et δ_2 sont égaux à $\frac{\partial v}{\partial x}$ et $\frac{\partial u}{\partial y}$ respectivement.

3° l'angle droit en P décroît de la quantité:

$(\delta_1 + \delta_2) = (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})$, c'est une mesure de changement de forme du milieu, on l'appelle déformation de cisaillement.

4° le rectangle, dans son ensemble, a tourné dans le sens trigonométrique d'un angle $(\delta_1 - \delta_2) = (\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y})$, il

représente une rotation autour de l'axe $z z'$, il n'implique aucun changement de forme ou de dimension, ce n'est donc pas une déformation, on la note θ_z .

* En étendant l'analyse à trois dimensions où u, v et w représentent les composantes du déplacement d'un point $P(x, y, z)$; les déformations élémentaires s'écrivent donc:

• Déformations Normales: $\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

• Déformation de Cisaillement: $\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$

$$\epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$\epsilon_{zx} = \epsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

• Rotations: $\theta_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}$

$$\theta_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\theta_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

Les changements de dimension donnés par les déformations normales se traduisent par un changement de volume. La variation par unité de volume est appelée dilatation et s'écrit: $\Delta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$

3 - Loi de Hooke:

Quand les contraintes sont petites, les déformations engendrées sont directement proportionnelles aux contraintes qui les provoquent: c'est la loi de Hooke; donc cette loi lie les contraintes aux déformations.

Pour un milieu isotrope, la loi de Hooke s'écrit:

$$\sigma_{ii} = \lambda \Delta + 2\mu \cdot \epsilon_{ii} \quad i = x, y, z.$$

$$\sigma_{ij} = \mu \epsilon_{ij} \quad i, j = x, y, z \quad ; \quad i \neq j.$$

- λ et μ étant les constantes de Lamé.
- μ mesure la résistance au cisaillement et il est appelé module de rigidité ou de cisaillement.
- Les constantes de Lamé peuvent s'écrire en fonction du module d'Young "E" et du coefficient de poisson " ν " par:

$$\lambda = \frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad , \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Ondes P et Ondes S:

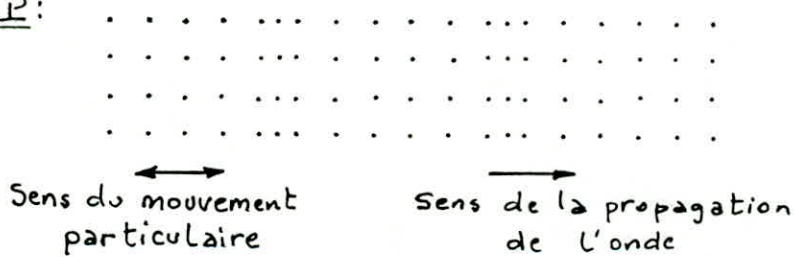
Dans un milieu homogène et isotrope deux types d'ondes peuvent se propager :

a- Le premier type correspond à une variation de la dilatation et il est connu sous les noms d'onde de dilatation, de compression, longitudinale ou onde P.

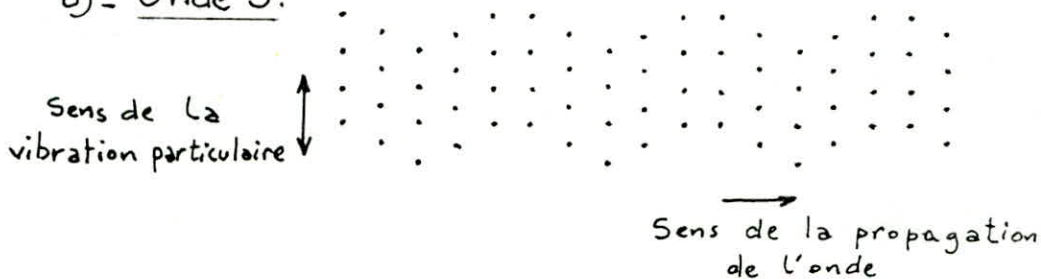
b- Le second type correspond à une variation d'une ou de plusieurs composantes de la rotation et on l'appelle onde de cisaillement, transversale ou onde S.

Exemple: Mouvement particulaire au passage d'une onde plane.

a) Onde P:



b) Onde S:



• Chaque type est défini par une vitesse donnée par:

$$v_p = \left[\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

$$v_s = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

v_p : Vitesse des ondes P.

v_s : Vitesse des ondes S.

ρ : Masse volumique.

Remarque : Dans un milieu où il n'y a pas de propagation d'ondes S, il n'y aura pas de cisaillement: $\mu=0$ et $v_s=0$.

. Relation entre ν , v_p et v_s :

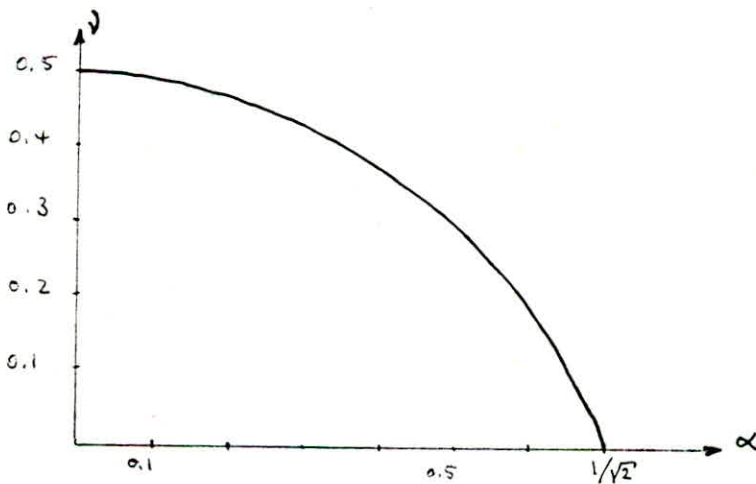
Comme les constantes élastiques sont positives, v_p est toujours supérieur à v_s .

$$\text{Soit } \alpha = \frac{v_s}{v_p}$$

le coefficient de poisson ν est relié à α par:

$$\nu = \frac{0,5 - \alpha^2}{1 - \alpha^2}$$

quand α varie de 0 (quand $\mu=0$) à sa valeur maximale $\frac{1}{\sqrt{2}}$ (quand $\lambda=0$); ν décroît de 0,5 à 0; et v_s varie de 0 à 70% de v_p .



METHODES DE DETERMINATION DES PARAMETRES DYNAMIQUES:

Des modules dynamiques étant reliés aux vitesses sismiques des ondes longitudinales et transversales, leur détermination se fait par des essais sismiques simples. La mesure des vitesses V_T et V_L permet ainsi de calculer G , E et ν .

Les méthodes utilisées pour cela sont:

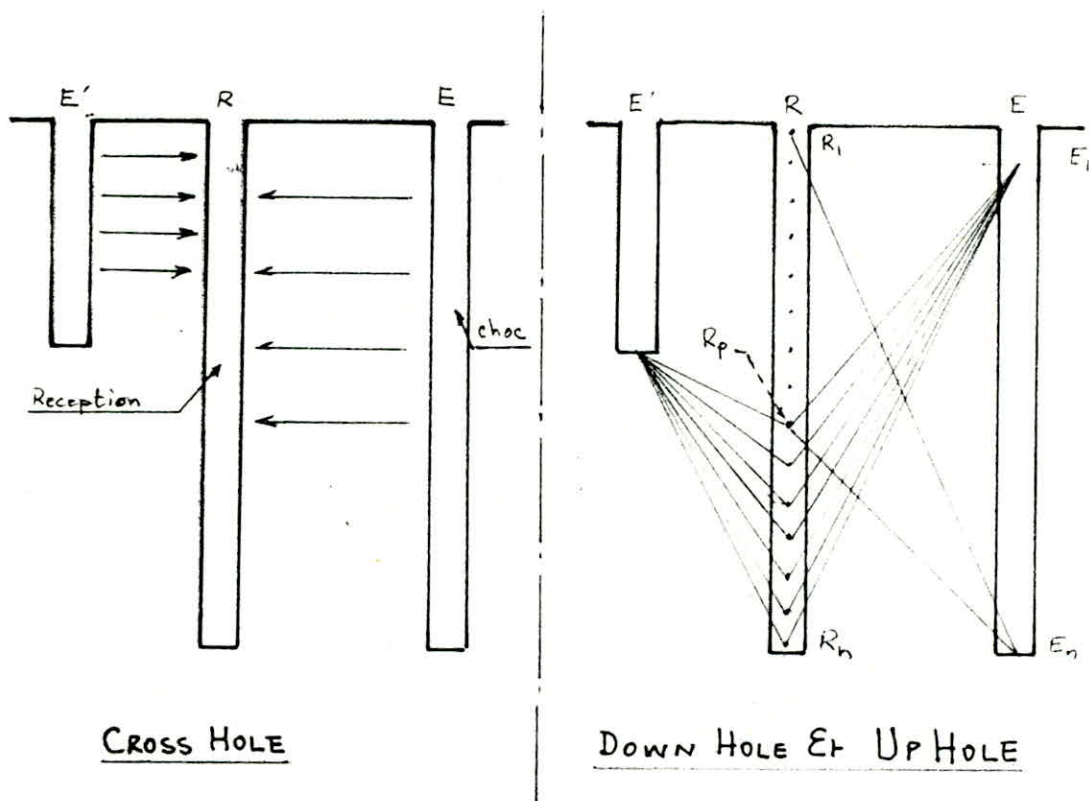
- * **Cross Hole**: Détermine les paramètres suivant la direction horizontale.
- * **UP Hole & Down Hole**: Détermine les paramètres suivant la direction verticale.

Dispositifs de mesure:

a - Cross Hole:

On mesure entre deux points à la même côte, à partir de deux forages, l'un forage d'émission E , l'autre forage de réception R , les vitesses de transmission des ondes longitudinales et des ondes transversales. Cette opération se fait depuis le sommet des forages jusqu'à la profondeur maximum désirée. On exécute ainsi, que ce soit par frappe sur un train de tige ou par un système de frappe autonome, toute une série de mesures à diverses profondeurs. Le pas de mesure et la profondeur maximum dépendent du problème posé (structure à étudier, terrain

concerné...). Généralement, les mesures superficielles sont faites à un pas plus serré que les mesures profondes, en raison de la plus grande diversité des terrains superficiels. Etant donné qu'on doit s'affranchir de réfractions parasites; la distance entre forages E et R, doit être d'autant plus faible que la variation lithologique avec la profondeur est rapide.



b- "Down Hole" et "Up Hole":

On réalise de même des mesures entre forages de façon à ce que les trajets soient verticaux ou sub-verticaux. Si le sens Emission - Réception est de haut en bas, on réalise un

"down hole". Dans le cas contraire il s'agit du "up hole."

On peut utiliser les forages qui servent à exécuter le "Cross hole", si ce dispositif conduit à avoir des rayons sismiques à peu près verticaux.

On peut émettre en un point fixe E_1 et réceptionner les trajets sismiques en positionnant le capteur entre R_p et R_n . La position de R_p dépend de la tolérance qu'on admet en ce qui concerne la non verticalité des rayons. On peut également émettre dans un autre forage E' plus près de R qui assure des trajets plus verticaux et qui permet de continuer l'expérimentation plus haut que le point R_p . Ces cas interprètent la méthode "down hole".

La méthode "up hole" peut-être interprétée en prenant un autre point fixe E_n comme le point d'émission, les rayons sismiques sont réceptionnés par des capteurs situés entre R_i et R_p .

Interprétation des résultats :

C'est la détermination des paramètres dynamiques à partir des essais effectués.

a- Cross hole :

A partir de la distance d'émission-Réception et des deux temps correspondants, lus sur les films, t_T et t_L les valeurs

des vitesses horizontales sont déterminées par:

$$V_L = \frac{x}{t_L} \quad , \quad V_T = \frac{x}{t_T}$$

b. Down Hole et Up Hole:

On peut utiliser deux méthodes:

1. Méthode globale:

Entre le point d'émission et le point de réception, les distances et les temps correspondant donnent les vitesses longitudinales et transversales verticales moyennes le long du trajet du rayon sismique.

2. Méthode différentielle:

Entre deux positions de capteurs de numéro d'ordre n et p , correspondant à des distances x_n , x_p et des temps t_n , t_p , on peut calculer les vitesses verticales entre les points N et P .

$$V = \frac{x_n - x_p}{t_n - t_p} \quad \text{en temps longitudinaux et en temps verticaux.}$$

Expression des paramètres dynamiques:

* Coefficient de poisson:

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} \right)$$

* Module de cisaillement:

$$G = \rho V_T^2$$

* Module de Young:

$$E = 2\rho V_T^2 (1 + \nu)$$

Avec: V_L : vitesse longitudinale.

V_T : vitesse transversale.

ρ : masse volumique.

Remarque: Des observations ont été faites après avoir fait plusieurs essais et cela sur les valeurs des paramètres ainsi que sur l'erreur due à la précision des mesures.

1°) Dans un métal $\nu = 0,25$ conduit à $\frac{V_L}{V_T} \approx 1,75$

Dans les sols et les roches, ν est supérieur à 0,25, et peut atteindre 0,4 à 0,45, ce qui conduit à $\frac{V_L}{V_T} = 1,75$ à 3.

2°). des vitesses des ondes sismiques " V " sont de l'ordre de plusieurs centaines à plusieurs milliers de m/s.

. des vitesses de déplacement des particules " $\frac{du}{dt}$ " sont de l'ordre de quelques mm à quelques cm/s.

3°) Erreurs Maxima sur les paramètres dynamiques dues à l'expérimentation sont les suivantes :

	CROSS HOLE	DOWN HOLE
Distance Emission - Réception	10 m	50 m
$\Delta t = 0,45$ avec $\begin{cases} v_L = 2000 \text{ m/s} \\ v_T = 600 \text{ m/s} \end{cases}$ $G = 1000 \text{ MPa}$ $E = 2500 \text{ MPa}$	$\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} = 2\%$ $\frac{\Delta G}{G} = 12\%$ $\frac{\Delta E}{E} = 12\%$	$\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} = 1\%$ $\frac{\Delta G}{G} = 8\%$ $\frac{\Delta E}{E} = 8\%$
$\Delta t = 0,33$ avec $\begin{cases} v_L = 5000 \text{ m/s} \\ v_T = 2500 \text{ m/s} \end{cases}$ $G = 15000 \text{ MPa}$ $E = 40000 \text{ MPa}$	$\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} = 20\%$ $\frac{\Delta G}{G} = 23\%$ $\frac{\Delta E}{E} = 24\%$	$\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} = 16\%$ $\frac{\Delta G}{G} = 16\%$ $\frac{\Delta E}{E} = 18\%$

• $\frac{\Delta G}{G}$ passe de 12 à 23% quand G augmente de 1000 à 15000 MPa.

• $\frac{\Delta E}{E}$ passe de 12 à 24% quand E augmente de 25000 à 40000 MPa.

• L'erreur $\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t}$ ne dépend que de l'erreur sur le temps $\frac{\Delta t}{t}$.

Position du Problème:

L'objet de ce sujet est le calcul de la réponse dynamique d'un profil de sol, c'est-à-dire la détermination, en tout point du profil, des déplacements ou déformations, pour cela notre étude devra employer les étapes suivantes:

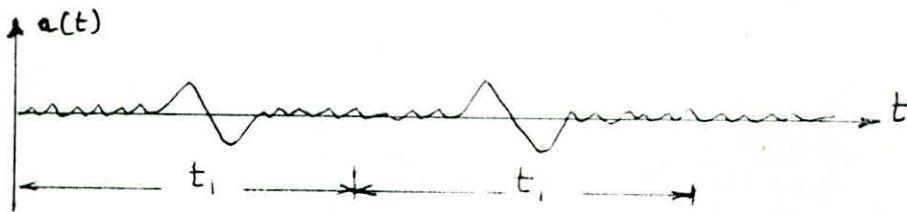
1- Mise en équation du problème et pour cela, on donnera la nature et la direction de l'onde de propagation .

2- Choix de la modélisation adoptée pour représenter le milieu . Cette modélisation comprend une modélisation d'origine géométrique définissant un milieu continu ou discontinu; et une modélisation liée au choix de la loi de comportement du matériau (élastique, visco-élastique, élastoplastique).

3- Détermination des conditions aux limites, et en particulier définition du point d'application du mouvement de contrôle .

Le choix de la méthode d'intégration sera pour la solution numérique dans le domaine des fréquences et pour cela nous supposons que le signal reçu a été décomposé en série de Fourier c'est-à-dire qu'on aura une série d'harmonique, la solution sera évaluée pour chaque harmonique et la superposition des résultats individuels nous donnera la réponse globale.

Rappel sur les séries de Fourier:



Soit une accélération harmonique qui peut être décomposée en série de Fourier dont l'expression est la suivante :

$$a(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n \omega_0 t + B_n \sin n \omega_0 t).$$

où : $\omega_0 = \frac{2\pi}{t_1}$

avec $A_n = \frac{2}{t_1} \int_0^{t_1} a(t) \cos n \omega_0 t dt.$

$$B_n = \frac{2}{t_1} \int_0^{t_1} a(t) \sin n \omega_0 t dt.$$

en sachant que :

$$a \cos \theta + b \sin \theta = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \cos(\theta - \phi).$$

où : $\phi = \arctg \frac{b}{a}.$

L'expression de l'accélération devient :

$$a(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n \omega_0 t - \phi_n).$$

Avec $\phi_n = \text{Arc tg} \frac{B_n}{A_n}$

$$a_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}.$$

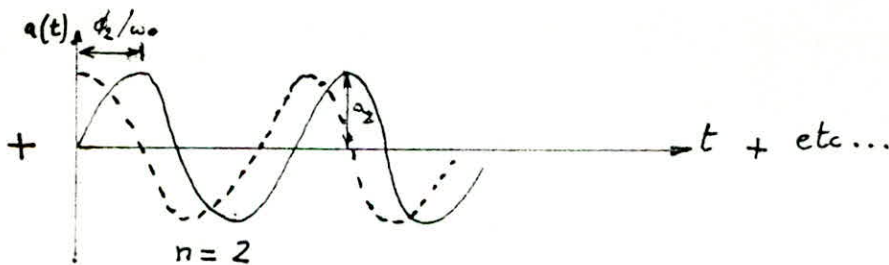
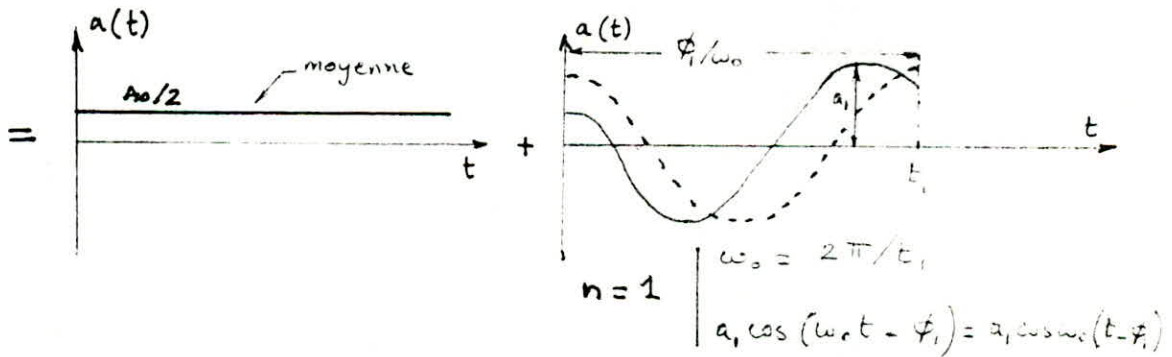
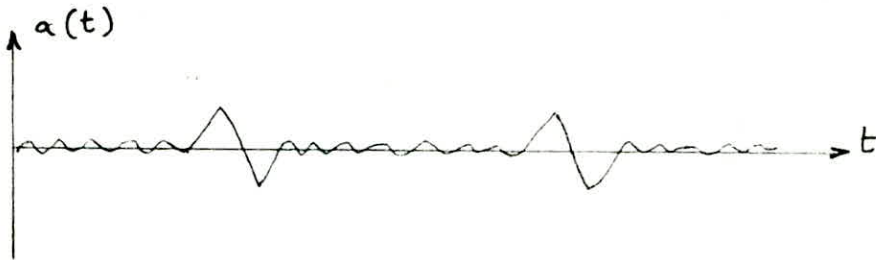
Remarque:

a* Si $\omega = \omega_n = n\omega_0$ pour $n = 1, 2, 3, \dots$

$$F_s(\omega) = \frac{2}{T_1} \cdot a_n.$$

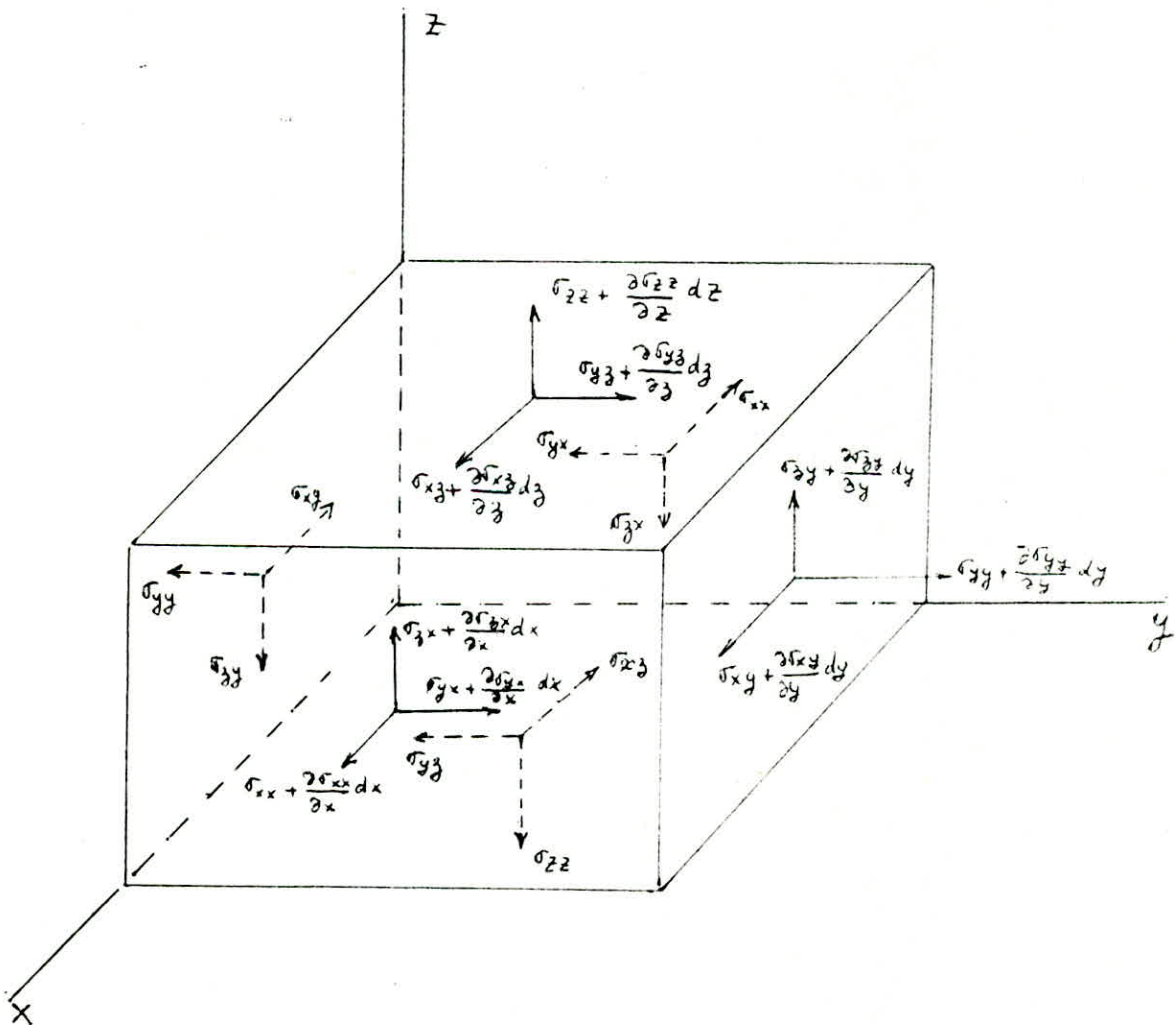
b* Dans le cas pratique on ne calcule pas les intégrales, on évalue les coefficients a_n, B_n et on utilise un algorithme pour l'ordinateur F.F.T (Fast Fourier transform).

Graphiquement on aura:



EQUATION D'ONDE:

Nous avons étudié jusqu'à présent un milieu en équilibre statique. Examinons le cas où les contraintes ne sont plus équilibrées qui est le cas du passage d'une onde.



Ecrivons l'équilibre des forces, d'après la deuxième loi de Newton, la force non équilibrée est égale au produit de la masse par l'accélération; d'où les équations du mouvement suivant les trois axes s'écrivent:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}$$

Ces équations lient le déplacement aux contraintes. En utilisant la loi de Hooke, nous obtenons des équations où ne figurent que les déplacements.

Preons l'équation suivant l'axe des x:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \Delta + 2\mu \epsilon_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \epsilon_{xx}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu \epsilon_{xz}). \end{aligned}$$

Comme λ et μ sont des constantes, nous aurons

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \lambda \frac{\partial \Delta}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial \epsilon_{xx}}{\partial x} + \mu \frac{\partial \epsilon_{xy}}{\partial y} + \mu \frac{\partial \epsilon_{xz}}{\partial z}$$

En remplaçant les déformations par les déplacements, il vient que:

$$V_s^2 = \frac{f}{\mu}$$

$$V_p^2 = \frac{f}{\lambda + 2\mu}$$

Nous avons :

$$\int \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

ondes P et S, nous écrivons :

En essayant d'introduire les expressions des vitesses des

$$\int \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 w}{\partial \Delta} + \mu \Delta^2 w$$

$$\int \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 v}{\partial \Delta} + \mu \Delta^2 v$$

les mouvements selon y et z :

Des équations semblables peuvent être établies pour

$$\Delta^2 u = \text{La plaine de } u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$\int \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u}{\partial \Delta} + \mu \Delta^2 u$$

$$\int \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial \Delta} + \mu \Delta^2 u + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\int \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial \Delta} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$v_p^2 - v_s^2 = \frac{\lambda + \mu}{\rho}$$

Nous obtenons l'expression suivante :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v_s^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + (v_p^2 - v_s^2) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right)$$

Par analogie, on obtient des équations semblables pour les déplacements v et w .

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = v_p^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + v_s^2 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + (v_p^2 - v_s^2) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = v_p^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + v_s^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + (v_p^2 - v_s^2) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial y} \right)$$

Ces équations traduisent le déplacement d'une particule suivant les trois axes, soumise à un passage d'onde P et S de vitesses v_p et v_s respectivement.

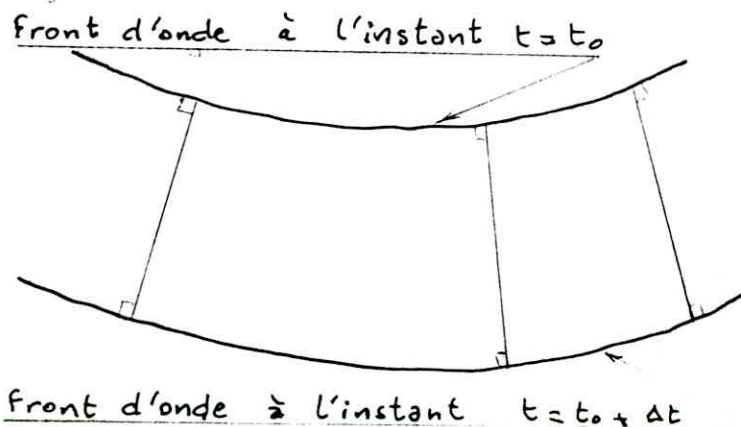
Définition d'un front d'onde:

On appelle front d'onde, une surface dont la position est variable dans le temps et qui est le lieu géométrique des points affectés à l'instant t du même mouvement de l'onde. Dans le cas d'un milieu isotrope, le front d'onde est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Principe de Huygens:

Ce principe nous permet de comprendre le trajet des ondes et la transmission des perturbations dans la terre.

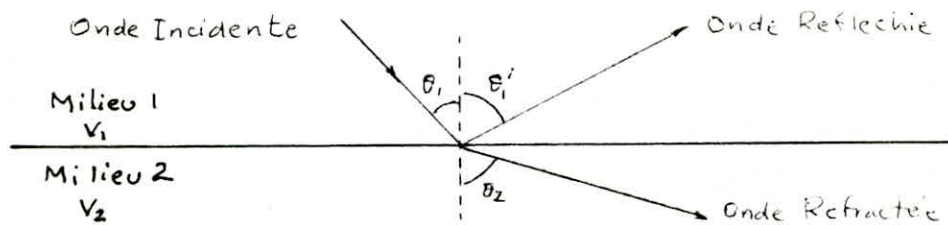
Le principe est que tout point d'un front d'onde peut être considéré comme une nouvelle source d'onde; c'est-à-dire, en connaissant la position d'un front d'onde à un instant donné, on peut déterminer ses positions futures en considérant chaque point comme le premier front d'onde d'une nouvelle source.



Usage du principe de Huygens pour le tracé
d'un nouveau front d'onde

Réflexion et Réfraction:

dorsqu'une onde rencontre un changement brutal de propriétés élastiques, une partie de l'énergie est réfléchiée dans le même milieu, l'autre partie est réfractée dans le second milieu avec un changement de la direction de propagation se produisant à l'interface.



Reflexion et Réfraction d'une Onde Plane

En appliquant le principe de Huygens, nous pouvons établir les lois de la réflexion et de la réfraction :

* l'angle de réflexion θ_1' est égal à l'angle d'incidence θ_1 .

* l'angle de réfraction θ_2 est lié à l'angle d'incidence θ_1 par

la relation suivante :
$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} = \text{Constante.}$$

Cette relation exprime la loi de la réfraction dite aussi loi de Snell ou de Descartes.

Condition aux limites :

Comme il a été exposé, lorsqu'une onde atteint une surface séparant deux milieux de propriétés élastiques différentes, elle donne naissance à des ondes réfléchies et réfractées. Les relations entre les différentes ondes s'établissent à partir des équations liant les tensions et les déformations sur chacun des côtés de l'interface ; et à la limite entre les deux milieux, nous devons avoir la continuité des tensions et des déformations.

SOLUTION DE L'EQUATION D'ONDE POUR UN MILIEU ELASTIQUE DANS LE CAS UNIDIMENSIONNEL :

Hypothèse sur la source :

On suppose que les propagations d'ondes sont initialisées par une source n'émettant qu'un seul type d'onde (onde P ou onde S). On suppose qu'il n'y a pas de conversions d'onde P en S et vice-versa. On suppose qu'il n'y a pas réflexion des ondes et que seules les ondes réfractées se propagent à travers les diverses couches.

Il s'agit d'une source ponctuelle dont est issue un front d'onde plane.

CHOIX D'UN MODELE MECANIQUE :

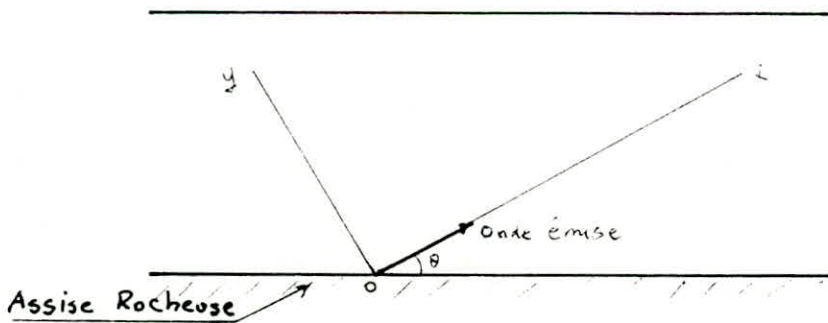
On fait les hypothèses suivantes :

- le milieu est solide, composé de couches homogènes, planes et horizontales, d'épaisseur connue.
- le milieu est continu et isotrope.
- Il est parfaitement élastique : les composantes du tenseur des déformations sont des fonctions linéaires des composantes du tenseur des contraintes (loi de Hooke). Ce qui est justifié dans le cas de petits déplacements. Il n'y a donc pas d'absorption.

CHOIX DU REPERE :

On rapporte le milieu à un système d'axes cartesiens (p, x, y) dont l'origine coïncide avec le point de la source et tel que l'axe ox correspond à la direction de la propagation de l'onde sous un angle θ par rapport à l'assise rocheuse supposée horizontale.

Une particule située au point M de coordonnées $(x, 0)$ subit au passage de l'onde un déplacement par rapport à sa position d'origine noté u qui n'est fonction que de x et de t , c'est à dire qu'on se limite à un problème unidimensionnel.



CONDITION AUX LIMITES :

Dans ce cas, nous avons deux conditions à formuler qui sont :

a- Condition à l'origine :

À l'origine du repère $(x=0, y=0)$, nous avons :

$$u = a \sin \omega t \quad \forall t.$$

a et ω étant respectivement l'amplitude et la fréquence de l'onde émise, et sont supposées être calculées lors de la décomposition du signal en série de Fourier, elles seront donc considérées comme des valeurs connues.

b. Condition à l'interface:

Dans le cas d'un milieu élastique stratifié plan, la continuité des contraintes et des déplacements à l'interface entre les milieux n et $n+1$ peut s'écrire:

$$U_n = U_{n+1}$$

$$\sigma_n = \sigma_{n+1}$$

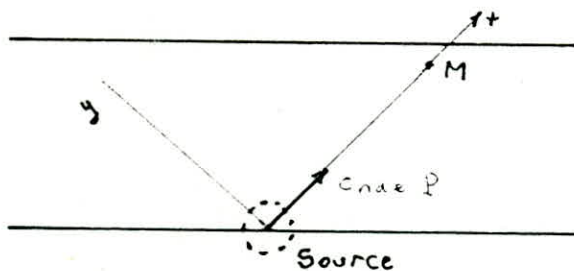
• U_n et U_{n+1} étant sur le même axe.

• σ_n et σ_{n+1} sont les contraintes normales à l'interface.

ETUDE DE LA SOLUTION:

a. Cas d'une onde P:

Soit une particule M située dans une colonne de sol soumise au passage d'une onde P.



On se limite donc qu'à l'étude d'un mouvement

Longitudinal suivant l'axe des x dont l'équation s'écrira:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1).$$

. u étant le déplacement suivant l'axe des x .

Pour résoudre cette équation, faisons un changement de variables tel que:

$$\alpha = x - v_p \cdot t$$

$$\beta = x + v_p \cdot t$$

soient

$$x = \frac{\alpha + \beta}{2}$$

$$t = \frac{\beta - \alpha}{2v_p}$$

u est alors fonction de α et β ; on a donc:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{\partial \beta}{\partial x} = 1 \quad \text{d'où} \quad \left\| \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{\partial u}{\partial \beta} \right.$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = -\frac{\partial \alpha}{\partial t} = v_p \quad \text{d'où} \quad \left\| \quad \frac{\partial u}{\partial t} = v_p \left(\frac{\partial u}{\partial \beta} - \frac{\partial u}{\partial \alpha} \right) \right.$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha \partial \beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial \beta \partial \alpha} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial \beta^2} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha \partial \beta} + \frac{\partial^2 u}{\partial \beta^2} \quad (2) \quad \text{avec} \quad \frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{\partial \beta}{\partial x} = 1$$

De même pour:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_p^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} - 2 \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha \partial \beta} + \frac{\partial^2 u}{\partial \beta^2} \right) \quad (3) \quad \text{avec } \frac{\partial \beta}{\partial t} = -\frac{\partial \alpha}{\partial t} = V_p$$

En reportant les équations (2) et (3) dans (1), nous obtenons que :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \alpha \partial \beta} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial \alpha} \right)}{\partial \beta} = 0$$

Ce qui signifie que $\frac{\partial u}{\partial \alpha}$ est indépendante de β et que :

$$\frac{\partial u}{\partial \alpha} = F(\alpha) \quad \text{d'où} \quad u = \int F(\alpha) d\alpha + G(\beta)$$

$$u = F(\alpha) + G(\beta)$$

En remplaçant α et β par leurs valeurs, la solution générale de l'équation du mouvement sera de la forme :

$$u = F(x - V_p t) + G(x + V_p t).$$

Le mouvement du solide est la superposition de deux mouvements se propageant en sens opposé.

Le terme $F(x - V_p t)$ traduit la propagation du mouvement à la vitesse V_p : Dès que le solide est soumis à un effort il y a élongation qui se transmet à tout le solide avec la vitesse V_p , d'où création d'un front d'onde se propageant à la même vitesse V_p .

Le second terme $G(x + V_p t)$ traduit une élongation qui se propage en sens opposé du premier mouvement.

Il est intuitif qu'à la création d'un ébranlement et

suivant le sens dans lequel on considère la propagation, on ne prendra en compte que le terme $F(x - v_p t)$ ou le terme $G(x + v_p t)$.

Toute fonction de $(x - v_p t)$ ou $(x + v_p t)$ telle que $u = f(x - v_p t)$ ou $f(x + v_p t)$, est solution si u et ses deux premières dérivées sont définies et continues.

b. Cas d'une onde S:

Avec un raisonnement identique à celui du premier cas mais en ne considérant que des efforts tangentiels.

Dans ce cas on aura un mouvement transversal dont l'équation peut s'écrire :

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} = v_T^2 \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2}$$

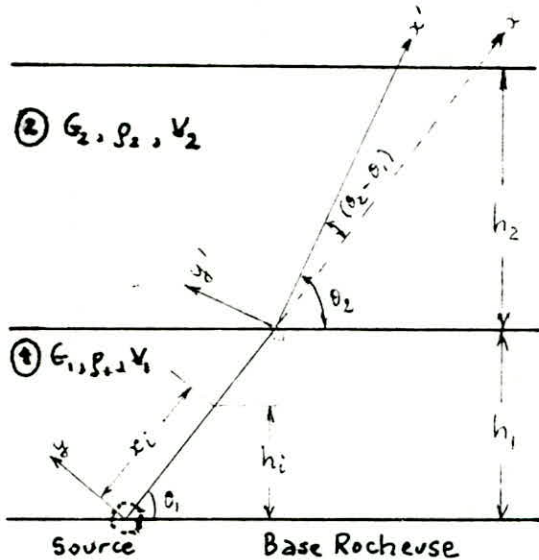
Avec le même changement de variables on aboutit à :

$$v = F'(x - v_T t) + G'(x + v_T t).$$

Cette expression traduit la propagation d'une onde avec une vitesse v_T suivant un axe engendrant ainsi un déplacement v des particules du solide suivant un axe perpendiculaire à celui de la propagation de l'onde.

CALCUL DE LA REPONSE DYNAMIQUE D'UN PROFIL DE SOL ELASTIQUE SOUMIS A UNE EXCITATION SINUSOÏDALE A SA BASE ROCHEUSE :

Cas d'un bicouche :



v : Vitesse de la propagation d'onde

G : Module de cisaillement.

ρ : Masse volumique

h : Epaisseur de la couche

θ_2 : Angle de refraction

θ_1 : Angle d'incidence de l'onde émise.

. Soit une source ponctuelle n'émettant qu'un seul type d'onde et dont l'équation du mouvement s'écrit :

$$u = A \sin \omega t$$

ou A : Amplitude de l'onde émise.

ω : Pulsation de l'onde émise.

a. Etude de la couche 1 :

. Soit un point I

. la distance parcourue à ce point est : $x_i = \frac{h_1}{\sin \theta_1}$

qui correspond à un temps $t_i = \frac{x_i}{v_1} = \frac{h_1}{v_1 \sin \theta_1}$

Comme c'est un milieu élastique, l'équation du mouvement du point I sera l'équation initiale avec un déphasage φ_i qui sera:

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{T} \cdot t_i = \omega t_i$$

Et l'équation du mouvement sera: $u_i = A \sin(\omega t + \varphi_i)$.

b - Étude de l'interface:

Soient deux points N et N' qui sont juste à l'interface des couches 1 et 2.

l'onde atteindra l'interface au point N au temps:

$$t_N = \frac{h_1}{v_1 \sin \theta_1}$$

le mouvement à l'interface se traduit par:

$$u_N = A \sin(\omega t + \varphi_N)$$

$$\text{ou } \varphi_N = \omega t_N$$

c - Étude après l'interface:

Arrivée à l'interface, l'onde se refractera d'un angle $\theta_2 = \text{Arc sin} \left[\frac{v_2}{v_1} \cdot \sin \theta_1 \right]$ (loi de Descartes).

le point N' aura comme équation:

$$u_{N'} = A' \sin(\omega' t + \varphi')$$

Comme N et N' sont deux points confondus, la continuité des déplacements à l'interface nous impose que:

$$: \quad u_N \Big|_{x = \frac{h_1}{\sin \theta_1}} = u_{N'} \Big|_{x = 0} \cdot \cos(\theta_2 - \theta_1)$$

où $\cos(\theta_2 - \theta_1)$ est l'angle de projection de $U_{N'}$ sur l'axe portant U_N .

• A $x=0$, $y'=0$ (Pour $U_{N'}$).

• A $x = \frac{h_2}{\sin \theta_1}$, $y_N = \omega t_N = y$

D'où on aura :

$$A \sin(\omega t + y) = (A' \sin \omega' t) \cdot \cos(\theta_2 - \theta_1)$$

En identifiant les termes, on trouve :

$$A' = \frac{A}{\cos(\theta_2 - \theta_1)}$$

$$\omega' t = \omega t + y \quad \text{ou alors} \quad \omega' = \omega + \frac{y}{t}$$

Le mouvement dans la couche 2 sera défini à partir de l'équation du mouvement du point N' en le prenant comme nouvelle origine (Principe de Huygens) et dont l'équation s'écrit :

$$u = \frac{A}{\cos(\theta_2 - \theta_1)} \sin(\omega t + y) \quad \text{à} \quad (x'_{N'} = 0, y'_{N'} = 0)$$

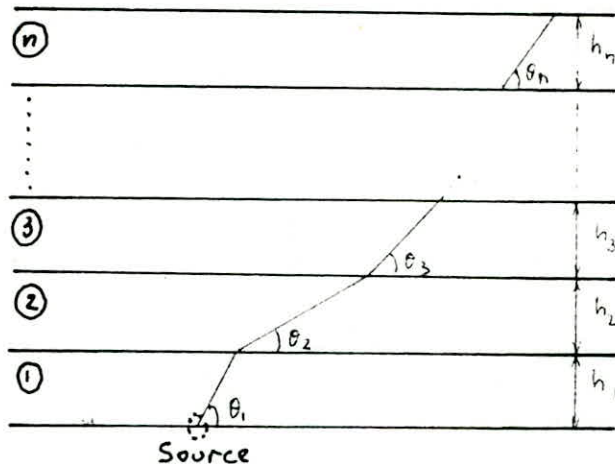
Le mouvement à la surface du sol sera :

$$u_s = \frac{A}{\cos(\theta_2 - \theta_1)} \cdot \sin(\omega t + y + y'_s)$$

où y'_s est le déphasage correspondant au temps de parcours entre l'interface des couches et la surface du sol :

$$\varphi'_s = \omega \cdot t_s = \omega \frac{h_2}{v_2 \cdot \sin \theta_2}$$

Cas d'un multicouche =



En raisonnant de la même manière que précédemment, on peut établir l'équation du mouvement à l'interface des couches 2 et 3 qui sera :

$$u_3 = \frac{A_2}{\cos(\theta_3 - \theta_2)} \sin(\omega t + \varphi_1 + \varphi_2)$$

ou $\varphi_1 = \frac{h_1}{v_1 \sin \theta_1}$

$$\varphi_2 = \frac{h_2}{v_2 \sin \theta_2}$$

$$A_2 = \frac{A_1}{\cos(\theta_2 - \theta_1)}$$

En continuant la démarche jusqu'à la couche n , on aura :

$$U_n = A_n \sin(\omega t + \int_n)$$

$$\text{ou } A_n = \frac{A_{n-1}}{\cos(\theta_n - \theta_{n-1})} = \frac{A_{n-1} \cdot A_{n-2}}{\cos(\theta_n - \theta_{n-1}) \cdot \cos(\theta_{n-1} - \theta_{n-2})}$$

$$= \frac{A_1}{\prod_{i=2}^n \cos(\theta_i - \theta_{i-1})}$$

$$\int_n = \omega \sum_{i=1}^{n-1} t_i = \omega \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{V_i \sin \theta_i}$$

$$\theta_i = \text{Arc sin} \left[\frac{V_i}{V_1} \sin \theta_1 \right]$$

Exemple d'un cas d'onde S:

Dans ce cas, la vitesse V_s est déterminée par:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Et l'équation du mouvement de la couche n s'écrit:

$$U_n = \frac{A_1}{\prod_{i=2}^n \cos(\theta_i - \theta_{i-1})} \sin \left[\omega t + \omega \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\frac{\rho_i}{G_i}} \frac{h_i}{\sin \theta_i} \right]$$

Un programme simple en Basic nous permet de calculer le déplacement en chaque point du profil du sol et de tracer sa courbe représentative.

Les données qu'on doit introduire dans un premier temps sont:

a- les caractéristiques pour chaque couche:

Epaisseur "EP", la masse volumique "RHO" et le module

de cisaillement "G".

b- L'angle d'incidence de l'onde émise "THETA 1" ainsi que son amplitude "A" et sa pulsation "OM".

Pour chaque point donné par sa profondeur, les résultats donneront :

a. L'angle de réfraction à chaque interface: THETA (I).

b. Le temps d'arrivée de l'onde à ce point: T1.

c. Le déphasage à ce point: PHI.

d. La courbe représentative du déplacement en fonction du temps.

Remarque: Ce programme n'est pas limité au calcul des déplacements, il peut être employé pour des vitesses ou des accélérations, d'où dépendent des conditions données à la source en ce qui concerne l'amplitude et la pulsation.

```

10 REM *****
20 REM ***      REPONSE DYNAMIQUE D'UN PROFIL DE SOL ELASTIQUE      ***
30 REM *****
40 CLS
50 GOSUB 60 : GOTO 100
60 DIM THETA(100),RHO(100),G(100),EP(100),S(100),Z(100),Z1(100),Z2(100),T1(100)
,D1(100),E(100),Y(100),I(100),J(100) : RETURN
70 REM *****
80 REM ***      DEFINITIONS ET ENTREES DES DONNEES      ***
90 REM *****
100 INPUT "A QUEL PROFONDEUR SE TROUVE LE POINT";Z2
110 PRINT "THETA1 : Angle d'incidence de l'onde émise par rapport à la surface
duLIST"
120 PRINT "A : Amplitude de l'onde émise donné en metre"
130 PRINT "OM : Pulsation de l'onde émise donnée en radians"
140 PRINT "T : Durée du seisme donnée en secondes"
150 INPUT "ENTRER LES VALEURS DE THETA(1),N,A,OM,T";THETA(1),N,A,OM,T
160 PRINT "EP : Epaisseur de chaque couche"
170 PRINT "RHO : Masse Volumique donnée en Kg/m3"
180 PRINT "G : Module de cisaillement donné en N/m2 (Pa)"
190 FOR I=1 TO N
200 PRINT "ENTRER LES VALEURS DE EP,RHO ET G POUR LA COUCHE";I
210 INPUT EP(I),RHO(I),G(I)
220 NEXT I
230 REM *****
240 REM ***DETERMINATION DE LA HAUTEUR DU POINT A PARTIR DE LA BASE ROCHEUSE***
250 REM *****
260 EP=0
270 FOR I=1 TO N
280 EP=EP(I)+EP
290 NEXT I
300 Z=EP-Z2
310 REM *****
320 REM ***      DETERMINATION DU NUMERO DE LA COUCHE      ***
330 REM *****
340 DZ=0
350 I=1
360 DZ=EP(I)+DZ
370 IF Z>DZ THEN I=I+1:GOTO 360
380 IF Z=DZ GOTO 480
390 KEY OFF:CLS
400 PRINT "LE POINT CONSIDERE SE TROUVE DANS LA COUCHE";I;"EN COMPTANT DU BAS"
410 IF I=1 THEN GOTO 520
420 EPZ=0
430 FOR J=1 TO (I-1)
440 EPZ=EP(J)+EPZ
450 NEXT J
460 Z1=Z-EPZ
470 GOTO 580
480 PRINT "LE POINT CONSIDERE SE TROUVE A L'INTERFACE DES COUCHES";I;"ET";(I+1)
490 IF I=1 THEN GOTO 520
500 Z1=EP(I)
510 GOTO 580
520 Z1=0
530 GOTO 580
540 Z1=0
550 REM *****
560 REM ***      DETERMINATION DES ANGLES DE REFRACTIONS A L'INTERFACE      ***
570 REM *****
580 FOR K=1 TO N
590 S(K)=SIN(THETA(1))*SQR(G(K)*RHO(1)/(RHO(K)*G(1)))
600 PRINT "SIN(THETA("K"))=";S(K)
610 NEXT K
620 P(1)=1
630 FOR J=2 TO I
640 Q=.01
650 X=Q-((Q^3)/6)+((Q^5)/120)

```

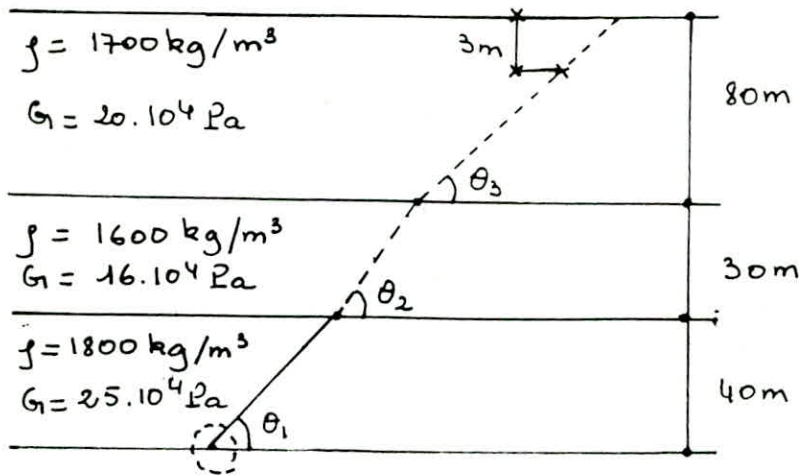
```

660 Y0=S(J)
670 IF Y0-X<.001 THEN GOTO 700
680 Q=Q+.01
690 GOTO 650
700 THETA(J)=Q
710 Y=THETA(J)*180/3.14
720 PRINT"L'ANGLE DE REFRACTION EN DEGRES A L'ARRIVEE DE L'ONDE A LA COUCHE";J;"
EST EGALE A";Y;"DEGRES"
730 X5=THETA(J)-THETA(J-1)
740 P(J)=COS(X5)*P(J-1)
750 NEXT J
760 E=0
770 IF I>1 THEN GOTO 800
780 E=SQR(RHO(I)/G(I))*Z/SIN(THETA(I))
790 GOTO 830
800 FOR K=1 TO (I-1)
810 E=(SQR(RHO(K)/G(K))*EP(K)/SIN(THETA(K)))+E
820 NEXT K
830 T1=E+(SQR(RHO(I)/G(I))*Z1/SIN(THETA(I)))
840 PRINT"L'ONDE ARRIVERA AU POINT CONSIDERE DANS UN TEMPS ";T1
850 D1=OM*T1
860 PRINT"LE DEPHASAGE SERA";D1
870 REM *****
880 REM ***          TRACE DE LA COURBE          ***
890 REM *****
900 INPUT"POUR AVOIR LA COURBE REPRESENTATIVE TAPEZ N'IMPORTE QUELLE TOUCHE";C$
910 CLS :SCREEN 3
920 VIEW(0,200)-(639,399)
930 WINDOW SCREEN (0,0)-(639,399)
940 LINE(0,0)-(639,399),1,B
950 LINE (30,200)-(640,200):DRAW"H5F5G5"
960 LINE(30,0)-(30,400):DRAW"H5F5G5"
970 FOR H=30 TO 590 STEP 50:PSET(H,205):DRAW"U10":NEXT
980 FOR H=20 TO 400 STEP 50:PSET(25,H):DRAW"R10":NEXT
990 FOR J=0 TO T STEP .05
1000 V=A*SIN(OM*(J+T1))/P(I)
1010 A1=J/T*600+30
1020 B1=V/(4*A)*400+205
1030 IF J=0 THEN 1050
1040 LINE(C1,D1)-(A1,B1)
1050 C1=A1
1060 D1=B1
1070 NEXT J
1080 SCREEN 3
1090 VIEW(0,0)-(639,399)
1100 WINDOW(0,0)-(639,399)
1110 LOCATE 24,20:PRINT"COURBE REPRESENTATIVE EN FONCTION DU TEMPS"
1120 LOCATE 12,25:PRINT "V="A/P(I)"SIN("OM"*T+"T1")"
1130 LOCATE 1,1:PRINT"SI VOUS VOULEZ ARRETER LES CALCULS TAPER SUR N"
1140 LOCATE 2,1:INPUT"SI VOUS VOULEZ CONTINUER LE CALCUL D'UN AUTRE POINT,TAPEZ
SUR N'IMPORTE QUELLE AUTRE TOUCHE";B$
1150 IF B$="N" THEN GOTO 1180
1160 INPUT"DONNER LA PROFONDEUR DU NOUVEAU POINT";Z2
1170 GOTO 300
1180 PRINT"LES CALCULS SONT TERMINEES"
1190 END

```


DEROULEMENT DU PROGRAMME PAR UN EXEMPLE:

Soit un sol constitué de trois couches de propriétés différentes.



Source : $\theta_1 = 0,9 \text{ rd}$

$$A = 2 \text{ m}$$

$$v = A \sin \omega t = 2 \sin 6,28t.$$

$$\omega = 6,28 \text{ rd/s}$$

$$T = 5 \text{ s (durée du séisme)}.$$

Soit un point situé à 3m de profondeur par rapport à la surface du sol.

Nous nous proposons le calcul des différents angles de réfractions à l'arrivée de l'onde aux interfaces, le temps d'arrivée de l'onde au point considéré ainsi que l'équation et la courbe représentative de la vitesse.

Après insertion des données, les résultats obtenus sont résumés dans la feuille suivante :

LE POINT CONSIDERE SE TROUVE DANS LA COUCHE 3 EN COMPTANT DU BAS

$$\text{SIN}(\text{THETA}(1)) = .7173561$$

$$\text{SIN}(\text{THETA}(2)) = .6886969$$

$$\text{SIN}(\text{THETA}(3)) = .6602245$$

L'ANGLE DE REFRACTION EN DEGRES A L'ARRIVEE DE L'ONDE
A LA COUCHE 2 EST EGAL A 37.83437 DEGRES

L'ANGLE DE REFRACTION EN DEGRES A L'ARRIVEE DE L'ONDE
A LA COUCHE 3 EST EGAL A 41.27386 DEGRES

L'ONDE ARRIVERA AU POINT CONSIDERE DANS UN TEMPS 20.39063

LE DEPHASAGE SERA 128.0532

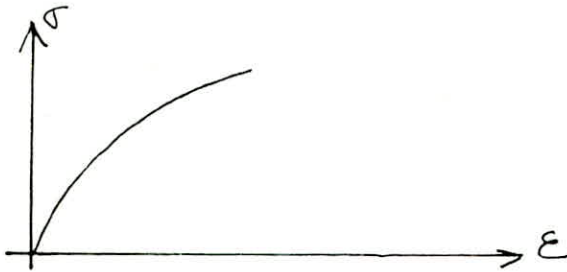
$$U = 2.023403 \text{ SIN}(6.28 * (T + 20.39063))$$

COURBE REPRESENTATIVE EN FONCTION DU TEMPS

-52-

METHODE DES CARACTERISTIQUES POUR UN MILIEU ELASTIQUE:

Soit la courbe effort - déformation suivante:



Si le milieu est non linéaire, on suppose que $\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \epsilon^2} \leq 0$

L'équation d'onde s'écrit:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2(\epsilon) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\text{ou } c^2 = \frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\epsilon}$$

Remarque: En élasticité linéaire: $c^2 = \frac{E}{\rho}$

L'équation (1) est équivalente à un système d'équation du 1^{er} ordre à une dimension:

$$\left| \begin{array}{l} \rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial \sigma}{\partial t} \end{array} \right.$$

avec $v = \frac{\partial u}{\partial t}$

: ce système est équivalent à:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{1}{f} \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{f c^2} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \end{array} \right.$$

où les inconnues sont $v(x, t)$ et $\sigma(x, t)$.

Ce dernier système peut s'écrire :

$$\underline{A} \vec{w}, x + \underline{B} \vec{w}, t - \underline{f} = 0 \quad (2).$$

avec :

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{f} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{f c^2} \end{bmatrix}$$

$$\vec{w} = \begin{Bmatrix} v \\ \sigma \end{Bmatrix}$$

Supposons que le système admette une solution dans $\Omega(t \times x)$.

Preons un point (t, x) et menons une courbe Γ . Le vecteur déplacement infinitesimal décrivant cette courbe à partir de (x, t) est $d\vec{\Gamma} (dt, dx)$ connaissant les valeurs des fonctions $v(t, x)$ et $\sigma(t, x)$ le long de Γ , nous nous proposons de déterminer grâce au système (2)

les valeurs de v et σ au voisinage de Γ .

Ce problème est un "problème de Cauchy" (ou "problème aux valeurs initiales").

Connaissant \vec{w} le long de (Γ) on peut calculer les dérivées :

$$\frac{\partial v}{\partial t}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial \sigma}{\partial t} \text{ et } \frac{\partial \sigma}{\partial x}$$

Par ailleurs, on peut écrire :

$$\begin{cases} dv = \frac{\partial v}{\partial t} dt + \frac{\partial v}{\partial x} dx \\ d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial t} dt + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx \end{cases} \quad (3)$$

En réunissant (2) et (3) nous aurons :

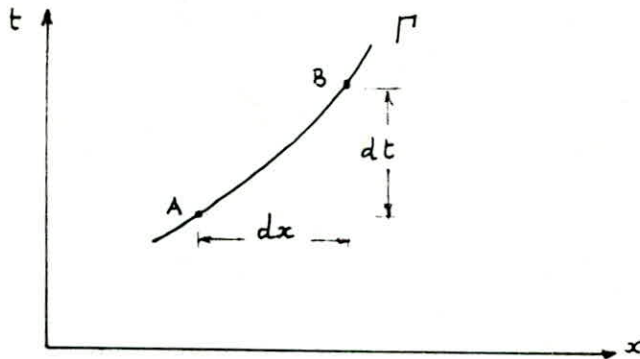
$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} + \dots - \frac{1}{f} \frac{\partial \sigma}{\partial x} = f_1 \\ \dots - \frac{1}{f c^2} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + \dots = f_2 \\ dt \frac{\partial v}{\partial t} + \dots + dx \frac{\partial v}{\partial x} + \dots = dv \\ \dots + dt \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \dots + dx \frac{\partial \sigma}{\partial x} = d\sigma \end{cases}$$

des dérivées en question peuvent être calculées si :

$$\det | \text{ système } | \neq 0$$

des lignes données par le vecteur déplacement (dt, dx) le long desquelles où $det \begin{vmatrix} & \\ & \end{vmatrix} = 0$ sont les lignes caractéristiques du système.

Le problème de Cauchy se pose de la manière suivante:



"Connaissant u, σ le long d'un arc Γ , déterminer u_M et σ_M en un point quelconque M au voisinage de Γ ".

des lignes caractéristiques α et β sont les lignes telles que si Γ est confondu avec α ou β on ne puisse résoudre le problème.

Par ailleurs, les relations permettant de calculer u_M et σ_M à partir des valeurs connues $u_A, \sigma_A, u_B, \sigma_B$ sur Γ sont appelées "Relation le long des caractéristiques".

Ces relations sont déduites en écrivant l'égalité de rang de matrices suivantes :

$$\text{rang} \begin{pmatrix} \underline{A} & \underline{B} & \underline{f} \\ dx \underline{I} & dy \underline{I} & d\underline{w} \end{pmatrix} = \text{rang} \begin{pmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ dx \underline{I} & dy \underline{I} \end{pmatrix}$$

d'application à notre cas de propagation donne :

* Les directions caractéristiques données par :

$$c = c(\sigma) \quad \text{ou} \quad dx = \mp c(\sigma) dt \quad (4).$$

* Les relations le long des caractéristiques

$$d\sigma \pm \frac{1}{f c} d\sigma = 0 \quad (5).$$

qui peut s'écrire sous la forme :

$$d \frac{\partial u}{\partial t} = \pm \frac{1}{f c} d \left(f c \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (5)'$$

La solution du problème s'obtient en construisant les deux familles de caractéristiques par (4) et après déterminer $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial t}$ par (5)' sur ces familles de courbes.

Puisque c est une fonction de x seulement, l'expression (4) peut s'exprimer par :

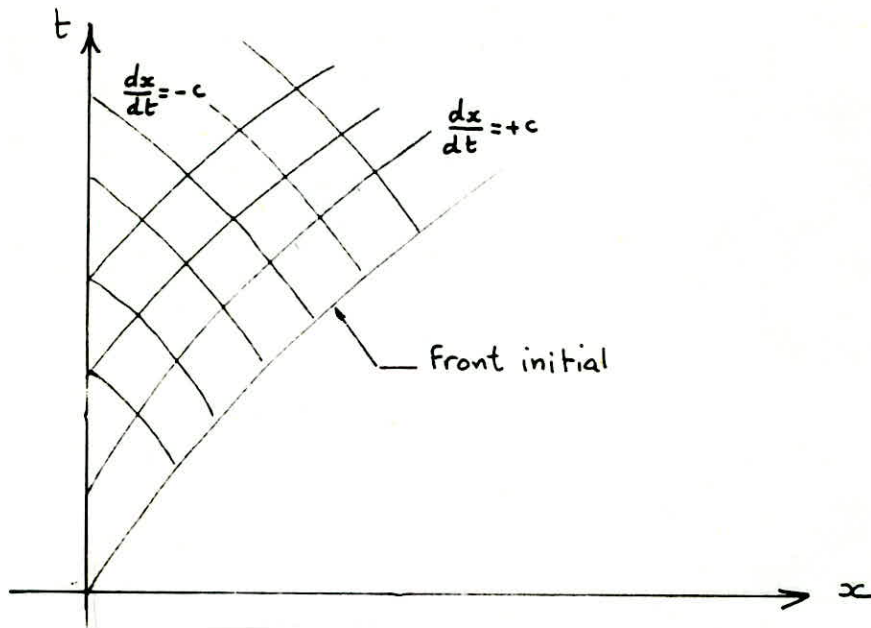
$$t - t_0 = \pm \int_0^x \frac{dx}{c(x)} \quad (6).$$

ou t_0 : valeur de t pour lesquelles $x=0$.

t , variant, l'expression (6) définit deux familles de courbes planes appelées positive ou négative suivant le signe plus (+) ou moins (-).

Si l'intégrale est évaluée soit analytiquement, soit numériquement (milieu non linéaire ou à discontinuités), les caractéristiques peuvent être construites.

Cela donne l'allure suivante :



(5)' est évaluée dans le cas de discontinuités de la manière suivante (différences finies).

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_1 - \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_2 = \pm c \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_1 - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_2 \right]$$

Les indices 1 et 2 représentent les deux côtés de la discontinuité.

Nous avons voulu terminer l'étude théorique par une application d'un cas réel.

Pour cela nous avons utilisé le programme CHARSOIL dont les références sont données dans la bibliographie, l'exploitation de ce programme a été faite que pour deux cas de milieux : Elastique et viscoélastique.

Cependant nous n'avons pas pu nous procurer des valeurs réelles des caractéristiques du sol, nous avons donc pris des valeurs personnelles pour dérouler le programme.

Nous donnerons donc en premier temps les définitions des paramètres utilisés dans le programme ainsi que le listing de celui-ci. En seconde étape, nous résumerons les données et les résultats obtenus.

METHODE DES CARACTERISTIQUES APPLIQUEE AUX SOLS - CHARSOIL -

SOMMAIRE:

CHARSOIL est une application de la méthode des caractéristiques pour calculer le comportement dynamique unidimensionnel des sols.

Un sol délimité d'épaisseur constante peut être constitué de plusieurs couches, chacune ayant des propriétés spécifiques données: le module de cisaillement, la masse volumique, la force de cisaillement maximale ainsi que le coefficient de viscoélasticité.

Le sous-bassement du sol est constitué d'une base qui peut être horizontale ou inclinée.

L'excitation dynamique du sol est produite à l'interface sol-roche par les contraintes de cisaillement produites par le mouvement des roches.

À la surface du sol, une fondation peut être incluse pour simuler l'influence dynamique du poids d'un bâtiment. La réponse du sol peut être évaluée sur la base du comportement élastique ou viscoélastique du sol ainsi que le glissement plastique.

PREPARATION DES DONNEES:

des données nécessaires à l'entrée incluent:

- * Propriétés du sol pour chaque couche.
- * Un certain nombre de segments de profondeurs choisies pour lesquelles les calculs doivent être fait.
- * La sélection du modèle du type du sol doit être traité; inclinaison de la roche de base (et la surface du sol); les spécifications de la vitesse d'excitation à la base pour des intervalles de temps égaux.

RESULTATS A LA SORTIE:

des informations imprimées sont:

- de cisaillement (contraintes).
- de vitesse (de glissement).
- de déplacement (de glissement).
- d'accélération de la surface du sol.
- Des données pour tracer la courbe de cisaillement hysteresistique.

Ces informations sont données pour chaque couche et chaque section.

DESCRIPTION DU PROGRAMME:

Le programme CHARSOIL est développé à partir de

l'application de la méthode des caractéristiques pour analyser le mouvement des sols, c'est un modèle unidimensionnel tenant compte des contraintes de cisaillement, des vitesses et des déplacements à chaque section calculée. Pour les calculs, la profondeur totale du sol est divisée en N segments et les calculs de chaque section se produisent à la base et au fond de chaque segment, ainsi il y a $N + 1$ sections à calculer.

d'entrée du programme se fait au moyen d'une série d'informations READ, décrite en détail séparément.

Le sol peut être décrit comme étant une série de couches, chacune ayant une épaisseur donnée DY , un module de cisaillement de basse amplitude G_0 , une masse volumique RHO , un coefficient viscoélastique VIS , une contrainte de cisaillement maximale T_M (T_{MAX}).

des couches à l'entrée sont désignées par 1, 2, 3, etc... commençant par 1 à la surface supérieure. les instructions d'entrée spécifient le nombre de segments à calculer N à considérer. Alors le programme calcule l'épaisseur du segment pour se conformer avec l'hypothèse suivante :

a - Chaque épaisseur de segment doit être égale à la

vitesse moyenne d'onde de cisaillement dans chaque segment multiplié par un incrément de temps commun ΔT .

b. la somme des épaisseurs des segments doit être égale à la profondeur totale du sol. Par exemple, le sol peut être constitué de 18 couches distinctes, mais pour les calculs il peut être convenable de spécifier seulement 10 segments. Une épaisseur de moitié d'un segment au dessus et au dessous de la section désignée est examinée par l'ordinateur établissant les forces de cisaillement minimum si le glissement est permis.

Partant de l'instruction N°5, les valeurs du régime permanent des variables sont déterminées et imprimées, et l'état permanent est établi. Si IST est égal à 1 dans les données, le programme stoppera à ce point (ligne 217). Il est recommandé que le contrôle préliminaire doit être fait pour voir si le problème désiré a bien été introduit directement. la donnée est alors changée en $IST=0$ et la portion transitoire est exécutée.

En introduisant la valeur zéro pour la viscosité le programme tournera en élastique. Les lignes 218 à 228 incrémentent le temps, et un compteur. la vitesse de phase (VPH) et la viscosité constante (CON) sont calculés dans les lignes 227 et 228.

CONDITIONS AUX LIMITES A LA SURFACE:

des lignes 229 à 254 calculent les conditions de la section 1 à la surface du sol. $ISS = 0$ est un cas de non glissement, $ISS = 1$ est le cas où le glissement se produit. $IF = 1$ pour une fondation dans le sol, $IF = 0$ pour aucune fondation. $VP(1)$, $U(1)$ et $TAUP(1)$ sont la vitesse, le déplacement et le cisaillement à la surface du sol ($TAUP(1) = 0$ lorsque $IF = 0$). Lorsqu'un glissement se produit, la fondation a une vitesse et un déplacement (absolu) donné par $VPS(1)$ et $USL(1)$. L'accélération à la surface du sol est calculée dans la ligne 253.

SECTIONS INTERNES:

des sections internes sont calculées entre les lignes 255 et 277. des interpolations sont nécessaires. (VR , TAR , VS , TAS) et $VP(I)$, $TAUP(I)$, $U(I)$ sont calculés. Si le glissement se produit $VPS(I)$ et $USL(I)$ sont calculés.

Dans une section, quand le glissement se produit $VP(I)$ est la vitesse du sol juste au dessous de la section, et $VPS(I)$ la vitesse juste au dessus de la section et ainsi pour $U(I)$ et $USL(I)$

CONDITION AUX LIMITES DE LA BASE:

Les valeurs de la base sont calculées entre les lignes 278 et 297. Quand $ISIM = 1$, les données de tremblement de terre dans la forme de vitesse des roches parallèles à la base sont prises des données pour des intervalles de temps $DTEX$, et interpolés à l'incrément DT du transitoire. La vitesse de la roche provenant des données peut être modifiée par FAC , comme cela est montré dans la ligne 284. Si la vitesse du sinus de l'onde de l'excitation est nécessaire, $ISIM = 0$, A et OM spécifient l'amplitude et la fréquence. VR et TAR sont les valeurs interpolées de V_R et T_R . Quand le glissement se produit, $VPS(N1)$ produit la vitesse du sol et $VP(N1)$, la vitesse de la roche. U est le déplacement de la roche et USL le déplacement du sol. Les lignes 298 - 299 produisant des données adimensionnelles ζ et δ pour la courbe d'hysteresis de la section III.

Les lignes 300 - 303 aident dans le calcul du pas pour un nouveau temps. La ligne 310 décide s'il faut imprimer les résultats transitoires ou non.

Le maximum et minimum des valeurs de cisaillement, vitesse, vitesse de glissement, déplacement et déplacement de glissement sont imprimés à la fin de chaque section.

Définitions des variables utilisées dans le programme:

Acc: Accélération à la surface du sol.

C_1 : Constante utilisée dans le cas de fondation.

$C_2(I)$: "constante" pour la section I.

C_7 : Constante de calcul.

DT: Incrément de temps pour le calcul transitoire.

DY(I): Longueur du segment I.

EN: Float N (N en décimal).

F_1, F_2 : Valeurs dans la solution de Newton pour
DT.

$G(I)$: Module de cisaillement à la section I.

$G_U(I)$: Basse Amplitude du module de
cisaillement à la section I.

$G_{GO}(I)$: minimum du module de cisaillement
à la section I.

I: Compteur.

ISS(1): Entier de condition de glissement.

J: Compteur.

N1: nombre de sections à calculer.

NL1: nombre de couches plus (+) 1.

N7: nombre de couches intermédiaires.

OT(I): cisaillement moyen prévu à travers le
segment I.

$RGST(I)$: $f * g * \sin(\theta) * DT$ pour le segment I.

$RHO(I)$: Masse volumique pour le segment I.

SDY, SDT, SGO } Variables utilisées dans le calcul
 SRH, STM, SVI } des longueurs de segments et de
leurs propriétés.

s, ss : Variables stockées dans la solution de
Newton pour DT .

SPD : vitesse de phase de la I^{eme} couche.

ST : $\sin(\theta)$.

T : Temps de la transition.

TAR, TAS : Cisaillement interpolé.

$TAU(I)$: Cisaillement au calcul de la section I.

$TAUP(I)$: Contrainte de cisaillement à la section I.

$TH(I)$: Constante d'Interpolation pour la section I.

$TM(I)$: Maximum de la contrainte de cisaillement
à la section I.

$TYS(I)$: Plus petite contrainte de cisaillement se
produisant à la section I.

$u(I)$: Déplacement du sol à la section I.

$USL(I)$: Déplacement de glissement du sol à la
section I.

$V(I)$: Vitesse du sol à la section I.

$VIS(I)$: Viscosité du segment I.

$V_{PH}(I)$: vitesse de phase à la section I.

$V_{PS}(I)$: vitesse de glissement à la section I.

V_R, V_S : vitesses interpolées.

$V_{SL}(I)$: vitesse de glissement antérieur à la section I.

V_{SS} : vitesse de phase du segment.

V_{VV} : vitesse.

W_{ASU}, w_{ISU} : Maximum et Minimum du déplacement de glissement dans une section.

W_{ASV}, w_{ISV} : Maximum et minimum de la vitesse de glissement dans une section.

W_{AV}, w_{IV} : Maximum et minimum du déplacement dans une section.

$ww = 2w \sin(\theta)$.

X : variable utilisée dans le cas d'une interpolation des données de séisme.

X_{PL} : Déformation adimensionnelle $\gamma \cdot G_0 / \tau_m$

$Y(I)$: Profondeur vers le haut au sommet de chaque index I calculé atteint.

Y_{PL} : Contrainte de cisaillement adimensionnelle τ / τ_m .

$YY(I)$: Points définis entre les sections.

$Z(I)$: Profondeur vers le haut de la couche I.

ZZ, Z2: Profondeur d'une partie de la couche utilisée pour trouver l'épaisseur du segment.

Définitions des données des variables:

NL: Nombre de couches.

N: Nombre de segments désirés pour la sortie des résultats (dimensionné de 1 à 20).

IR0 = 0 *

ISIM = 1: Pour l'entrée des données des vitesses du seïsme.

0: Pour une excitation sinusoïdale.

ISLP = 1: En présence d'un glissement.

0: Pas de glissement.

IF = 1: En présence d'une fondation.

0: Pas de fondation (champs libre).

N3 = 1: Imprime des résultats à chaque section.

2: Imprime des résultats à chaque 2 sections.

⋮
etc

JPR: Imprime les résultats chaque JPR^{eme} de temps.

III: Numéro de la couche en commençant du haut.

N4: Nombre de valeurs de vitesses lues.

IST = 0

TMAX: Durée de la transition en secondes.

PCT: Multiplicateur de "TM" pour atteindre la contrainte

d'écoulement.

GR: Gravité (m/s^2).

THETA: Angle entre la surface rocheuse et l'horizontale
(Radians).

R = 0 *

AL = 0 *

w: Poids de la structure à la surface de la terre
(N/m^2).

FAC: Multiplicateur de l'échelle du seisme.

A: Amplitude de la vitesse de l'onde sinusoïdale (m/s).

OM: Fréquence de la vitesse de l'onde sinusoïdale (rad/s).

DTEX: Intervalle de temps dans le cas de données
de vitesses du seisme.

DZ: Epaisseur de la couche (m).

RHOL: masse volumique de la couche (kg/m^3).

VISL: Coefficient viscoElastique ($kg/m.s$).

TML: Contrainte maximale de cisaillement (Pa).

GOL: Module de cisaillement statique (Pa).

Remarque:

*: Ce sont les variables utilisées dans la subroutine
du cas plastique que nous n'avons pas exploité.

 * METHODE DES CARACTERISTIQUES *

```

1      DIMENSION TAU(21),V(21),UP(21),TAUP(21),U(21),XPL(999),YPL(999),
2      6 UPH(21),CV(2500),DY(20),USS(20),TH(20),C2(20),VIS(20),RHO(20),
3      6 RGST(20),TYS(21),UPS(21),USL(21),ISS(21),USL(21),TM(20),
4      6 VISL(20),RHOL(20),TML(20),SPD(20),Z(21),Y(21),YY(21),WAT(21),
5      6 WIU(21),WAU(21),WIU(21),WAU(21),WASU(21),WISU(21),WASU(21),
6      6 OT(20),GGO(20),GOL(20),WIT(21),WISU(21),CON(2)
7      COMMON R,TY(20),GO(20),IVC(20),G(20),I
8

```

```

*****
***                               ENTREE DES DONNEES                               ***
*****

```

```

9 10      WRITE(*,350)
0 350      FORMAT(5X,'FAITES ENTRER LES VALEURS DE NL,N,IRO,ISIM,ISLP,IF,N3,
1      6 JPR,III,N4,IST')
2      READ(*,*)NL,N,IRO,ISIM,ISLP,IF,N3,JPR,III,N4,IST
3      IF(III.GT.N) III=N
4      WRITE(*,351)
5 351      FORMAT(5X,'ENTRER MAINTENANT LES VALEURS DE TMAX,PCT,GR,THETA,R,
6      6 AL,W,FAC,A,OM,DTEX')
7      READ(*,*)TMAX,PCT,GR,THETA,R,AL,W,FAC,A,OM,DTEX
8      Z(1)=.0
9      DO 71 I=1,NL
0      WRITE(*,352)I
1 352      FORMAT(5X,'DONNER LES VALEURS DE DZ,RHOL,VISL,TML,GOL POUR LA
2      6 COUCHE ',I1)
3      READ(*,*)DZ,RHOL(I),VISL(I),TML(I),GOL(I)
4 71      Z(I+1)=Z(I)+DZ
5      N1=N+1
6      EN=N
7      NL1=NL+1
8      WRITE(*,200)NL,N,IRO,ISIM,ISLP,IF,N3,JPR,III,N4,IST
9 200      FORMAT(3X,'NL=',I2,5X,'N=',I2,5X,'IRO=',I2,5X,'ISIM=',I2/
0      6 3X,'ISLP=',I2,5X,'IF=',I2,5X,'N3=',I2,5X,'JPR=',I2/
1      6 3X,'III=',I2,5X,'N4=',I2,5X,'IST=',I5)
2      WRITE(*,359)
3 359      FORMAT('*****')

```

:

```

*****
***          CALCUL DE L'INTERVALLE DE TEMPS DT          ***
*****

```

```

4      N7=NL1/2
5      C7=.5*VISL(N7)/GOL(N7)
6      DT=-C7+SQRT(C7*C7+RHOL(N7)*(Z(NL1)/EN)**2/GOL(N7))
7      DO 50 KI=1,5
8      S=EN
9      SS=.0
0      DO 49 I=1,NL
1      F1=SQRT(DT*(DT*GOL(I)+VISL(I))/RHOL(I))
2      S=S-(Z(I+1)-Z(I))/F1
3 49   SS=SS+(Z(I+1)-Z(I))*(2.*DT*GOL(I)+VISL(I))/(2.*RHOL(I)*F1**3)
4      F2=S/SS
5      DT=DT-F2
6      IF(ABS(F2).LT..005*DT) GO TO 51
7 50   CONTINUE

```

```

*****
***          CALCUL DES LONGUEURS          ***
*****

```

```

48 51   DO 52 I=1,NL
49 52   SPD(I)=SQRT((GOL(I)+VISL(I)/DT)/RHOL(I))
50     Y(1)=.0
51     I=1
52     J=1
53     ZZ=.0
54 53   ZZ=Z(J+1)-Z(J)-ZZ
55     SDT=.0
56     SDY=.0
57     SRH=.0
58     SUI=.0
59     SGO=.0
60     STM=.0
61 54   SDT=SDT+ZZ/SPD(J)
62     IF(SDT.GE.DT) GO TO 55
63     SDY=SDY+ZZ
64     SRH=SRH+RHOL(J)*ZZ
65     SUI=SUI+VISL(J)*ZZ
66     SGO=SGO+GOL(J)*ZZ
67     STM=STM+TML(J)*ZZ
68     IF(J.EQ.NL) GO TO 56
69     J=J+1
70     ZZ=.0
71     ZZ=Z(J+1)-Z(J)
72     GO TO 54
73 55   Z3=(DT-(SDT-ZZ/SPD(J)))*SPD(J)
74 57   DY(I)=SDY+Z3
75     USS(I)=DY(I)/DT
76     Y(I+1)=Y(I)+DY(I)
77     RHO(I)=(SRH+Z3*RHOL(J))/DY(I)
78     TM(I)=(STM+Z3*TML(J))/DY(I)

```

:

```

79      GO(I)=(SGO+Z3*GOL(J))/DY(I)
80      UIS(I)=(SUI+Z3*UISL(J))/DY(I)
81      IF(I.EQ.N) GO TO 59
82      ZZ=ZZ+Z3
83      I=I+1
84      GO TO 53
85 56    Z3=.0
86      GO TO 57

```

```

*****
***      DETERMINATION DES CONTRAINTES DE CISAILLEMENTS      ***
*****

```

```

87 59    YY(1)=.0
88      DO 158 I=1,N
89 158   YY(I+1)=.5*(Y(I)+Y(I+1))
90      TYS(1)=TML(1)
91      DO 160 J=2,NL1
92      IF(Z(J).GT.YY(2))GO TO 161
93      IF(TML(J).LT.TYS(1)) TYS(1)=TML(J)
94 160   CONTINUE
95 161   IF(N.EQ.1) GO TO 167
96      DO 165 I=2,N
97      TYS(I)=1E20
98      DO 163 J=2,NL1
99      IF(Z(J).LT.YY(I)) GO TO 163
00      IF(TML(J-1).LT.TYS(I)) TYS(I)=TML(J-1)
01      J1=J+1
02      IF(J1.GT.NL1) J1=NL1
03      DO 162 K1=J1,NL1
04      IF(Z(K1).GT.YY(I+1)) GO TO 164
05      IF(TML(J1-1).LT.TYS(I)) TYS(I)=TML(J1-1)
06 162   CONTINUE
07 163   CONTINUE
08 164   IF(TML(K1-1).LT.TYS(I)) TYS(I)=TML(K1-1)
09 165   CONTINUE
10 167   TYS(N1)=TML(NL)
11      DO 166 J=1,NL
12      IF(YY(N1).GT.Z(J)) GO TO 166
13      IF(TML(J-1).LT.TYS(N1)) TYS(N1)=TML(J-1)
14 166   CONTINUE

```

```

*****
***      PARTIE D'IMPRESSION      ***
*****

```

```

15      WRITE(*,201)TMAX,PCT,GR,THETA,R,AL,W,FAC,A,OM,Y(N1),DT,DTEX
16 201   FORMAT(3X,'TMAX=',F8.3,5X,'PCT=',F8.3,5X,'GR=',F7.3,5X,'THETA=',
17      6 F8.4/3X,'R=',F8.3,5X,'AL=',F8.3,5X,'W=',F10.3,5X,'FAC=',F8.3/3X,
18      6 'A=',F8.3,5X,'OM=',F7.3,5X,'Y(N1)=',F8.3,5X,'DT=',F8.5,5X,
19      6 'DTEX=',F8.4)
20      WRITE(*,360)
21 360   FORMAT('*****')
22      WRITE(*,62)(Z(I),I=1,NL1)

```

```

23 62   FORMAT(3X,'Z=',5F8.2/(5X,5F10.2))
24     WRITE(*,63)(GOL(I),I=1,NL)
25 63   FORMAT(3X,'GOL=',5F12.0/(7X,5F12.0))
26     WRITE(*,64)(VISL(I),I=1,NL)
27 64   FORMAT(3X,'VISL=',5F12.3/(8X,5F12.3))
28     WRITE(*,65)(RHOL(I),I=1,NL)
29 65   FORMAT(3X,'RHOL=',5F12.2/(8X,5F12.2))
30     WRITE(*,66)(TML(I),I=1,NL)
31 66   FORMAT(3X,'TML=',5F12.1/(7X,5F12.1))
32     WRITE(*,361)
33 361  FORMAT('*****')
34     C=AL**(-1./ (R-1.))
35     C1=2.*W/(GR*DT)
36     ST=SIN(THETA)
37     WW=2.*W*ST
38     T=.0
39     J=0
40     XPL(1)=.0
41     YPL(1)=.0
42     ACC=.0
43     DO 9 I=1,N1
44     TAU(I)=.0
45     USL(I)=.0
46     UPS(I)=.0
47     V(I)=.0
48     U(I)=.0
49     USL(I)=.0
50     WAT(I)=-1E20
51     WIT(I)=1E20
52     WAU(I)=-1E20
53     WIU(I)=1E20
54     WIU(I)=1E20
55     WAU(I)=-1E20
56     WASV(I)=-1E20
57     WISV(I)=1E20
58     WASU(I)=-1E20
59     WISU(I)=1E20
60 9     IVC(I)=1
61     IF(IF.EQ.1) TAU(1)=W*ST
62     CC=1./ (1.+R/PCT**(R-1.))
63     DO 8 I=1,N
64     RGST(I)=RHO(I)*GR*ST*DT
65     TH(I)=1./USS(I)
66     TAU(I+1)=RGST(I)*USS(I)*TAU(I)
67     GGO(I)=GO(I)*CC
68     TY(I)=TM(I)*PCT*C
69     C2(I)=VIS(I)/DY(I)
70     G(I)=GO(I)
71     UPH(I)=USS(I)
72 8     OT(I)=.5*(TAU(I)+TAU(I+1))
73     DO 21 I=1,N1
74 21    ISS(I)=0

```



```

75      TAUP(1)=.0
76      IF(ISIM.EQ.1)READ(*,6)(CV(I),I=1,N4)
77      6      FORMAT(8F10.0)
78      WRITE(*,40)(RHO(I),I=1,N)
79      40     FORMAT(/3X,'RHO=',5F12.2/(7X,5F12.2))
80      WRITE(*,41)(GO(I),I=1,N)
81      41     FORMAT(3X,'GO=',5F12.0/(6X,5F12.0))
82      WRITE(*,42)(VIS(I),I=1,N)
83      42     FORMAT(3X,'VIS=',5F12.2/(7X,5F12.2))
84      WRITE(*,43)(DY(I),I=1,N)
85      43     FORMAT(3X,'DY=',5F12.2/(6X,5F12.2))
86      WRITE(*,44)(TM(I),I=1,N)
87      44     FORMAT(3X,'TM=',5F12.2/(6X,5F12.2))
88      WRITE(*,45)(USS(I),I=1,N)
89      45     FORMAT(3X,'USS=',5F12.2/(7X,5F12.2))
90      WRITE(*,46)(TYS(I),I=1,N1)
91      46     FORMAT(/3X,'LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENTS DANS LES SECTIONS' /
92      6 35X,'CONSIDEREES SONT EGALES A :'/(6X,5F12.1))
93      WRITE(*,1)
94      1      FORMAT(/'1',2X,'CONTRAINTE (PA)',15X,'VITESSE (M/S)',
95      6 15X,'DEPLACEMENT (M)'/3X,'SURFACE DU SOL',49X,'BASE ROCHEUSE')
96      WRITE(*,48)(Y(I),I=1,N1,N3)
97      48     FORMAT(3X,'DZ=',5F7.2/(6X,5F7.2))
98      WRITE(*,354)
99      354    FORMAT('*****')
100     11     WRITE(*,47)T
101     47     FORMAT(3X,'TIME=',F7.3)
102     WRITE(*,2)(TAU(I),I=1,N1,N3)
103     2      FORMAT(/3X,'SHEAR=',5F15.2/(9X,5F15.2))
104     WRITE(*,5)(USL(I),I=1,N1,N3)
105     5      FORMAT(3X,'USL=',5F10.4/(7X,5F10.4))
106     WRITE(*,3)(V(I),I=1,N1,N3)
107     3      FORMAT(3X,'U=',5F10.4/(5X,5F10.4))
108     WRITE(*,20)(USL(I),I=1,N1,N3)
109     WRITE(*,4)(U(I),I=1,N1,N3)
110     20     FORMAT(3X,'USL=',5F10.4/(7X,5F10.4))
111     4      FORMAT(3X,'U=',5F10.4/(5X,5F10.4))
112     WRITE(*,7) XPL(J+1),YPL(J+1),ACC
113     7      FORMAT(/3X,'X=',F10.4,10X,'Y=',F10.4/3X,'ACC GR. SURFACE=',
114     6 F10.4)
115     WRITE(*,358)
116     358    FORMAT('*****')
117     IF(IST.EQ.1) STOP

```

```

*****
***                               BOUCLE TRANSITOIRE                               ***
*****

```

```

18     12     T=T+DT
19     J=J+1
20     IF(T.GT.TMAX) GO TO 35
21     DO 100 I=1,N
22     IF(IRO.EQ.0) GO TO 100

```

```

23      TT=.5*(TAU(I)+TAU(I+1))
24 C    CALL GG(TT,OT(I))
25      IF(G(I).LT.GG0(I)) G(I)=GG0(I)
26      OT(I)=TT
27      VPH(I)=SQRT((G(I)+VIS(I)/DT)/RHO(I))
28 100   CON(I)=C2(I)*(V(I+1)-V(I))

```

```

*****
***          CONDITION A LA SURFACE DU CONTOUR          ***
*****

```

```

29      ISS(1)=0
30      VVV=V(2)
31      IF(ISS(2).EQ.1) VVV=VSL(2)
32      VS=V(1)-TH(1)*VPH(1)*(V(1)-VVV)
33      TAS=TAU(1)-TH(1)*VPH(1)*(TAU(1)-TAU(2))
34      IF(IF.EQ.0) GO TO 13
35      VP(1)=(V(1)*(C1+C2(1))+TAU(1)+TAS+VS*RHO(1)*VPH(1)-C2(1)*VVV
36 - 6 -WW-VPH(1)*RGST(1))/(C1+RHO(1)*VPH(1))
37      TAUP(1)=TAS-RHO(1)*VPH(1)*(VP(1)-VS)-CON(1)-RGST(1)*VPH(1)
38      VPS(1)=VP(1)
39      IF(TAUP(1).LT.TYS(1).OR.ISLP.EQ.0) GO TO 14
40      TAUP(1)=TYS(1)
41      VP(1)=VS+(TAS-TYS(1)-CON(1)-RGST(1)*VPH(1))/(RHO(1)*VPH(1))
42      VPS(1)=VSL(1)+C1*(WW-TYS(1)-TAU(1))
43      ISS(1)=1
44      GO TO 14
45 13     VP(1)=VS+(TAS-CON(1))/(RHO(1)*VPH(1))-RGST(1)/RHO(1)
46      VPS(1)=VP(1)
47 14     U(1)=U(1)+.5*(VP(1)+U(1))*DT
48      USL(1)=USL(1)+.5*(VPS(1)+USL(1))*DT
49      IF(U(1).GT.WAU(1))WAU(1)=U(1)
50      IF(U(1).LT.WIU(1))WIU(1)=U(1)
51      IF(USL(1).GT.WASU(1))WASU(1)=USL(1)
52      IF(USL(1).LT.WISU(1))WISU(1)=USL(1)
53      ACC=(VP(1)-V(1))/DT
54      IF(N.EQ.1) GO TO 28

```

```

*****
***          SECTIONS INTERNES          ***
*****

```

```

55      DO 27 I=2,N
56      ISS(I)=0
57      UR=V(I)-TH(I-1)*VPH(I-1)*(V(I)-V(I-1))
58      TAR=TAU(I)-TH(I-1)*VPH(I-1)*(TAU(I)-TAU(I-1))
59      VVV=V(I+1)
60      IF(ISS(I+1).EQ.1)VVV=VSL(I+1)
61      VS=V(I)-TH(I)*VPH(I)*(V(I)-VVV)
62      TAS=TAU(I)-TH(I)*VPH(I)*(TAU(I)-TAU(I+1))
63      VP(I)=(TAS-TAR+VPH(I)*(VS*RHO(I)-RGST(I))+VPH(I-1)*(UR*RHO(I-1)
64 6 -RGST(I-1)))/(VPH(I-1)*RHO(I-1)+VPH(I)*RHO(I))
65      TAUP(I)=TAS-RHO(I)*VPH(I)*(VP(I)-VS)-RGST(I)*VPH(I)-(VIS(I)
66 6 +VIS(I-1))* .5*(VVV-V(I-1))/(DY(I-1)+DY(I))
:

```



```

02 35    CONTINUE
03      WRITE(*,355)
04 355   FORMAT(/'*****')
05      WRITE(*,101)
06 101   FORMAT(//' VALEURS EXTREMES DES VARIABLES'//' SECTION',8X,
07      6 'CONTRAINTES',4X,'VITESSES',2X,'VIT.DE GLIS.',2X,'DEPLAC.',
08      6 2X,'DEPLA.DE GLIS.')
```

```

09      WRITE(*,356)
10 356   FORMAT('-----',8X,'-----',4X,'-----',2X,
11      6 '-----',2X,'-----',2X,'-----')
```

```


12      DO 102 I=1,N1
13 102   WRITE(*,103)I,WAT(I),WAV(I),WASU(I),WAV(I),WASU(I),WIT(I),
14      6 WIU(I),WISU(I),WIU(I),WISU(I)
15 103   FORMAT(/'0',I4,4X,'MAX.',F14.2,F12.2,F14.2,F9.2,F16.2/10X,
16      6 'MIN.',F14.2,F12.2,F14.2,F9.2,F16.2)
17 99    STOP
18      END
```

DEROULEMENT DU PROGRAMME CHARSOIL PAR UN EXEMPLE

Soit un sol constitué de sept couches dont les caractéristiques sont résumés comme suit :

$\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ pour toutes les couches

30m	$G = 540,8 \text{ MPa}$	$TML = 37,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
130m	$G = 107,6 \text{ MPa}$	$TML = 119,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
120m	$G = 531,8 \text{ MPa}$	$TML = 185,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
110m	$G = 890,9 \text{ MPa}$	$TML = 239,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
160m	$G = 3301,4 \text{ MPa}$	$TML = 316,9 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
190m	$G = 873,3 \text{ MPa}$	$TML = 404,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
150m	$G = 1453,8 \text{ MPa}$	$TML = 469,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Base Rocheuse		

 Source

Nous avons pris des couches horizontales, donc l'angle $\theta = 0$.

En ce qui concerne la source, nous avons pris :

$A = 10 \text{ m}$ (amplitude de la vitesse).

$\omega = 6.28 \text{ rad/s}$ (pulsation)

Nous voulons connaître dans ce cas d'exemple l'effet de la fondation ainsi que

celui de la viscosité, pour cela nous avons deux cas à étudier :

1/ Le cas Elastique dont la viscosité $\eta = 0$ avec :

a- Sol en champ Libre : $IF = 0$ ET $W = 0$

b- Sol avec Fondation : $IF = 1$ ET $W = 5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

2/ Le cas ViscoElastique avec $\eta = 15 \cdot 10^6 \text{ kg/m.s}$ pour toutes les couches :

a- Sol en champ Libre : $IF = 0$ ET $W = 0$

b- Sol avec Fondation : $IF = 1$ ET $W = 5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

Entrée des données :

. $NL = 7$, $N = 14$, $IR0 = 0$, $ISIM = 0$, $ISLP = 0$

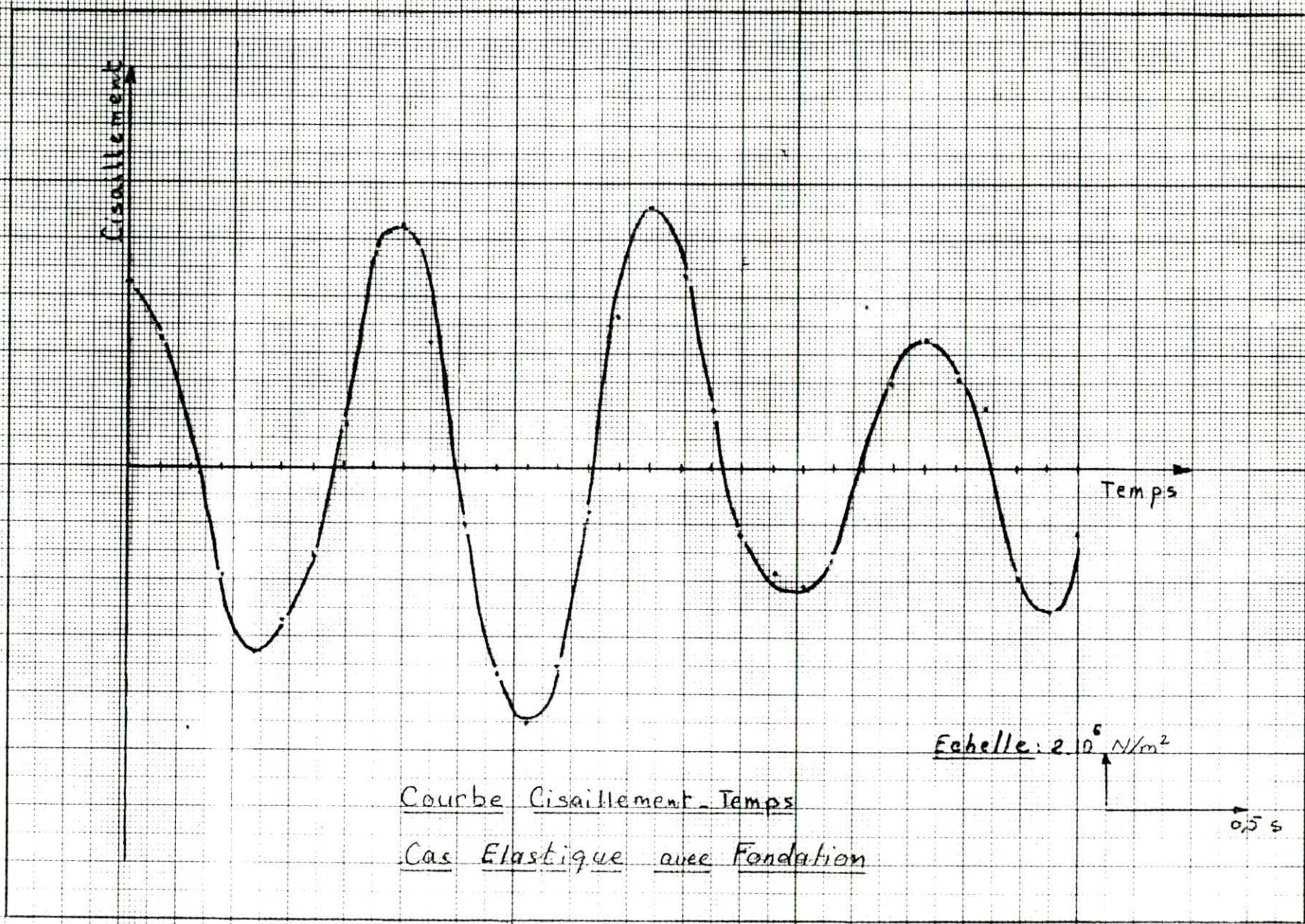
$IF = 0$ (=1 pour la fondation) , $N3 = 1$, $JPR = 1$, $III = 1$, $N4 = 0$, $IST = 0$

. $TMAX = 10 \text{ s}$, $PCT = 1$, $GR = 9,81$, $Theta = 0$, $R = 0$, $AL = 0$

$W = 0$ ($= 5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ pour la fondation) , $FAC = 1$, $A = 10$, $OM = 6.28$, $DTEX = 0$

Après insertion de toutes les données du problème, nous avons obtenus des résultats avec un pas de temps égal au $11/100$ de secondes.

Nous nous intéressons à la section de la surface du sol dont les résultats obtenus pour la contrainte de cisaillement, la vitesse, le déplacement et l'accélération sont résumés sur les graphes suivants :



Courbe Cisaillement - Temps
Cas Elastique avec Fondation

Echelle: 2 · 10⁶ N/m²
↑
0,5 s

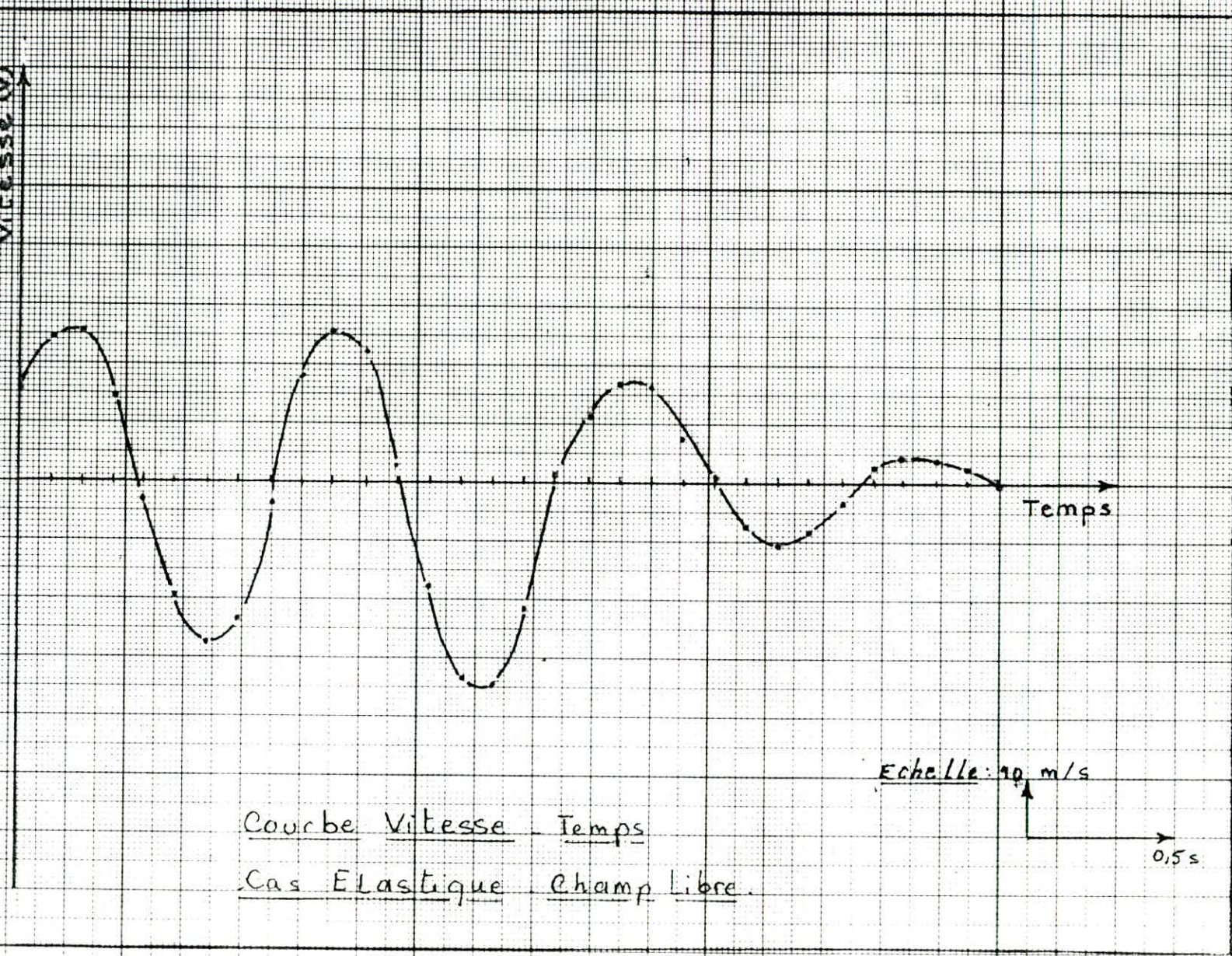
Vitesse (v)

Temps

Echelle: 90 m/s

0,5s

Courbe Vitesse - Temps
Cas ELastique Champ Libre.



Vitesse (y)

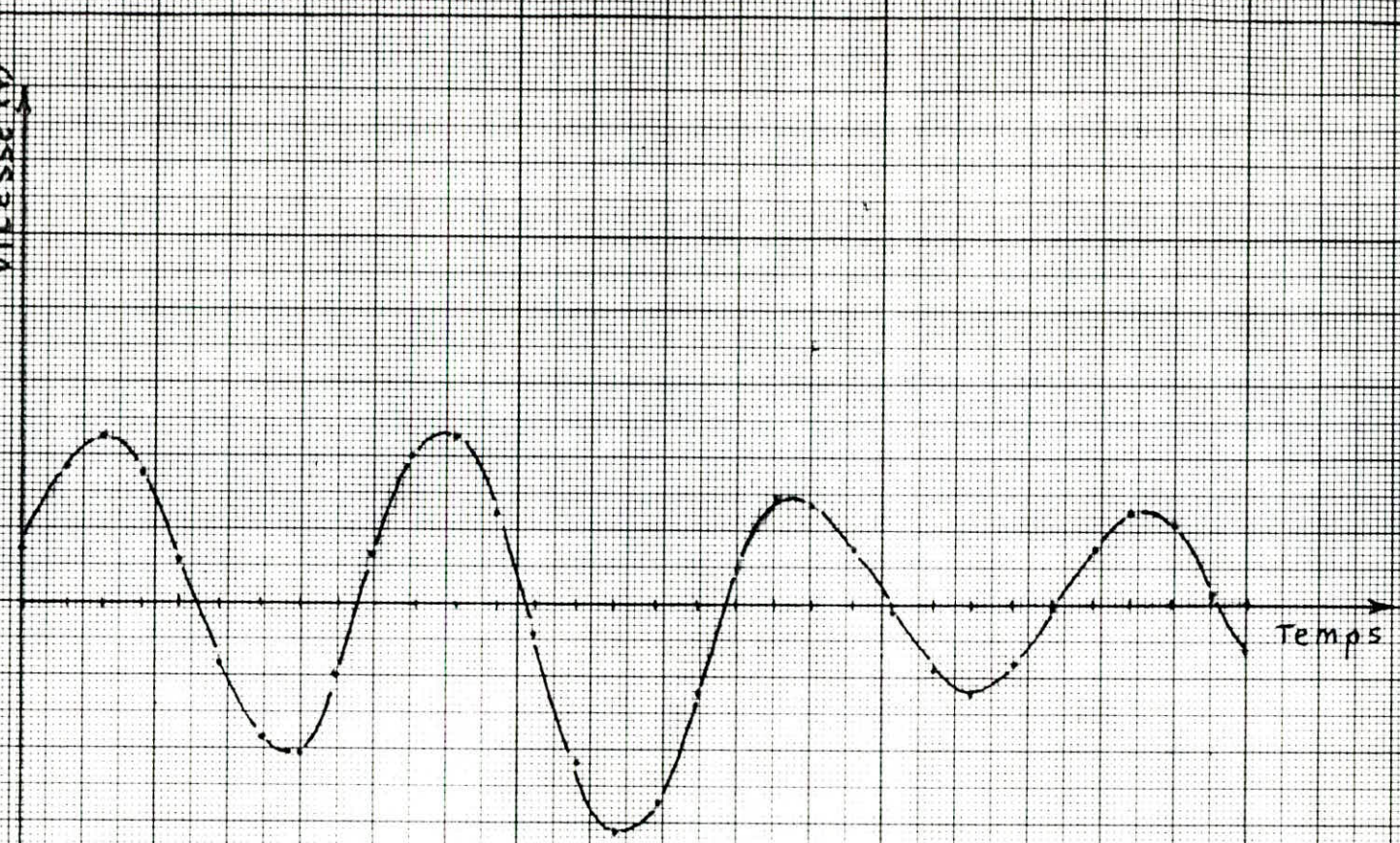
Temps

83

Echelle: 10 m/s

0,5 s

Courbe Vitesse Temps
Cas Elastique avec Fondation.



84

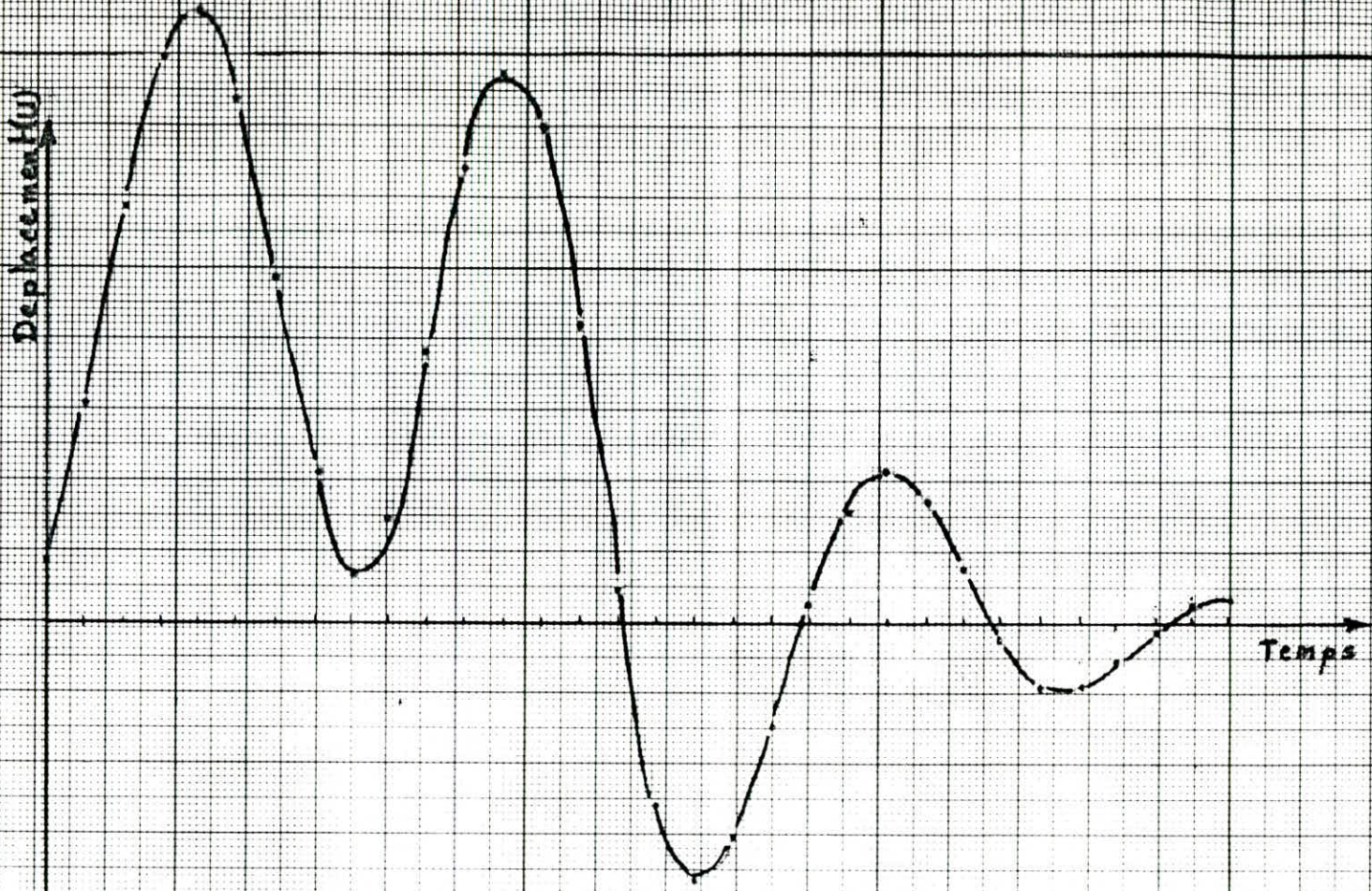
Déplacement (u)

Temps

Echelle: 1 m

0.5 s

Courbe Déplacement Temps
Cas ELastique - Champ Libre



Displacement (u)

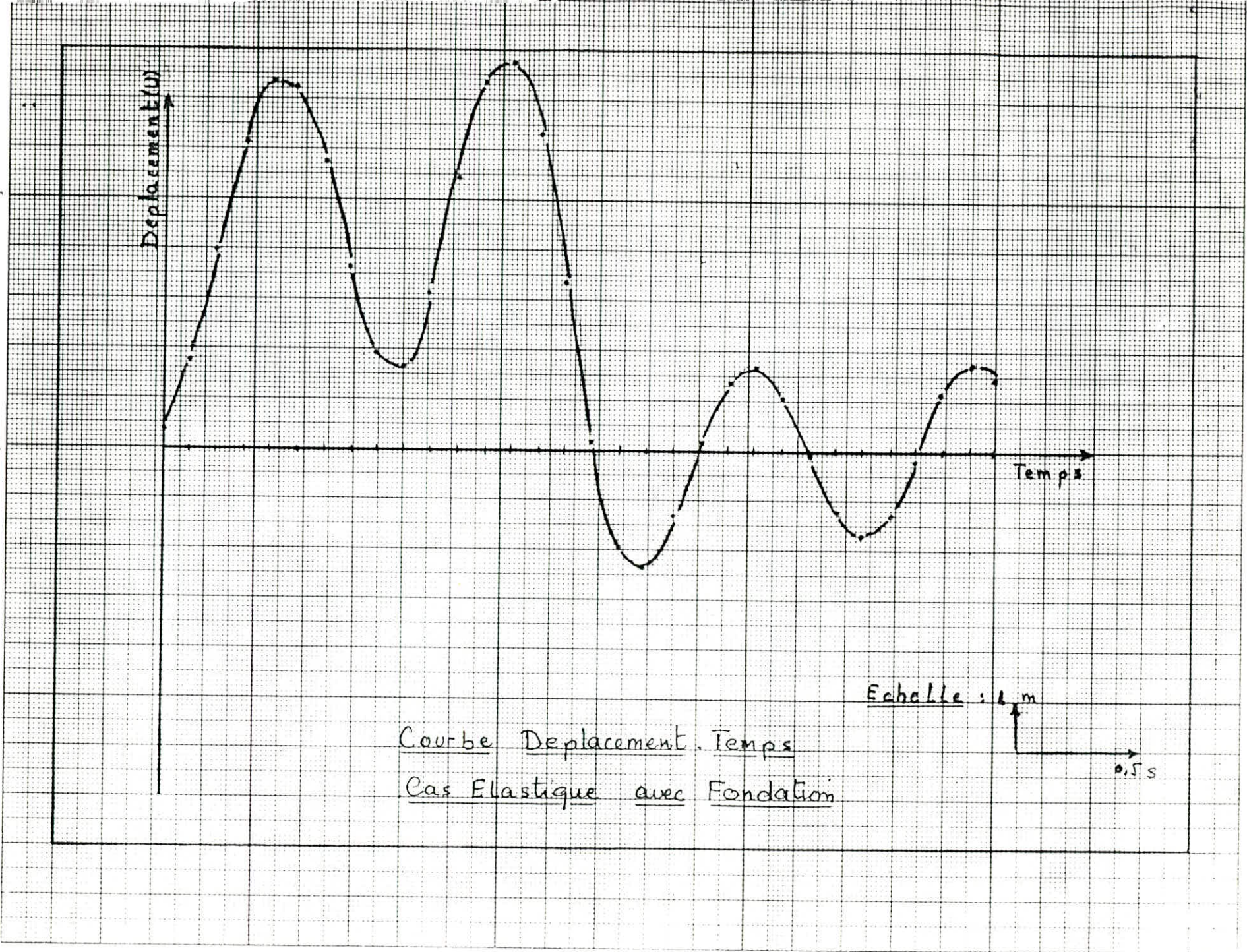
Temps

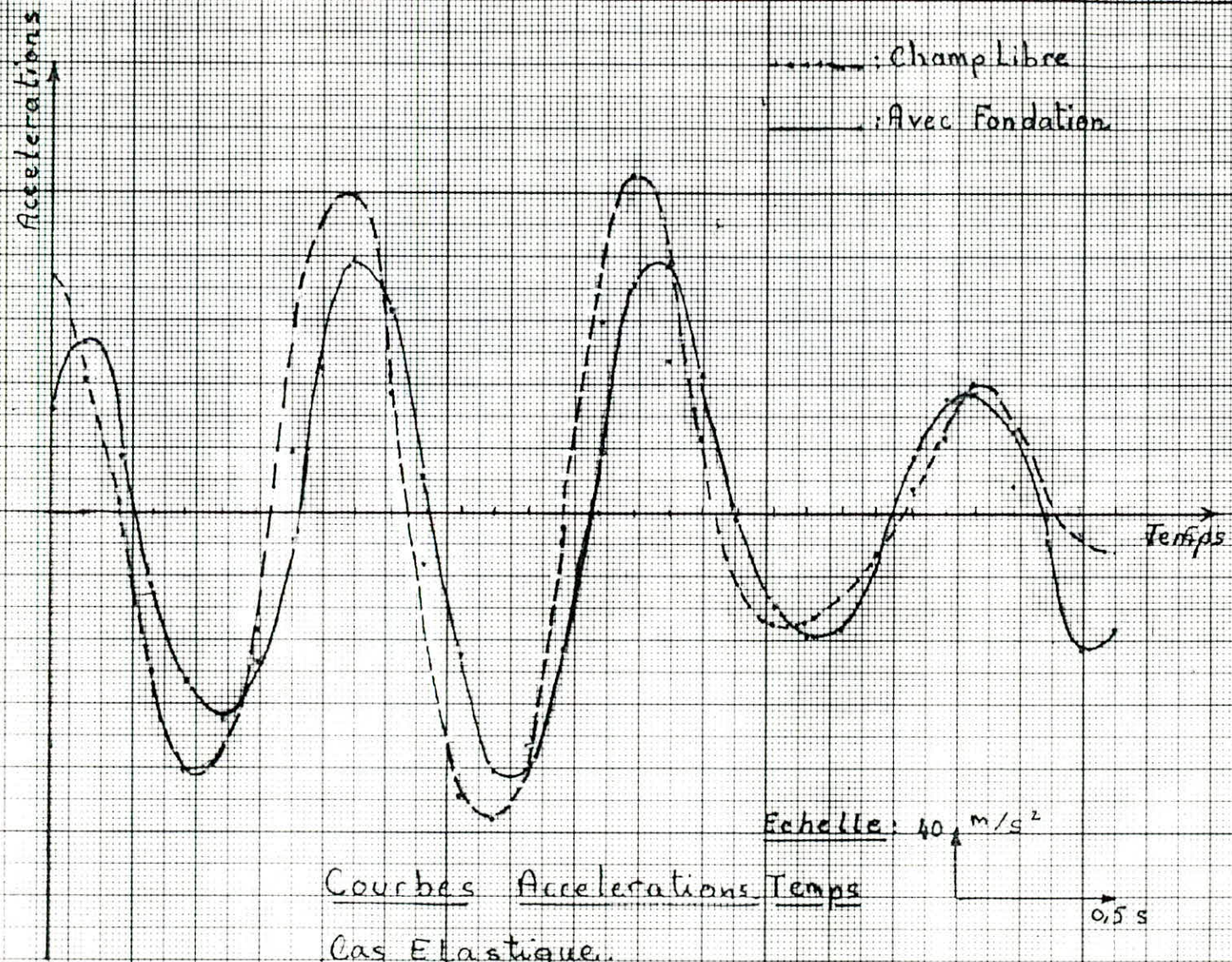
Echelle : 1 m

0,5 s

Courbe Displacement - Temps
Cas Elastique avec Fondation

85





Courbes Accelerations Temps
Cas Elastique.

Cisaillement

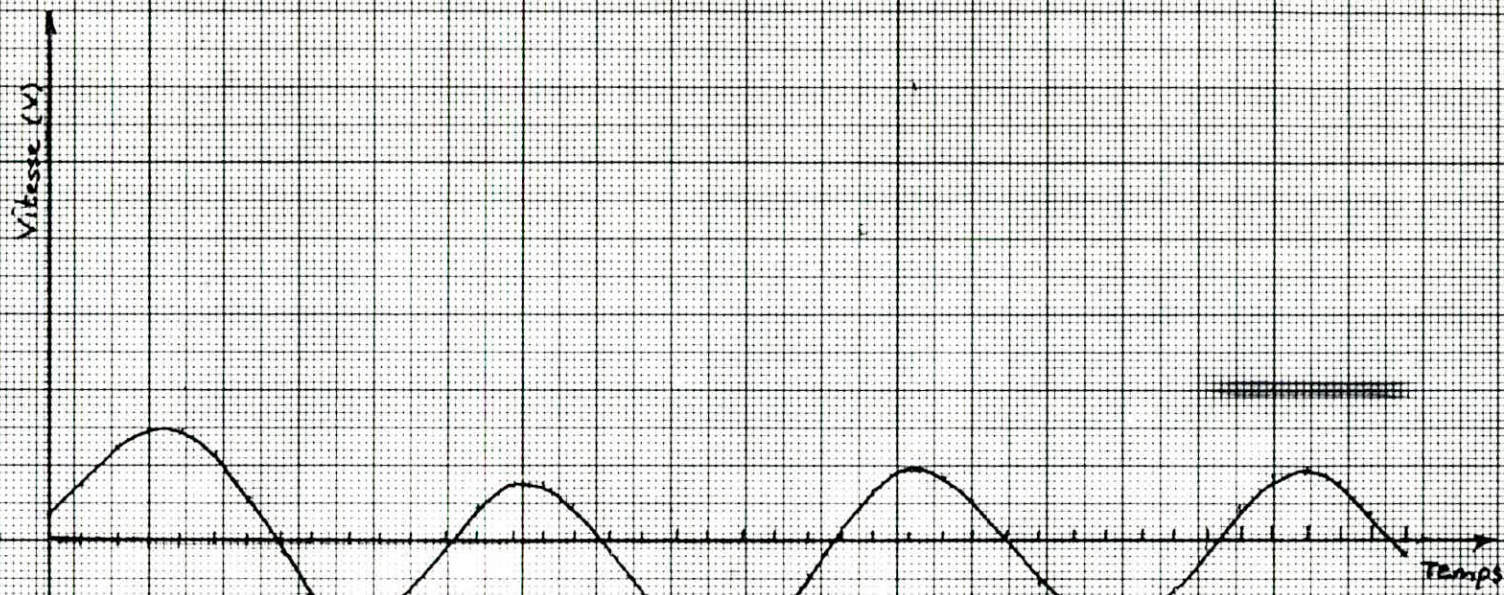
Temps

Echelle: $2 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$

0,5s

Courbe Cisaillement - Temps

Cas Viscoélastique avec Fondation



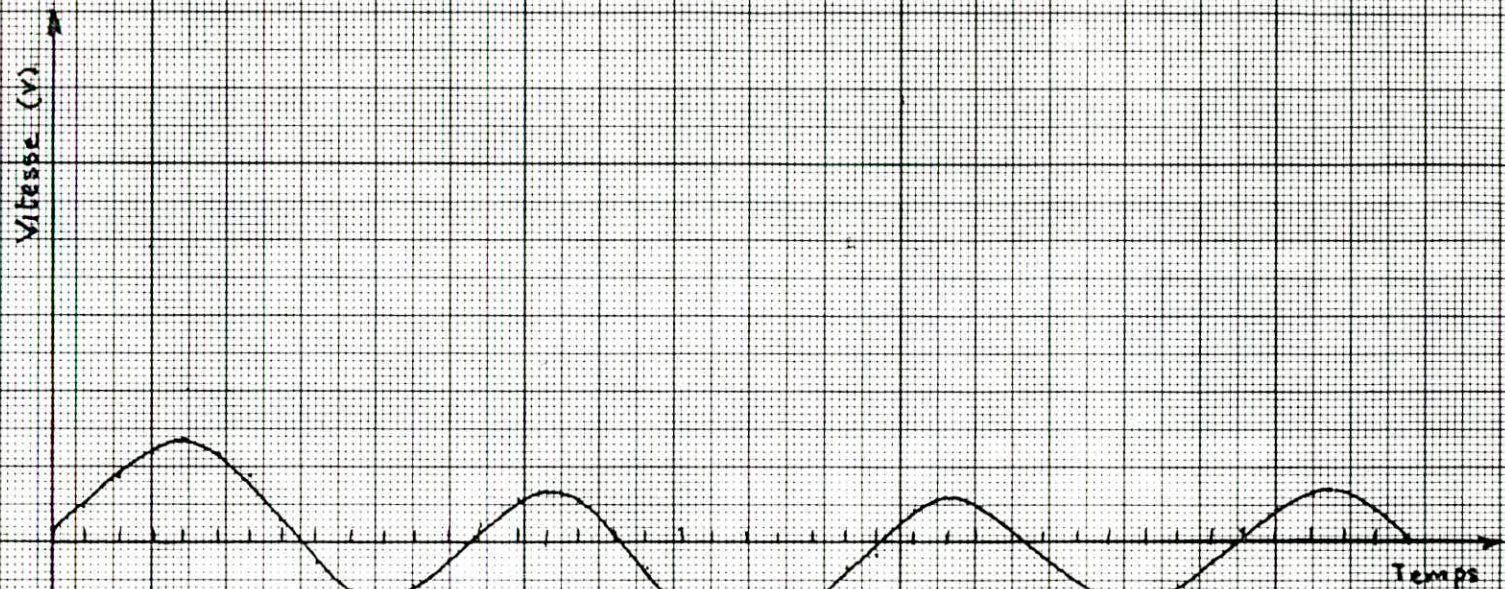
Courbe Vitesse - Temps
Cas Viscoélastique - champ libre.

Echelle :
 10 m/s
 0,53

88

1.5

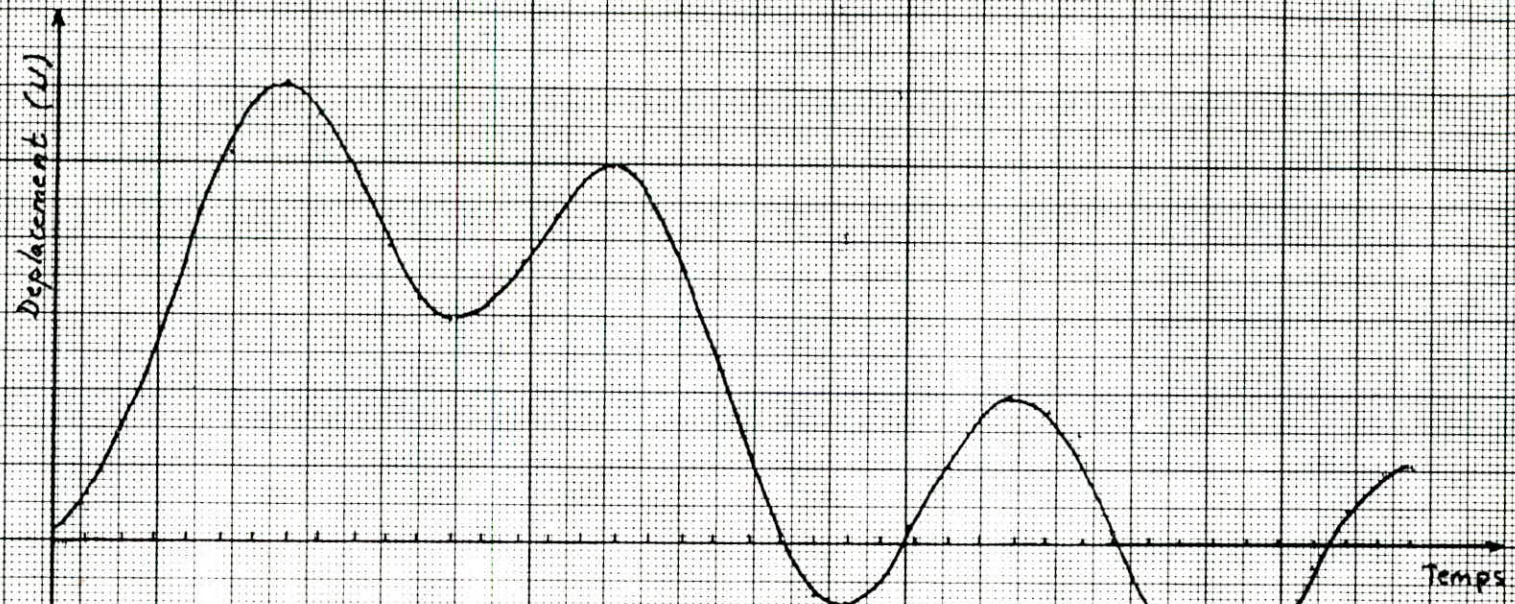
1.0



Courbe Vitesse - Temps
Cas Viscoélastique avec Fondation

Echelle :
10 m/s
0,55

- 06 -



Courbe Déplacement - Temps

Cas Viscoélastique - Champ Libre

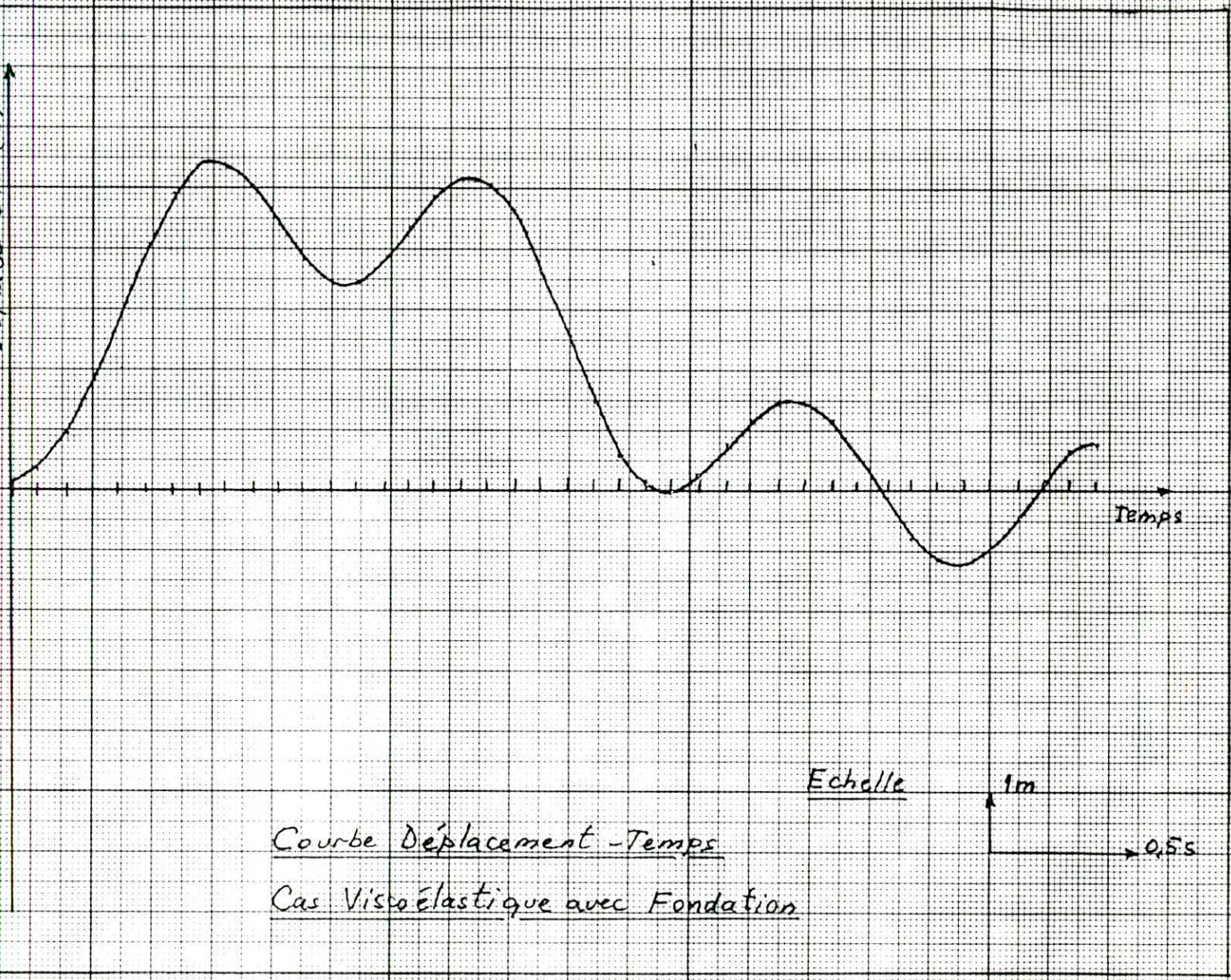
Echelle

1mm

0,5s

Déplacement (u)

Temps



Echelle

1m

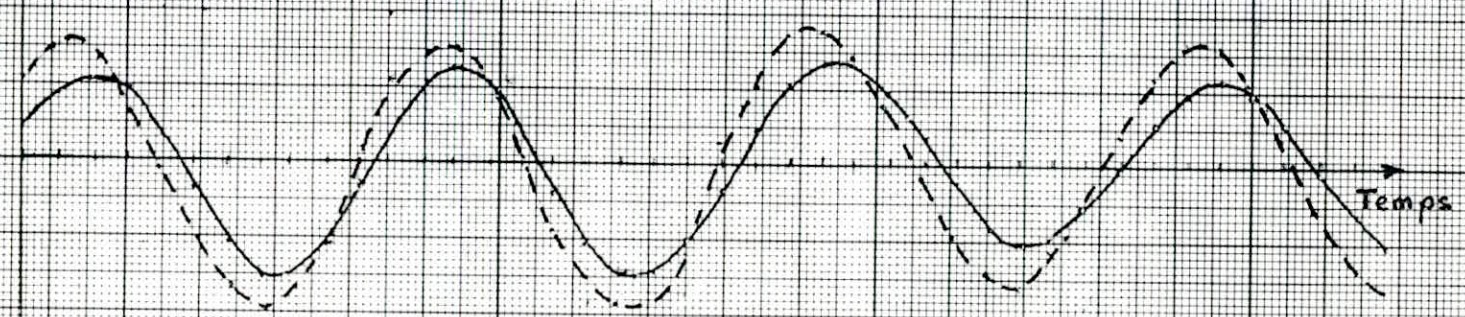
0,5s

Courbe Déplacement - Temps

Cas Viscoélastique avec Fondation

Accélérations

Champ Libre
Avec Fondation



Courbes Accélérations - Temps
.Cas Visco-Elastique.

Echelle: 40 m/s²
0,5s

INTERPRETATION DES RESULTATS:

1. Cas élastique:

La comparaison des diverses courbes données pour le cas d'une fondation dans le sol et le cas d'un champ libre nous amène aux observations suivantes:

a. Courbes contraintes de cisaillement - temps:

Pour un sol sans fondation, les contraintes à la surface sont nulles tandis que pour le cas d'une fondation, les contraintes existent.

Cela peut se traduire par le fait que dans le premier cas il n'y a que le mouvement de la surface du sol par rapport à la masse d'air qui la surmonte, or l'air est supposé ne possédant pas de masse volumique (masse volumique nulle); donc il ne peut y avoir de contraintes de cisaillement.

Alors que dans le second cas, il y a tendance de déplacement de la surface du sol par rapport au reste de la fondation d'où création de contraintes.

b. Courbes vitesses - temps:

On remarque que pendant les trois premières secondes d'enregistrement il y a une atténuation notable de la vitesse dans le cas d'une fondation par rapport à celui du champ libre. Nous pourrions donc dire que la

fondation joue un rôle d'amortisseur de vitesse durant cet intervalle de temps.

Après cela, l'inverse se produit, c'est à dire que l'amplitude de la vitesse dans le cas d'une fondation est plus importante que celle d'un champ libre. Cela peut se traduire par le fait qu'une partie d'énergie transmise à la fondation se restitue au sol. Par ce fait la fondation devient une nouvelle source d'énergie contribuant à l'amplification de la vitesse.

C - Courbes déplacements - temps et accélérations - temps:

de même phénomène Atténuation - Amplification est observé dans les deux types de courbes.

Nous pouvons donc dire que les interprétations précédentes sont valables pour ces deux cas.

2 - Cas visco-Elastique:

des mêmes phénomènes sont observés pour les différentes courbes que pour le cas "Elastique". Une interprétation similaire peut être donc déduite.

3 - Comparaison entre les cas élastique et viscoélastique:

La comparaison des courbes obtenues à partir des milieux élastique et viscoélastique, que ce soit le cas d'une fondation ou en champ libre, nous

amène à faire l'observation suivante :

Les amplitudes des vitesses, déplacements et accélérations d'un cas viscoélastique sont plus faibles que celle du cas élastique ; par ce fait la viscosité a tendance à amortir l'amplitude et joue le rôle d'amortisseur. L'onde émise de la base rocheuse à un instant t_0 avec une amplitude A_0 , arrive à la surface du sol après un temps de parcours t à travers toutes les couches et une diminution d'amplitude qui s'amortit avec le temps.

En conclusion, nous pouvons dire que :

a. La fondation atténue les amplitudes dès l'arrivée de l'onde à son niveau, et cela dans un temps très court, après ce temps, la fondation a tendance à amplifier les amplitudes qui seront plus importantes que celle d'un cas de sol en champ libre.

b. La viscosité a un rôle essentiel qui est l'amortissement des amplitudes au parcours de l'onde à travers les diverses couches, donc elle favorise la stabilité de la fondation.

BIBLIOGRAPHIE:

- . Elément de sismologie et
Comportement dynamique des barrages. | — Pierre Foray.
- . Méthode et appareils de mesure
des caractéristiques dynamiques des sols. | — M. LAKSHMANAN
- . Comportement dynamique des sols. | — A. Recker
- . Prospection sismique
| — R.E. SHERIFF.
| — L.P. GELDART.
- . La pratique des sols et fondations. | — G. FILLIAT.
- . Elasticity, Fracture and flow | — J.C. JAEGER.
- . CHARSOIL : Méthode des caractéristiques
appliquée aux sols. | — V.L. Streeter,
| — E.B. Wylie,
| — F.E. Richart, Jr.
| — Université de
| — Michigan.

