

## CHAPITRE 4

### Comportement des sols sous chargement cyclique

#### 4.1 Introduction

La charge cyclique peut être définie comme une action périodique qui, lorsqu'elle est appliquée à un corps matériel, a tendance à changer et généralement à inverser son état de contrainte et de déformation au fil du temps.

L'une des formes les plus connues d'un sol dans un scénario de chargement cyclique se produit pendant un séisme. Pendant le chargement sismique, le sol naturel est soumis à des contraintes de cisaillement cycliques à différentes amplitudes et fréquences qui induiront des déformations transitoires et permanentes.

#### 4.2 Facteurs influant le comportement cyclique des sols

Des informations adéquates sur les propriétés dynamiques du sol, y compris le module de cisaillement dynamique, le rapport d'amortissement, la réponse à la pression interstitielle et la résistance cyclique, sont plus généralement prises en compte dans les problèmes de réponse du sol et d'interaction sol-structure.

Les facteurs pris en considération lors d'une étude de comportement cyclique d'un sol sont :

- Amplitude des déformations cycliques ;
- Rapport des vides ;
- La contrainte effective moyenne ;
- La plasticité ;
- Le rapport de sur-consolidation ;
- Nombre de cycles ;
- La fréquence.

#### 4.3 Les principaux types de comportement cycliques

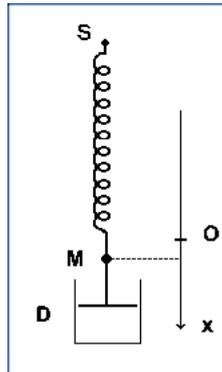
La connaissance du **comportement cyclique** des sols s'impose pour comprendre la réponse des sites quand ils sont frappés par un séisme.

En très petites déformations, la raideur du sol est représentée par le module de cisaillement  $G_{\max}$  qui est en lien direct avec la vitesse des ondes de cisaillement  $V_s$  :

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4.1)$$

Dans la gamme des déformations faibles à moyennes, le comportement des sols est non linéaire et hystérétique. **La raideur** du sol est représentée par le module de cisaillement sécant  $G$ .

La dissipation d'énergie par le sol au cours des cycles est représentée par le coefficient d'amortissement D.



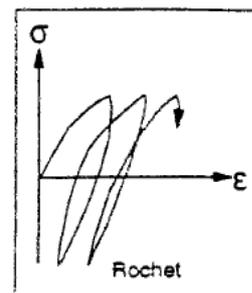
*Figure 4.1 – comportement non linéaire du sol*

Le développement rapide du Génie Civil dans des domaines géotechniques en liaison avec des **effets cycliques**, transitoires et dynamiques dus aux éléments naturels (houle, courants, vents, ...), aux actions sismiques, ou à des technologies spéciales (vibrofonçage, machines tournantes, ...) a suscité un intérêt particulièrement suivi pour **les aspects cycliques** du comportement mécanique des sols.

Sous une sollicitation à amplitude de contrainte contrôlée, on distingue trois types de phénomènes :

**a) Le rochet**

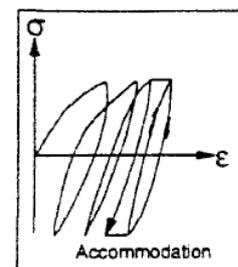
La déformation augmente d'une manière continue, conduisant ainsi à des phénomènes de rupture comme la liquéfaction ou la mobilité cyclique (fig.4.2).



*Figure 4.2 – Phénomène de Rochet*

**b) L'accommodation**

C'est une stabilisation du chemin contrainte-déformation sur une boucle d'hystérésis (fig.4.3).



*Figure 4.3 – Phénomène d'accommodation*

### c) L'adaptation

Après un certain nombre de cycles, la courbe contrainte-déformation présente un chemin réversible, donc un comportement parfaitement élastique (fig.4.4).

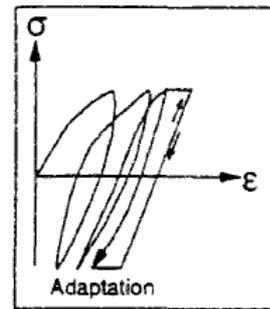


Figure 4.4 – Phénomène d'adaptation

À déformation contrôlée, on parle de **durcissement cyclique** (fig.4.5) si, au cours des cycles, le diagramme contrainte-déformation présente un intervalle de variation de contraintes qui croît et se stabilise. S'il décroît et se stabilise, il s'agit d'un **adoucissement cyclique** (fig.4.6).

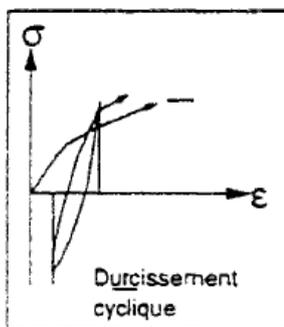


Figure 4.5 – Durcissement cyclique

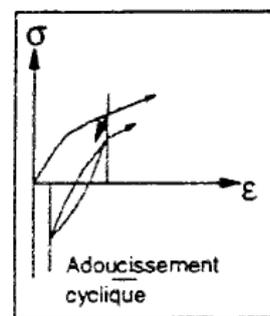


Figure 4.6 – Adoucissement cyclique

Un chargement cyclique est **alterné** si le déviateur de contraintes peut, au cours des cycles, prendre des valeurs plus petites que celle des conditions initiales avant cisaillement (fig.4.7). Il est **non alterné** si le déviateur de contraintes reste toujours supérieur (fig.4.8).

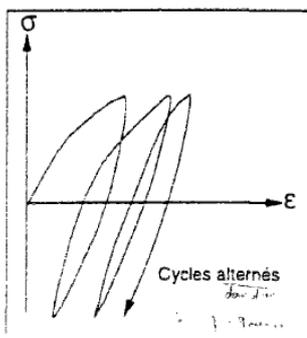


Figure 4.7 – Cycle alterné

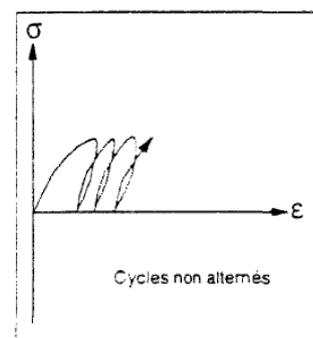


Figure 4.8 – Cycle non alterné

## 4.4 Propriétés dynamiques des sols

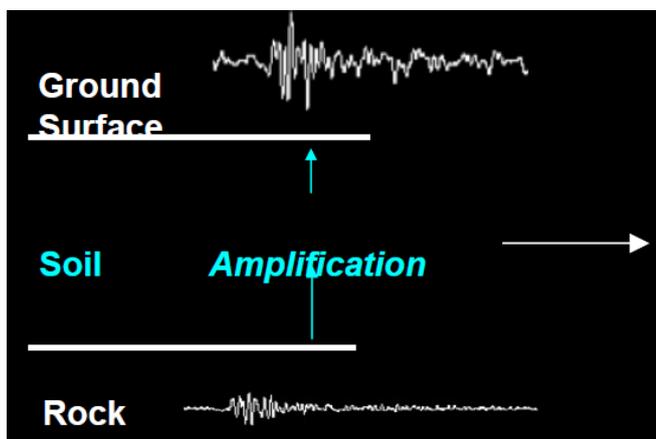
L'un des aspects les plus importants de la pratique d'ingénierie géotechnique sismique consiste à évaluer les effets des conditions du sol locales sur le mouvement fort.

L'évaluation des effets des conditions de sol locales nécessite une quantification du comportement du sol sous une charge dynamique.

Le comportement du sol soumis à un chargement dynamique est régi par ce que l'on appelle désormais les « **propriétés dynamiques du sol** ».

Les caractéristiques du sol peuvent grandement influencer sur la nature des secousses à la surface du sol.

Les dépôts de sol ont tendance à agir comme "filtres" des ondes sismiques en atténuant les mouvements à certaines fréquences et en les amplifiant à d'autres.



Une incertitude majeure:  
propriétés dynamiques du sol et  
leur dépendance au niveau  
d'excitation (c'est-à-dire  
comportement non linéaire du  
sol avec une amplitude de  
contrainte croissante).

Figure 4.9 – Effet des propriétés du sol sur les ondes sismiques

### a) *Caractéristiques de déformation*

Module dynamique, module d'Young  $E$ , module de cisaillement  $G$ , module volumique  $K$ , raideur contenue, coefficient de Poisson  $\nu$ , ...

### b) *Caractéristiques de dissipation d'énergie*

Amortissement, dispersion, atténuation, ...

### c) *Caractéristiques de liquéfaction*

Nombre de cycles conduisant à la liquéfaction totale, coefficient de cisaillement cyclique, réponse en déformation cyclique et en pression interstitielle, ...

### d) *Caractéristiques rhéologiques*

Effet des vitesses de déformation ou de contrainte.

## 4.5 Comportement des sols sous chargement cyclique

Un échantillon de sol soumis au laboratoire à des cycles de chargement cyclique présente une courbe effort déformation analogue à celle de la figure 4.10. On distingue une courbe de premier chargement (trait discontinu) et l'apparition, lors de décharges et recharges successives, d'une boucle d'**hystérésis**.

Plus la déformation maximale atteinte au cours du cycle augmente, plus le module de cisaillement sécant (pente de la droite joignant l'origine à l'extrémité de la boucle) diminue.

Cela signifie que sous chargement cyclique, tout comme sous chargement statique unidirectionnel, le sol a un comportement non linéaire.

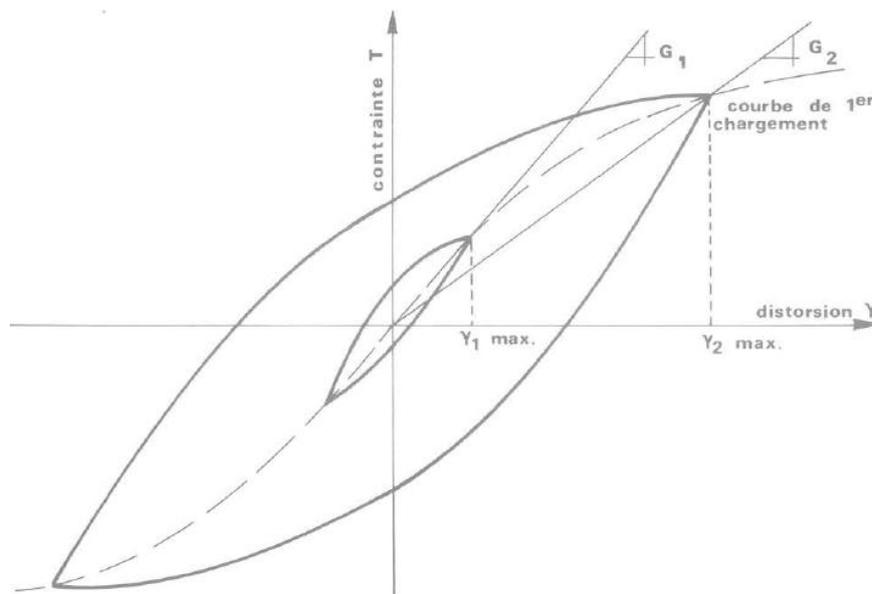


Figure 4.10 – Courbe contrainte – déformation sous chargement cyclique

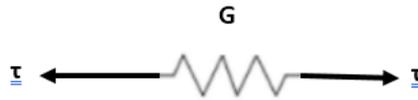
L'aire de la boucle d'hystérésis, qui caractérise l'énergie dissipée par le matériau au cours du chargement, augmente lorsque la déformation maximale atteinte au cours du cycle augmente.

Enfin, on constate expérimentalement que la forme de la boucle d'hystérésis ne dépend pas de la fréquence de la sollicitation appliquée, ce qui signifie que l'amortissement du sol est de nature purement hystérétique et non d'origine visqueuse.

Pour décrire ce type de comportement, les modèles les plus couramment utilisés sont brièvement décrits ci-dessous :

### 4.5.1 Élasticité linéaire

Le sol est représenté par un seul ressort défini par sa constante  $G$  représentant le module de cisaillement.



**Figure 4.11 – Modèle élastique linéaire**

La loi de comportement s'écrit :

$$\tau = G\gamma \quad (4.2)$$

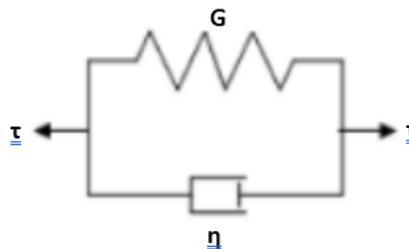
Avec  $\tau$  : contrainte de cisaillement cyclique

$\gamma$  : déformation de cisaillement cyclique.

D'après les constatations expérimentales, ce type de loi ne peut représenter qu'imparfaitement le comportement du sol sous chargement cyclique. Cependant pour tous les problèmes de vibration de machine où les déformations induites dans le sol sont de très faible amplitude, la loi de l'élasticité linéaire constitue une approximation tout à fait satisfaisante.

#### 4.5.2 Modèle visco-élastique linéaire

Le sol est représenté par un ressort de caractéristique de raideur G et par un amortissement de coefficient  $\eta$  placé en parallèle (modèle de Kelvin-voigt).



**Figure 4.12 – Modèle viscoélastique linéaire**

La loi de comportement s'écrit :

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma} \quad (4.3)$$

Où  $\gamma$  et  $\dot{\gamma}$  représentent la déformation et la vitesse de déformation.

Dans ce type de modélisation, le coefficient  $\eta$  est en général pris constant, ce qui correspond à un amortissement visqueux.

Pour tenir compte du comportement hystérétique du sol, il est possible d'introduire un amortissement visqueux dit « équivalent » permettant de ramener l'étude d'un matériau hystérétique à celui d'un matériau viscoélastique.

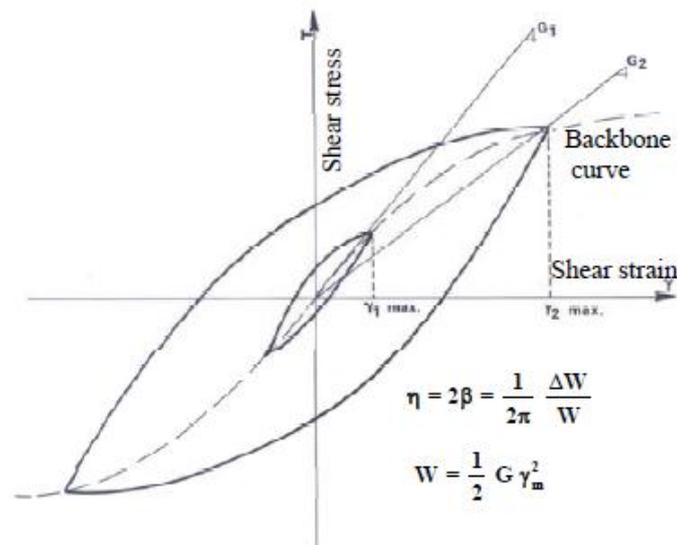
Dans cette procédure, l'équivalence se fait sur l'égalité des amplitudes à résonance du modèle viscoélastique et du modèle hystérétique.

On définit ainsi un pourcentage d'amortissement critique équivalent  $\beta$  :

$$\beta = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{G_S \gamma_{max}^2} \quad (4.4)$$

Où  $\Delta W$  (aire de la boucle) : énergie totale dissipée pendant le cycle.

$W$  : énergie élastique emmagasinée par le système au cours du cycle.



L'énergie emmagasinée pendant un cycle :

$$W = \frac{1}{2} G \gamma_m^2 \quad (4.5)$$

L'introduction d'un module de cisaillement complexe  $G^*$  permet d'écrire la loi de comportement sous la forme :

$$\tau = G^* \gamma \quad (4.6)$$

Le module  $G^*$  est fonction des caractéristiques  $G$  et  $\beta$  du matériau.

Le modèle de ce type le plus couramment utilisé est celui développé par Lysmer :

$$G^* = G \left[ 1 - 2\beta^2 + 2i\beta\sqrt{1 - \beta^2} \right] \quad (4.7)$$

Mis en œuvre avec un processus itératif permettant de prendre en compte de façon approchée la non linéarité du sol, ce type de modèle est d'utilisation simple. Il permet de calculer de façon satisfaisante les accélérations et contraintes maximales induites.

Il surestime l'amortissement dû aux hautes fréquences et ne permet pas de calculer les déformations permanentes résultant d'une sollicitation cyclique. Celles-ci ne peuvent être appréciées qu'à l'aide de modèles purement non linéaires.

#### 4.5.3 Modèles non linéaires

Les déformations irréversibles du sol sont d'origine purement plastique. A chaque inversion du signe du chargement, le matériau retrouve ses propriétés initiales. En d'autres termes, le module tangent à la boucle d'hystérésis, juste après le changement de sens du chargement, est égal au module tangent initial à la courbe de premier chargement ;

D'un point de vue rhéologique, un matériau purement plastique peut être représenté par un ensemble de ressorts et de frotteurs (fig.4.12).

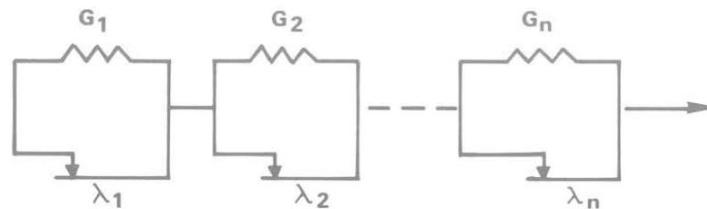


Figure 4.12 – Modèle plastique (série de ressorts et frotteurs)

La vérification de la validité du modèle ci-dessus a été faite à partir des formules suivantes :

$$\gamma = f(\tau) = \gamma_c + \frac{(\tau - \tau_c)}{G_{max}} \left[ 1 + H \left( \frac{|\tau - \tau_c|}{n} \right) \right] \quad (4.8)$$

$$\tau = f(\gamma) = \tau_c + (\gamma - \gamma_c) G_{max} \left[ 1 - J \left( \frac{|\gamma - \gamma_c|}{n} \right) \right] \quad (4.9)$$

Avec  $\tau_c$  et  $\gamma_c$  : valeurs de la contrainte et de la déformation lors de la précédente inversion du cycle du chargement, l'indice c est relatif au point de changement du sens de chargement.

n : paramètre de valeur 1 sur la courbe de premier chargement et 2 sur les courbes de décharge et recharge successives.

$G_{max}$  : module de cisaillement maximal du sol (pente de la tangente à la courbe de premier chargement au voisinage de l'origine)

J et H sont des fonctionnelles à obtenir par calage avec les résultats expérimentaux d'un essai dynamique. On les trouve en reformulant les équations précédentes en cas de la courbe du premier chargement ( $\tau_c = \gamma_c = 0, n=1$ ).

Nous avons :

$$\tau = \gamma G_{max}(1 - J(\gamma)) \quad (4.10)$$

Soit :

$$J(\gamma) = 1 - \frac{G}{G_{max}} \quad (4.11)$$

De même, on obtient :

$$H(\tau) = \frac{G_{max}}{G} - 1 \quad (4.12)$$