

# ETUDE EN LABORATOIRE DE L'INFLUENCE DE LA GRANULOMETRIE SUR LE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES SABLES

M. Mekkakia Maaza<sup>1</sup>, A. Arab<sup>1</sup>, M. Belkhatir<sup>1</sup>, M.P. Luong<sup>2</sup>, A.S. Hamoudi<sup>1</sup>, A. Benaissa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Sciences des Matériaux Sciences & Environnement, Université de Chlef (Algeria)

<sup>2</sup>Laboratoire des mécanique des solides, CNRS, Ecole Polytechnique de Palaiseau (France)

<sup>3</sup>Laboratoire des Matériaux, sols et thermique, Université de Science et Technologie d'Oran (Algeria)

## Résumé :

Le comportement des grains solides est un domaine très difficile à identifier. Plusieurs chercheurs ont essayés d'étudier le comportement d'un assemblage de particules solides constituant le sol et leurs contacts les unes contre les autres. Cet article présente les résultats des essais d'une étude expérimentale réalisée à la colonne résonante longitudinale et montrent que la granulométrie influe de manière significative sur le comportement des sables sous sollicitations vibratoires. En effet, il existe une relation étroite entre la courbe de résonance et le coefficient d'uniformité ( $C_u < 2$  ou  $C_u > 2$ ) en utilisant la méthode de vibration à la colonne résonante à excitation longitudinale et avec un balayage en fréquences qui varie de 300 Hz jusqu'au 30 Hz (en décroissant la fréquence), tandis que la vitesse et l'accélération sont maintenues constantes.

**Mots clés :** Sable, Résonance, dynamique, Vibration, Fréquence, Accélération, Granulométrie.

## 1. Introduction

Chlef est une zone à forte sismicité, ceci conduit à l'étude des séismes et surtout pour les calculs de certains ouvrages de génie civil. Des progrès considérables ont été réalisés en dynamiques des sols au cours de ces dernières décades aussi bien en investigation de laboratoire qu'en expérimentation sur le site. Ils ont permis une meilleure connaissance du comportement des sols soumis aux sollicitations cycliques, vibratoires, transitoires et dynamiques. Ils ont surtout offert des techniques fiables de mesure des paramètres physiques indispensables aux conceptions d'ouvrages en cas de calcul de réponse dynamique.

Le Chargement des sables sous sollicitation dynamique a fait l'objet de très nombreux travaux depuis plusieurs années, en particulier les écoles américaines (Seed, Lee, Youd, Martin) et Japonnaises (Yoshimi, Ishihara, Tasuda) et en France Biarez, P.M.Luong, P.Y Hicher et al, ils ont permis une meilleure connaissance du comportement des sols, ils ont surtout offert des techniques fiables de mesure des paramètres mécaniques indispensables aux concepteurs d'ouvrages en cas de calcul de réponse dynamique. Les pays ou les séismes présentent un danger permanent ont fait des études de bases. Dans ce contexte, les différents sols localisés dans la région de chlef (sables) nécessitent des études très poussées au laboratoire qui consistent à définir les comportements des sols sous sollicitation dynamiques.

La dynamique des sols se réfère généralement au comportement élastique ou pseudo élastique dans le domaine des faibles déformations. Le sol est un assemblage de grains et de particules beaucoup plus complexe que l'assemblage régulier des billes élastiques linéaires utilisé dans la théorie de Hertz. Cependant, l'étude mécanique d'un tel assemblage nous apporte des renseignements tout à fait fondamentaux pour approcher le comportement du sol, et la granulométrie des sols est d'un intérêt considérable dans la propagation des ondes sismiques. A cet effet on a procédé à une enquête expérimentale sur cet aspect.

Dans notre étude nous avons procédé à des essais de résonance (excitation de résonance longitudinal) pour montrer le comportement dynamique de deux types de sables à granulométrie étalée et serrée, et avec un balayage de fréquence décroissant qui varie de 300 Hz jusqu'au 30 Hz. En outre, les résultats d'expériences des essais de vibrations de résonance ont montré l'influence du coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) sur l'allure de la courbe de réponse accélération-fréquence (courbe de résonance), c'est-à-dire l'importance de la de résonance d'une part et la granulométrie du matériau d'autre sous un régime dynamique.

## 2. les matériaux utilisés

Les matériaux étudiés sont des matériaux granulaires. On a utilisé deux sables à granulométrie différentes, sable de chlef ( $C_u=2,7>2$ ) granulométrie étalée et le sable de Fontainebleau ( $C_u=1.67<2$ ) granulométrie uniforme. Ces matériaux possèdent des caractéristiques différentes comme nous les présentons ci-après.

### 2.1. Sable de Chlef

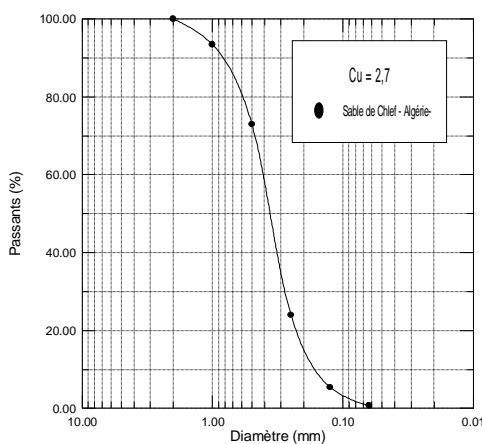


Fig 1. Courbe granulométrique

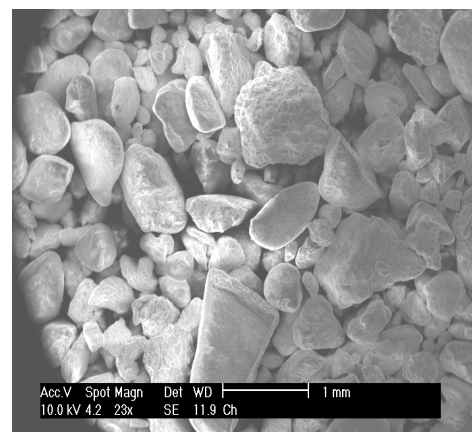


Figure 2. Sable de chlef – Image MEB -

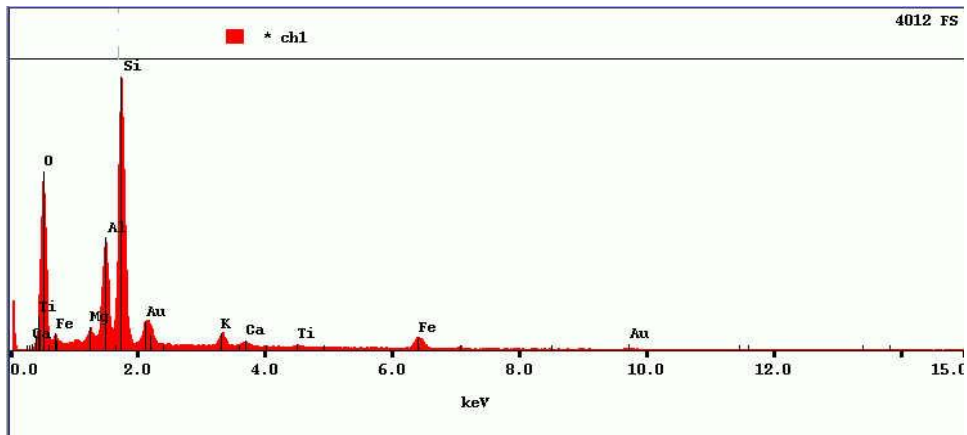


Figure 3. La composition minéralogique du sable de chlef– Image MEB –

Tableau 1. Caractéristiques du sable de Chlef-

Masse spécifique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$e_{\text{max}}$	$e_{\text{min}}$	Forme des grains
2,68	0,85	0,53	Arrondie

## 2.2. Sable de Fontainebleau

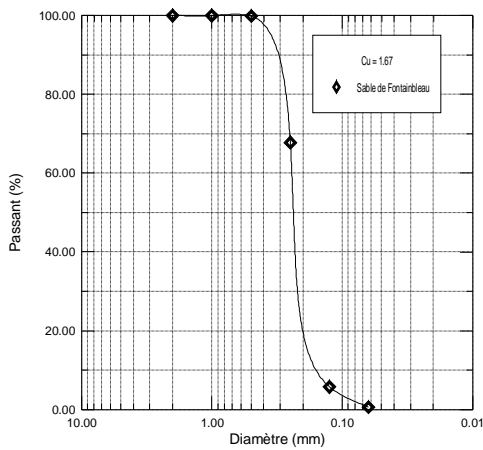


Figure 4. Courbe granulométrique

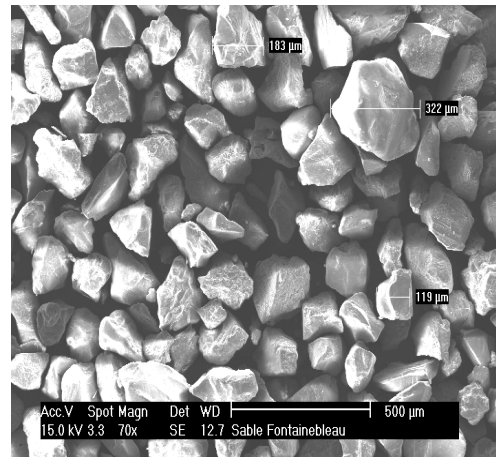


Figure 5. Sable de Fontainebleau - Image MEB -

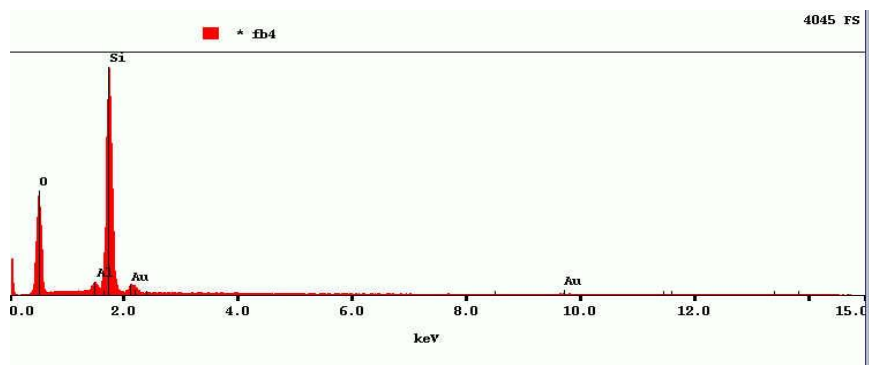


Figure 6. La composition minéralogique du sable de Fontainebleau – Image MEB –

Tableau 2. Caractéristiques du sable de Fontainebleau

Masse spécifique ( $\text{g/cm}^3$ )	$e_{\text{max}}$	$e_{\text{min}}$	Forme des grains
2,63	0,9	0,55	Assez anguleuse

### 3. Dispositif expérimental et matériaux étudiés

#### 3.1. Appareillage



Figure 7. Le pot vibrant relié à l'armoire de commande

#### L'appareillage est composé :

- Un pot vibrant commandé par une armoire de commande électronique de puissance ; la capacité du pot vibrant (DERRITRON TW 3000) est de 5 kN dynamique, dans une plage de fréquences sinusoïdales comprise entre 20 et 10 kHz.
- Un rack de pilotage en fréquence, accélération ou vitesse imposée.
- Un ordinateur qui reçoit et traite les données par la carte d'acquisition et le logiciel spécifique (développé au LMS).
- Divers amplificateurs et conditionneurs de signaux.
- Quatre capteurs : le premier pour l'accélération du haut de l'échantillon, le deuxième pour l'accélération du bas de l'échantillon, le troisième pour le pot vibrant, et enfin le quatrième pour la force qui est appliquée à l'échantillon.
- Masse  $M = 2,850 \text{ kg}$
- Une dame (mouton) de compactage.

#### 3.2. Procédure de l'essai résonnant à excitation longitudinale

Cet essai a été utilisé par de nombreux auteurs Hardin et Richart (1963), Saada et al. (1978) conjointement avec l'appareil de résonance en torsion afin de mesurer la vitesse des ondes longitudinales à la résonance d'un échantillon cylindrique. Boelle (1983) a développé cet essai de façon à mesurer le module d'Young et le coefficient de Poisson en petites déformations ( $\epsilon < 10^{-5}$ ) (El Hosri, 1984).

Le principe de l'essai consiste à faire vibrer (excitation de résonance longitudinale) un échantillon cylindrique de 70 mm diamètre, enveloppé par une membrane de caoutchouc et d'une embase à la partie inférieure, et une masse  $M$  à la partie supérieure de l'échantillon, en fait on effectue un balayage en fréquence et on impose une accélération et une vitesse de balayage en bas de l'échantillon.

Le programme « pot » enregistre le temps, le balayage en fréquence, l'accélération en haut, l'accélération en bas, et la force dynamique. Il affiche aussi l'amplitude et la phase du signal d'accélération du haut par rapport à l'accélération du bas.

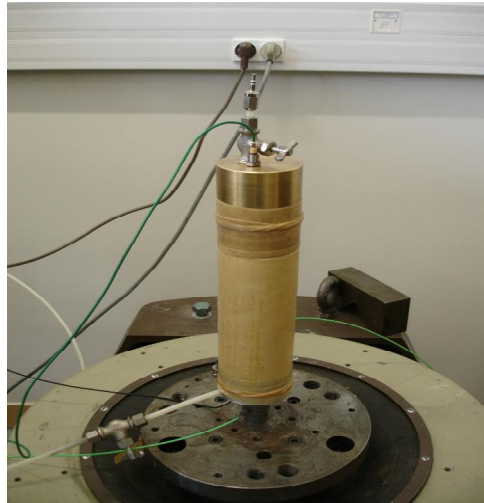


Fig. 8 L'échantillon placé sur le pot vibrant

### 3.3. Préparation des échantillons et mode opératoire

Les échantillons de sable sec utilisés pour une série d'essais ont été préparés dans un moule métallique en 5 couches de 0,2 kg compactées par une dame, on place une membrane en caoutchouc sur le moule qui sera solidaire de l'échantillon. Les diverses densités des échantillons varient en fonction du nombre de coups de compactage. Une fois que l'échantillon est mis en place à la densité voulue, on place une masse à la tête de l'échantillon, on applique le vide à l'intérieur de l'échantillon pour permettre sa manipulation ainsi que son positionnement droit (perpendiculaire) sur le pot vibrant. Ceci est un point très important, car cette pression à l'intérieur de l'échantillon est considérée comme une contrainte de confinement donnée par la pression de l'air comprimé  $S_c$  égale à 100 kPa et cela exige l'utilisation de membranes résistantes à l'air et aux frottements des grains secs.

L'essai commence en appliquant des vibrations avec un balayage en fréquence qui varie de 300 Hz jusqu'au 30 Hz (en décroissant la fréquence), tandis que la vitesse et l'accélération sont maintenues constantes. On constate que l'accélération à l'intérieur du matériau varie en fonction de la fréquence. Cette courbe de réponse accélération-fréquence est la courbe de résonance dont on doit étudier et analyser dans ce qui suit.

## 4. Résultats des essais

### 4.1. L'influence de la granulométrie sur la courbe de résonance

De nombreux auteurs ont étudié l'influence de la forme des grains, la granulométrie et la minéralogie des matériaux sur les caractéristiques mécaniques à la colonne résonnante longitudinale dans la gamme de petites déformations (Constantino., 1988). Skoglund, Macurson, et Cumy ont étudié l'influence de la structure du sol sur le module de déformation à la colonne résonnante en utilisant deux types de sol, un sable et un silt argileux (Homsy M., 1986). D'après Luong (1986), on peut constater que par sa morphologie, un sol sableux joue le rôle d'un filtre de fréquence passe-bas, en effet, la granulométrie et la porosité régissent l'atténuation des ondes élastiques.

Le programme expérimental réalisé en laboratoire comporte une série d'essais de résonance longitudinale sur les matériaux décrits précédemment pour diverses conditions de densité initiale ainsi que pour une gamme d'accélération d'excitation ( $0.25 \leq \Gamma \leq 1g$ ), avec une vitesse et une contrainte de confinement imposées. Ceci nous a permis de voir la forme et l'évolution de la courbe de résonance, et de quelle façon

se produit le saut en fonction de l'excitation pour une granulométrie déterminée. Les figures 9 et 10 illustrent l'aspect qualitatif du phénomène au cours de la résonance.

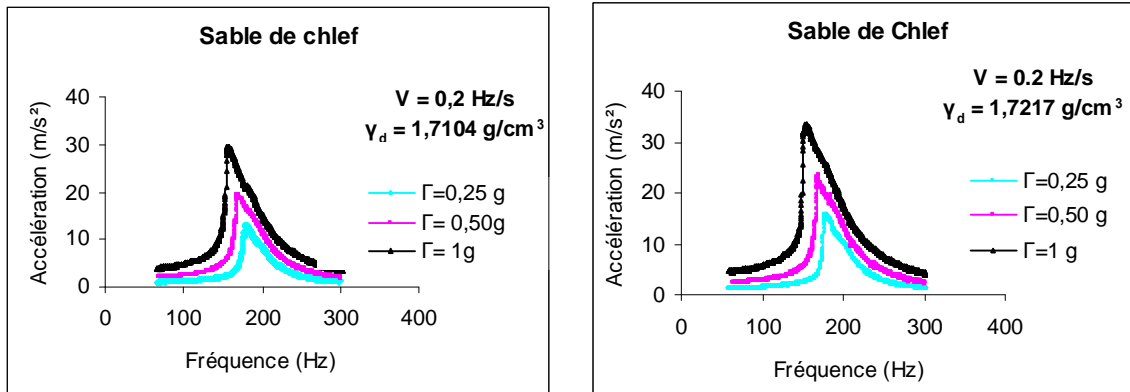


Fig.9 Courbes de résonance ( $S_c = 100$  kPa)

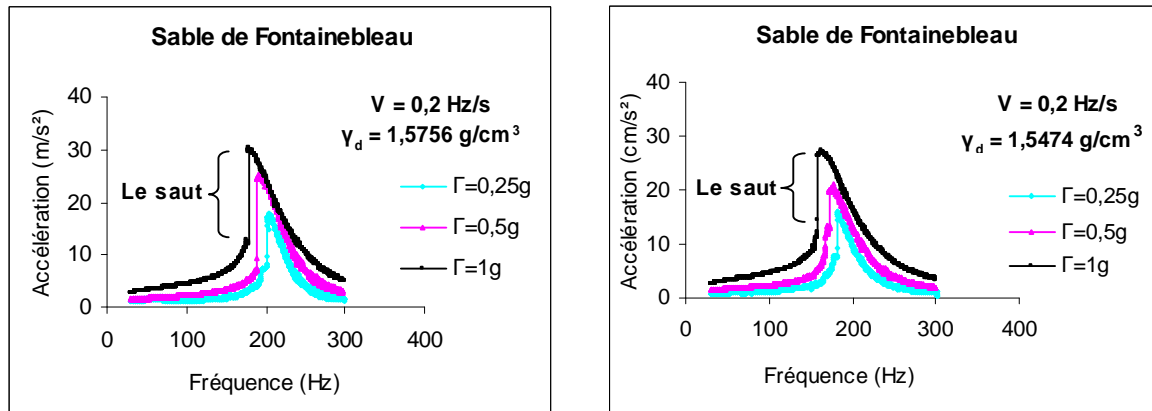


Fig.10 Courbes de résonance avec une zone d'instabilité ( $S_c = 100$  kPa)

La figure 9 montre l'évolution de l'accélération en fonction de la fréquence. On constate que les différentes courbes présentent une forme linéaire autour de la résonance pour le sable à granulométrie étalée. On peut alors dire qu'un sable à granulométrie étalée peut être caractérisé par sa linéarité pendant la résonance. Tandis que la figure 10, montre des courbes ayant une forme non linéaire autour de la résonance représentée par un saut, et qui évolue en fonction de l'accélération d'excitation.

On conclut qu'autour de la résonance, le sable à granulométrie serrée soumis à des sollicitations vibratoires, présente une courbe de résonance non linéaire se traduisant par un saut dont les calculs seront très difficiles à effectuer en particulier pour la bande passante.

Cependant, l'analyse du comportement du sol granulaire à la résonance (figures 9 et 10), montre que le sable est un assemblage de grains très complexe, et fournit des informations d'une grande importance qu'on peut les résumer par les points suivants :

Pour le sable à granulométrie étalée, on constate que la courbe de résonance présente une forme linéaire le long de l'essai vibratoire. Ceci s'explique par le fait que les grains de sable agités se rangent et forment des figures géométriques régulières; malgré qu'ils sont éjectés sous l'effet des vibrations ayant une amplitude maximale (la résonance), le réarrangement des grains (glissements et rotations) se fait rapidement, car la diversité des tailles (diamètre) des grains et leur forme arrondie facilitent le déplacement de ces derniers et se rassemblent durant le mouvement vibratoire correspondant à une faible amplitude, les figures 2 et 5 illustrent les images prises par le microscope électronique à balayage (MEB)

identifiant clairement la texture des sables étudiés. Les résultats des essais montrent que le sable à granulométrie étalée suit une loi de variation linéaire avant et après résonance.

En revanche, on constate une non-linéarité autour de la résonance pour le sable à granulométrie uniforme ( $C_u < 2$ ). Elle est plus significative lorsque l'accélération d'excitation est importante ( $\Gamma \geq 1g$ ). Les résultats des essais effectués sur le sable de Fontainebleau montrent des courbes de résonance de forme particulière avec apparition d'un saut descendant juste après la résonance (fig.10). Ce phénomène s'explique par le fait que la variation de l'accélération à l'intérieur de l'échantillon est extrêmement brutale pendant la résonance et que le contact direct entre les particules joue un rôle important lorsque le milieu se met en mouvement. Lorsque l'amplitude devient maximale (résonance) et le temps est très court, les grains se réarrangent difficilement à cause de leur dimension (uniformité) et leur forme (angularité). Le saut, qui apparaît, représente la partie non-linéaire du comportement.

Enfin, on peut dire que les facteurs favorisant la non-linéarité sont : la taille des grains, leurs arrangements, et les frottements secs autour de la résonance.

#### 4.2. L'effet de la densité sur la fréquence de résonance

Hardin et Richart (1963) ont réalisé des mesures de vitesse transversale sur plusieurs types de sables (sable arrondi et concassé de quartz). Leurs résultats ainsi que les résultats de Boelle (1983) montre que la vitesse des ondes  $v_s$  et  $v_l$  varie en fonction de la densité pour une contrainte donnée.

La densité initiale du matériau granulaire a un effet très important sur son comportement. Afin de montrer le rôle de celle-ci, nous avons réalisés des essais sur des sables à différentes densités comme on l'a mentionné au paragraphe 2. Pour illustrer l'influence de la densité initiale on représente les résultats obtenus sur la figure 11, on constate que la fréquence de résonance évolue que si la densité augmente, et d'autre part on note également que les fréquences de résonance sont légèrement égales que si l'accélération d'excitation imposée en bas est supérieure ou égale à  $1g$  ( $\Gamma \geq 1g$ ). On peut conclure que plus le sol est dense plus la fréquence de résonance augmente.

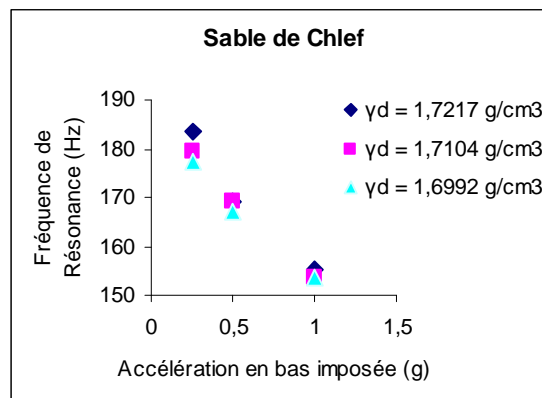


Fig. 11 - La variation de la fréquence de Résonance en fonction de la densité

#### 4. 3. Le rôle de la contrainte de confinement sur la fréquence de résonance

Avant de présenter l'ensemble des résultats obtenus pour les matériaux étudiés, il est très intéressant de rappeler les expériences faites par Iwasaki et Tatsuoka (1977) sur des sables de diverses natures à granulométries très variés, à partir des essais de résonance en torsion et de même Boelle (1983) et Ktari (1986), en réalisant des essais de résonance longitudinale sur des échantillons de billes de verre de diamètre

de 2mm, ont par ailleurs montrer la variation linéaire du module d'Young avec la contrainte de confinement isotrope  $S_0$ .

Pour mettre en évidence le rôle de la contrainte de confinement sur la fréquence de résonance, nous avons fait quelques essais sur le sable de chlef à sec pour différentes densité et avec une accélération d'excitation (accélération imposée) variable. Les résultats sont présentés sur la figure 12, on constate que plus la contrainte de confinement est élevée, plus on assiste à une augmentation de fréquence de résonance, et cet accroissement est plus significatif que lorsque l'accélération d'excitation est importante.

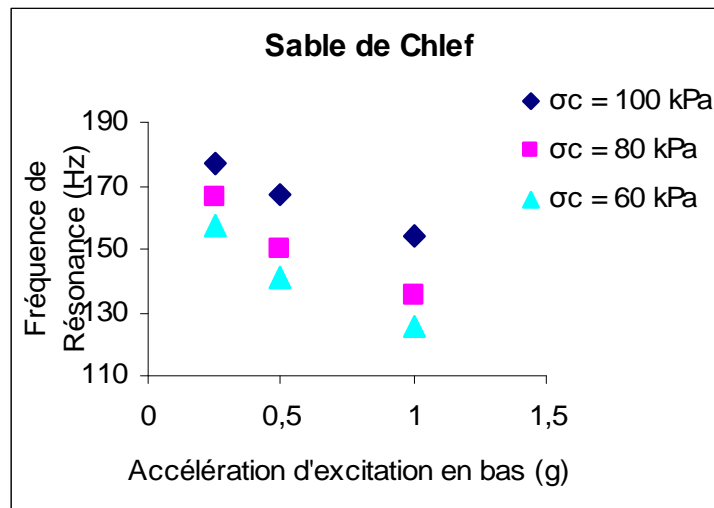


Fig. 12- l'influence de la contrainte de confinement sur la fréquence de résonance

## Conclusions

Les essais présentés montrent l'intérêt d'une présentation de l'état de comportement d'un assemblage de particules solides constituant le sol et leurs contacts les unes contre les autres. C'est pour cette raison que nous avons entrepris cette investigation en utilisant un appareil qui se base sur l'exploitation des résonances longitudinales.

Ce travail que nous avons effectué sur les matériaux pulvérulents, dans un état sec, nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes.

1. Notre étude a mis en évidence le caractère fortement non linéaire du comportement d'un sable uniforme ( $Cu < 2$ ) sous sollicitations vibratoires. L'état de non linéarité apparaît juste après la résonance.
2. On peut conclure que plus le sol est dense plus la fréquence de résonance est élevée.
3. Nous avons confirmé expérimentalement la variation linéaire de la fréquence de résonance avec la contrainte de confinement.

Cependant on peut dire, que le sable à granulométrie étalée tous ces points expérimentaux suivent une loi de variation linéaire.

### Références Bibliographiques

- [1] Boelle, J.L., 1983. Mesure en régime dynamique des propriétés mécaniques des sols aux faibles déformations. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris.
- [2] Constantino R. R., 1988. Détermination des propriétés mécaniques et des argiles en régime dynamique et cycliques aux faibles déformations. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris.
- [3] El Hosri M. S., 1984. Contribution à l'étude des Propriétés mécaniques des matériaux. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- [4] Hardin, B. O, Richart, F.E., 1963. Elastic wave velocities in granular soils. J. SMFS., ASCE, vol. 89, SM 1, pp: 33-65.
- [5] Homsy M., 1986. Contribution à l'étude des Propriétés mécaniques des sols en petites déformations à l'essai triaxial. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Paris.
- [6] Iwasaki, T., Tatsuoka, F., (1978). Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands. Soils and Foundations, vol. 17, N° 3, pp. 19-35.
- [7] Ktari, M ., (1986). Contribution à la détermination des caractéristiques mécaniques des sols aux faibles déformations en régime dynamique. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Paris.
- [8] Luong M. P., 1986. Mesure des propriétés dynamiques des sols. Revue Française de géotechnique, 34, Paris, pp: 18-28.
- [9] Saada, A.S., Bianchini, G.F., Shook, L.P., 1978. The dynamic response of normally consolidated anisotropic clay. Proceedings of the specialty conference on earthquake engineering and soil dynamics, ASCE, june, Pasadena, California, vol. II, pp. 777-801.
- [10] Skoglund, G.R., Marcuson, W.F., Cunny, R.W., 1976. Evaluation of resonant column test devices. J. GED., ASCE, vol. 102, GT 11, pp. 1147-1158