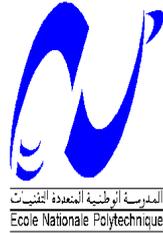


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Civil

Mémoire de Master

Thème

Influence de l'Interaction Sol Structure sur le comportement de différentes structures

Proposé et dirigé par
Mr. M. DEMIDEM

Présenté par
BENLAMEUR Sabah

Soutenu publiquement le 14/06/2015 devant le jury composé de :

Président :	Mr. BELKACEMI	Professeur à l'ENP
Encadreur :	Mr M.DEMIDEM	M.A.A à l'ENP
Examineurs :	Mme. M. MORSLI	Professeur à l'ENP
	Mr. A. LARIBI	Docteur à l'ENP

Promotion 2015

ENP, 10 Avenue Hacene Badi. El Harrach, Alger.

Résumé :

Les développements présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans la continuité de la démarche mise en œuvre dans le PFE présenté précédemment intitulé « Approche simplifiée pour l'analyse de l'ISS sous chargements statique et dynamique: Application aux portiques sous fondations filantes».

Comme la résolution de tout problème de mécanique nécessite une bonne connaissance de ses conditions aux limites, non seulement que la connaissance des propriétés du sol sous-jacent à la fondation est essentielle pour bien déterminer le comportement réel de la structure, mais aussi, le choix de système simple pour le représenter et l'introduire.

Dans la partie statique; la structure considérée est un bâtiment (à usage d'habitation). Une étude paramétrique est effectuée, son but est d'identifier un des paramètres clés (le sol) qui contrôlent les phénomènes d'ISS et de caractériser, la nature et l'ampleur de ces effets sur le comportement de la structure.

Tandis que dans la partie dynamique, la structure considérée étant un tunnel. Le but est d'interpréter les solutions obtenues, de manière à distinguer les tendances de portée générale des résultats induits par des hypothèses simplificatrices particulières (hypothèse de l'encastrement à la base de la structure).

Mots clés : structure, sol, statique, bâtiment, paramètres, dynamique, tunnel.

ملخص :

التطورات المقدمة في هذه الأطروحة هو استمرار للمنهج المنفذ في الأطروحة التي سبق عرضها. كأي مشكلة ميكانيكية دراسة هيكل يتطلب معرفة شروطه الحدية، و ذلك بتحديد خصائص تربة الأساس من جهة و اختيار نظام بسيط لتمثيله من جهة أخرى. تعتبر هذه الخطوات أمر بالغ الأهمية لتحديد بشكل صحيح السلوك الفعلي للهيكل. في مرحلة التحميل الحركي قمنا بدراسة أثر التفاعل بين التربة و بناية بصيغة الانتقالات.؛ الهيكل المدروس عبارة عن مبنى (للاستخدام السكني). أجرينا دراسة للعوامل المؤثرة و الهدف منها هو تحديد مدى تأثيرها على سلوك هيكل. بينما في مرحلة التحميل الساكن حاولنا حل نفس المشكلة لكن بشكل مختلف نوعا ما . و الهدف من ذلك هو تفسير الحلول الناتجة عن ذلك، لمعرفة مدى تأثير الفرضيات المبسطة في النتائج العامة.

الكلمات المفتاحية: هيكل ، التربة ، التحميل الحركي ، التحميل الساكن ، مبنى ، العوامل ، التحميل التوازني ، النفق.

Abstract:

As the resolution of any mechanical problem requires knowledge of its boundary conditions, not only the knowledge of the properties of the soil underlying the foundation is critical to properly determine the actual behavior of the structure, but also the choice of a simple system to represent and introduce it .

In the static part; the reporting structure is a building. A parametric study is carried out in this sense, its aim is to identify the key parameters that control the SSI phenomena and characterize the nature and extent of these effects on the behavior of the structure.

While in the dynamic part, the considered structure is a tunnel, and solving the same problem will proceed somewhat differently. The aim is to interpret the resulting solutions, so as to distinguish trends in general results induced by specific simplifying hypothesis.

Key words: structure, soil, static, building, parameters, dynamic, tunnel.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier d'abord Dieu le tout puissant qui m'a donné la santé, la force, la patience, le courage et la volonté pour entamer et finir ce travail.

Je tiens à remercier vivement mon promoteur Mr DEMIDEM pour ses conseils éclairés et les entretus qu'il a daigné accorder.

Notre gratitude va également aux membres du jury pour honorer notre soutenance et pour l'effort fourni afin d'examiner ce travail.

Toute ma gratitude va aussi à l'ensemble des enseignants qui ont eu l'amabilité de nous accorder leur aide précieuse, ainsi que leurs valeureux conseils.

Je remercie également l'ensemble du personnel du département, qui n'a guère tardé à nous soutenir.

Et tous ceux qui ont participé de loin ou de près pour aboutir à ce résultat.

DEDICACE

Je dédie ce travail à:

Mes très chers parents

Ma grand-mère et à la mémoire de mon grand-père

Mes sœurs et belles sœurs

Mes frères et beaux frères

Mes neveux et nièces

Mes amis et camarades

Je le dédie également à toute personne qui m'a aidé et qui a cru en moi, spécialement mon binôme KAHLERRAS Amina, mes sœurs Meriem Naziha et Sarah ainsi que ma belle-sœur Samira.

BENLAMEUR Sabah

TABLE DES MATIERES

Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : Généralités	2
1.1. Introduction	2
1.2. Approche du cote structure.....	3
1.3. Approche du cote sol	3
1.4. Conclusion	4
CHAPITRE 2 : étude paramétrique sur un bâtiment.....	5
2.1 Principe des modèles pour l'analyse considérant l'ISS.....	5
2.1.1 Approche 1	5
2.1.2. Approche 2	5
2.1.3. Approche 3.....	6
2.2. Comportement de la Structure/Sol	7
2.2.1. Comportement du matériau de la structure	7
2.2.2. Comportement des sols	7
2.2.3. Modélisation d'un bâtiment sur fondations superficielles	7
2.3. Partie calcul	8
2.3.1. Description du modèle	11
2.3.2. Résultats et conclusion.....	17
CHAPITRE 3 : étude d'un tunnel	21
3.1. Introduction	21
3.2. Les méthodes usuelles de dimensionnement d'un tunnel.....	22
3.2.1. Approche empirique :	23
3.2.2. Les méthodes d'analyse et de calcul :	24
On peut distinguer les méthodes de calcul suivantes	24
3.3. Tunnels soutenus	25
3.4. Les charges agissantes sur les tunnels	26
3.5. Partie calcul	27
3.6. Résultats et conclusion :	30
CONCLUSION GENERALE	37
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	38
ANNEXE :	39

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1: Approche 1 : Modèle complet pour l'étude de l'interaction sol-structure. (MEF).	5
Figure 2-2: Approche 2 : modèle où la fondation est représentée par des ressorts.....	6
Figure 2-3 : Analyse du comportement d'un ouvrage simple : point de vue de la structure et point de vue du sol	7
Figure 2-4: Modélisation de l'ISS par des ressorts.....	10
Figure 2-5: représentation de la structure étudiée.....	11
Figure 2-6 : Représentation de la structure étudiée (avec ISS).....	12
Figure 2-7: Représentation de la variation du rapport $\left(\frac{T_{fix}}{T}\right)$ en fonction du module de Young.....	17
Figure 3-1 : Schéma de principe de méthode de conception de tunnel.....	23
Figure 3-2 : Profil du sol.....	27
Figure 3-3 : Modélisation de l'interaction sol structure (tunnel).....	28
Figure 3-4 : Le profil du sol homogénéisé.....	29
Figure 3-5 : Représentation de la section discrétisée en neuf (09) nœuds.....	31
Figure 3-6 : Représentation de la section discrétisée en huit (08) membrures.....	31
Figure 3-7 : Représentation graphique du tunnel avant et après déformation (avec ISS).....	32
Figure 3-8: Représentation graphique du tunnel avant et après déformation (sans ISS).....	34
Figure 3-9 : Représentation graphique du tunnel après déformation (sans et avec ISS).....	34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Classification des sols selon le RPA.	8
Tableau 2.2 : Valeurs typiques des propriétés mécaniques des sols.	9
Tableau 2.3 : Propriétés des sols considérés.	10
Tableau 2.4: Les solutions propres du système « $KU=\lambda MU$ » pour le site 1.....	13
Tableau 2.5 : Les solutions propres du système « $KU=\lambda MU$ » pour le site 2.....	14
Tableau 2.6 : Les solutions propres du système « $KU=\lambda MU$ » pour le site 3.....	14
Tableau 2.7 : Les solutions propres du système « $KU=\lambda MU$ » pour le site 4.....	15
Tableau 2.8 : Les solutions propres du système « $KU=\lambda MU$ » pour le site 5.....	15
Tableau 2.9 : Les solutions propres du système « $KU=\lambda MU$ » pour le site 6.....	16
Tableau 2.10 : Les solutions propres du système « $KU=\lambda MU$ » pour le site 7.....	16
Tableau 2.11 : Les solutions propres du système « $KU=\lambda MU$ » pour le site 8.....	17
Tableau 2.12 : Tableau récapitulatif des différents résultats.....	17
Tableau 3. 1 : Caractéristiques géotechniques des couches constituant le terrain.....	28
Tableau 3. 2 : Déplacement des nœuds.....	32
Tableau 3. 3 : Efforts résultants.....	32
Tableau 3. 4 : Réactions aux supports.....	32
Tableau 3.1: Déplacements des noeuds.....	33
Tableau 3.6 : Efforts résultants.....	34
Tableau 3.72 : Réactions aux appuis.....	34
Tableau A.1 : Fonctions d'impédance de fondations enterrées dans un sol homogène sur substratum rocheux	38
Tableau A.2 : Fonctions d'impédance de fondations à la surface d'un sol homogène sur substratum rocheux.....	39

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE: [1]

L'interaction sol-structure est une discipline de la mécanique appliquée s'intéressant au développement et à l'investigation des méthodes théoriques et pratiques pour l'analyse des structures soumises à des charges dynamiques en tenant compte du comportement du sol de la fondation. Les effets de l'interaction sol-structure (ISS) sur la réponse sismique n'ont été sérieusement pris en considération qu'après le tremblement de terre de 1971 à San Fernando et au début de la construction nucléaire en Californie. Les conséquences catastrophiques de plusieurs récents tremblements de terre dans différentes régions du monde ont posé un problème sérieux aux ingénieurs pour mieux comprendre le comportement sismique des structures en tenant compte de l'effet de l'interaction sol-structure (ISS). L'analyse sismique d'une structure tenant compte des propriétés locales du site, diffère de celle considérée encadrée à sa base. De ce fait, il est particulièrement important de considérer l'ISS dans les zones sismiques où la réponse dynamique des sols peut changer la réponse des structures soumises à l'excitation sismique. De plus, les sites meubles (sol mou) recevant des structures rigides et massives peuvent changer les caractéristiques dynamiques de ces dernières de manière significative.

Du point de vue de la structure, le but d'une analyse tenant compte de l'interaction sol-structure est de déterminer l'effet de l'action du sol sur la structure, c'est-à-dire principalement les pressions de contact, en fonction de la déformation de la structure, ceci pour pouvoir procéder aux vérifications nécessaires à son dimensionnement.

En effet, la réponse sismique des structures dépend de la nature du mouvement du sol, des propriétés mécaniques et physiques de la structure et de celles du sol. Il y'a donc interaction entre la structure et le milieu extérieur. La procédure la plus radicale pour éliminer le problème de cette interaction sol-structure est de considérer la structure parfaitement encadrée dans le sol ; cette hypothèse est d'autant plus valable que le sol de fondation est peu déformable vis-à-vis de la structure, par exemple dans le cas d'un bâtiment rigide sur un sol rocheux.

La présente étude est divisée en deux thématiques : l'étude et l'analyse de l'effet du site sur la période fondamentale des structures sujettes à l'interaction d'une part, et d'autre part démontrer l'effet de l'interaction sur les déformations et efforts induits dans un tunnel sur un exemple (tunnel du métro de HAI EL BADR). Cette dernière est effectuée en utilisant une analyse statique d'une structure sous l'effet d'un système de forces statiques équivalentes à celui de l'action sismique.

CHAPITRE I

CHAPITRE 1 : Généralités [1] [2] [3]

1.1. INTRODUCTION

L'hypothèse couramment utilisée dans le calcul des structures et selon laquelle les supports de celle-ci sont considérés comme parfaitement encastrés dans le sol peut poser des problèmes si on tient compte de la continuité ou l'interaction entre le sol et la structure.

Cependant le choix d'un modèle de calcul adéquat qui tient compte des conditions d'appuis et de l'interaction sol-structure devient l'une des étapes essentielles en vue de calculer avec toute sécurité une construction donnée.

Certains auteurs ont proposé, pour chaque degré de liberté de la fondation, des modèles de sols constitués d'un nombre plus ou moins grand de masses, ressorts et amortisseurs à coefficients indépendants de la fréquence. La manière la plus simple de prendre en compte le sol est de le représenter par des ressorts reliant un ou plusieurs nœuds à une base rigide, à laquelle on impose un mouvement. Dans le cas d'un modèle plan, une semelle sous point d'appui isolé est représentée par deux ressorts agissant à la translation et un ressort à la rotation; sous un radier, le sol est modélisé par un ressort horizontal et un ressort vertical en chaque nœud.

Dans toute l'étude, le sol est vu comme une condition aux limites appliquée aux appuis de la structure et l'interaction caractérisée par une raideur (appuis élastiques) dont le module de réaction doit être calculé GAZETAS (1991). [4]

Au fait, l'interaction avec le sol est modélisée par l'intermédiaire des ressorts élastiques. Les coefficients de raideur sont calculés pour chaque direction sismique (horizontal, vertical et rotation). Ils sont donnés par les formules de GAZETAS (1991).

On présentera dans ce qui suit des méthodes d'analyse permettant de tenir compte de l'interaction inertielle sol structure. En cas d'utilisation, il faut se rappeler que les propriétés des sols à considérer dans ce type d'analyse n'ont pas une valeur unique et précise, pour trois raisons :

- les incertitudes quant à la représentativité d'un échantillon de sol pour caractériser tout un volume
- les incertitudes inhérentes aux méthodes expérimentales de détermination des propriétés des sols.

- le fait que le module de cisaillement G d'un sol à considérer dans l'analyse est un module sécant, qui dépend donc de l'importance des déformations réelles du sol qui ne sont pas connues a priori ; plus celles-ci sont plastiques, plus le module sécant est faible.

L'analyse de l'interaction sol - structure doit donc être faite en couvrant raisonnablement le domaine des valeurs possibles des paramètres caractérisant le sol.

Les calculs de mécanique des sols ou des roches, qui utilisent la mécanique des milieux continus et la mécanique des solides, n'ont à priori que peu de ressemblances avec ceux de la résistance des matériaux, qui sert au calcul des structures et utilise une représentation des efforts internes par des torseurs (effort normal N , effort tranchant T et moment fléchissant M). S'il est possible de combiner ces deux approches dans un même calcul, les calculs se font habituellement de façon séparée dans chaque milieu (terrain/structure), avec une représentation simplifiée des conditions d'interface.

1.2. APPROCHE DU COTE STRUCTURE :

L'étude de la structure de l'ouvrage, qui utilise les outils de la résistance des matériaux, a besoin de conditions aux limites au contact avec le sol (figure 1.7.b). Les conditions les plus simples consistent en des conditions d'appui (encastrement) sur la surface du sol, supposée fixe. Ce type d'appui est suffisant pour l'étude des structures où les déformations (limitées) d'un appui ne perturbent pas la répartition des efforts dans la structure.

Pour les structures dont les efforts internes dépendent des déformations, il est indispensable d'évaluer la réponse du sol sous les charges appliquées, en tenant compte du déplacement (et de la déformation) de l'interface.

1.3. APPROCHE DU COTE SOL :

Pour le mécanicien des sols, le calcul de l'interaction sol-structure a une allure toute différente : l'ouvrage est une condition à la limite appliquée au massif de sol (figure 1.7.c), qui peut prendre deux formes principales :

- Pression uniforme sur une surface (fondation souple) ;
- Force appliquée sur une surface à déformation uniforme (translation ou rotation) pour une fondation rigide.

Compte tenu de cette condition d'interaction, qui tient compte du mode de déformation de la structure (rigidités relatives du sol et de l'ouvrage), et des autres conditions initiales et aux limites, on exécute alors les calculs classiques de stabilité et de déformation du massif de sol.

1.4. CONCLUSION

Chaque approche à sa façon, le calcul de la structure et le calcul du massif de sol, tiennent donc compte de façon détaillée de leur objet propre et de façon plus approximative des propriétés de l'autre milieu. Les progrès récents de la modélisation numérique des sols et des structures permettent en théorie de décrire simultanément de façon égale et détaillée le sol et la structure et de déterminer globalement les efforts et les déformations de chaque matériau. Néanmoins, de tels calculs sont encore très rares et il est important de garder à l'esprit que les calculs courants comportent une description simplifiée de l'interaction.

CHAPITRE II

CHAPITRE 2 : étude paramétrique sur un bâtiment [2] [3] [7]

2.1 PRINCIPE DES MODELES POUR L'ANALYSE CONSIDERANT L'ISS [2] [3] [7]

La présentation de l'interaction sol structure, se fait suivant trois approches:

2.1.1 Approche 1

Le modèle représente la structure et le sol depuis le bedrock jusqu'à la surface. Cette approche présente des difficultés, puisqu'il faut:

- construire un modèle détaillé du sol
- définir pour chaque élément de sol un module d'élasticité, un coefficient de Poisson, une masse volumique et un amortissement.
- définir des accélérogrammes au bedrock

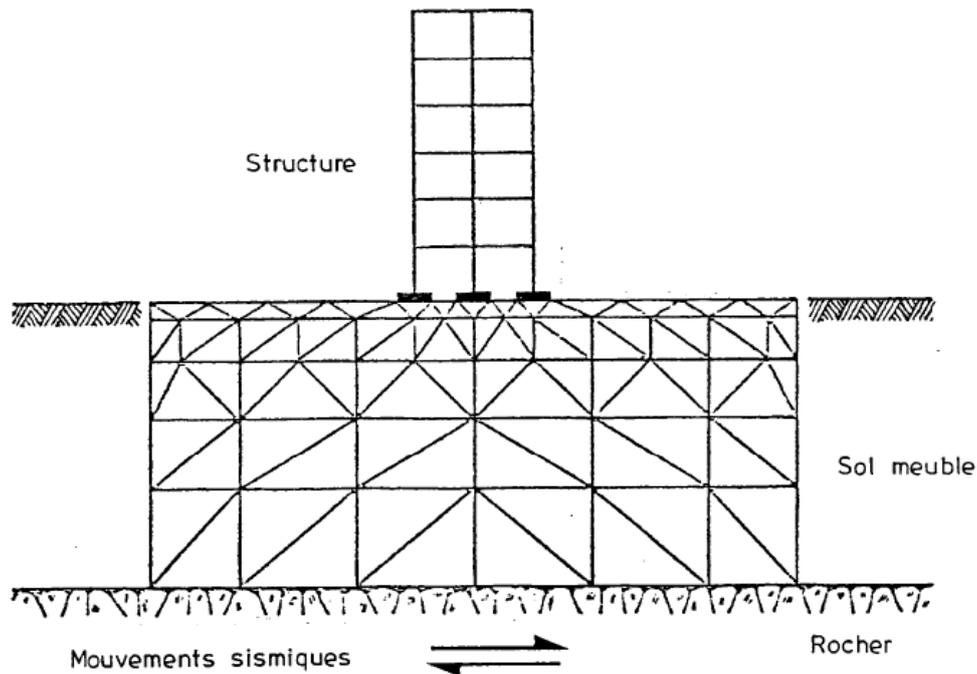


Figure 2-1: Approche 1 : Modèle complet pour l'étude de l'interaction sol-structure. (MEF). [2]

2.1.2. Approche 2

On intègre dans un modèle la structure et une portion de sol associée à la structure à laquelle on attribue des caractéristiques représentatives de la flexibilité et l'amortissement du sol.

Cette deuxième approche permet des analyses plus simples. On y sépare le sol et la structure, de sorte que le mouvement du bâtiment est égal à la somme :

- du mouvement que prend le bâtiment supposé sans masse sous l'action sismique en base : interaction cinématique
- du mouvement du bâtiment résultant de l'interaction cinématique : interaction inertielle.

Pour une structure dont les fondations peuvent être considérées comme superficielles, l'interaction cinématique est négligeable : le bâtiment suit les mouvements de la surface du sol et on peut étudier l'interaction sol-structure dans un modèle unique où le sol est modélisé par des ressorts. Des études ont permis de calibrer des raideurs de ressorts représentant au mieux l'interaction sol-structure.

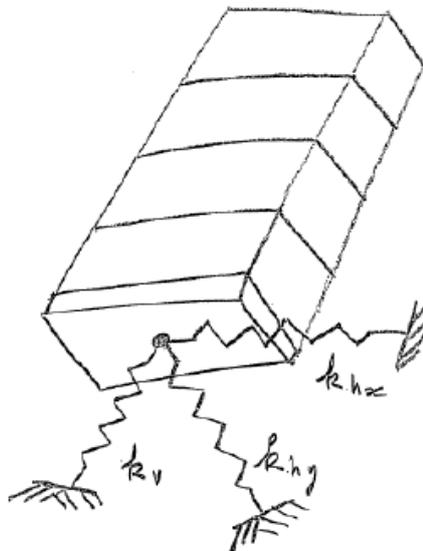


Figure 2-2: Approche 2 : modèle où la fondation est représentée par des ressorts. [2]

2.1.3. Approche 3

Des méthodes d'usage encore plus simple ont été établies, qui ne demandent pas une représentation explicite des fondations : la structure est encastree en base et on traduit l'influence de l'interaction inertielle par des relations de modifications des sollicitations calculées dans cette hypothèse. L'une de ces méthodes résulte d'études d'oscillateurs simples sur support élastique, des systèmes à 3 DDL :

- un déplacement horizontal en base
- une rotation θ en base
- un déplacement relatif entre la masse et la base de l'oscillateur.

2.2. COMPORTEMENT DE LA STRUCTURE/SOL

2.2.1. Comportement du matériau de la structure

En général, la structure est constituée de matériaux (béton, acier, bois, ... etc.) dont la rigidité est beaucoup plus importante que celle du sol environnant. Le comportement de ces matériaux peut être décrit par des modèles simples, élastiques ou élastoplastiques.

2.2.2. Comportement des sols

Le comportement des sols est très complexe. En effet, il est essentiellement irréversible, non linéaire, dilatant et dépendant de l'histoire et de la direction des sollicitations. Pour de faibles sollicitations, il peut être décrit par l'élasticité linéaire. Pour des sollicitations moyennes ou fortes, des modèles plus élaborés ont été proposés : soit, des modèles élastoplastiques avec ou sans écrouissage (Mohr-Coulomb, Lade, Cam-Clay, Nova, ... etc.), ou soit, des modèles incrémentaux (Duncan, Darve, Mroz, ... etc.).

2.2.3. Modélisation d'un bâtiment sur fondations superficielles

La démarche de modélisation des interfaces peut être illustrée par l'exemple simple d'un portique reposant par des fondations superficielles sur un massif de sol à surface horizontale.

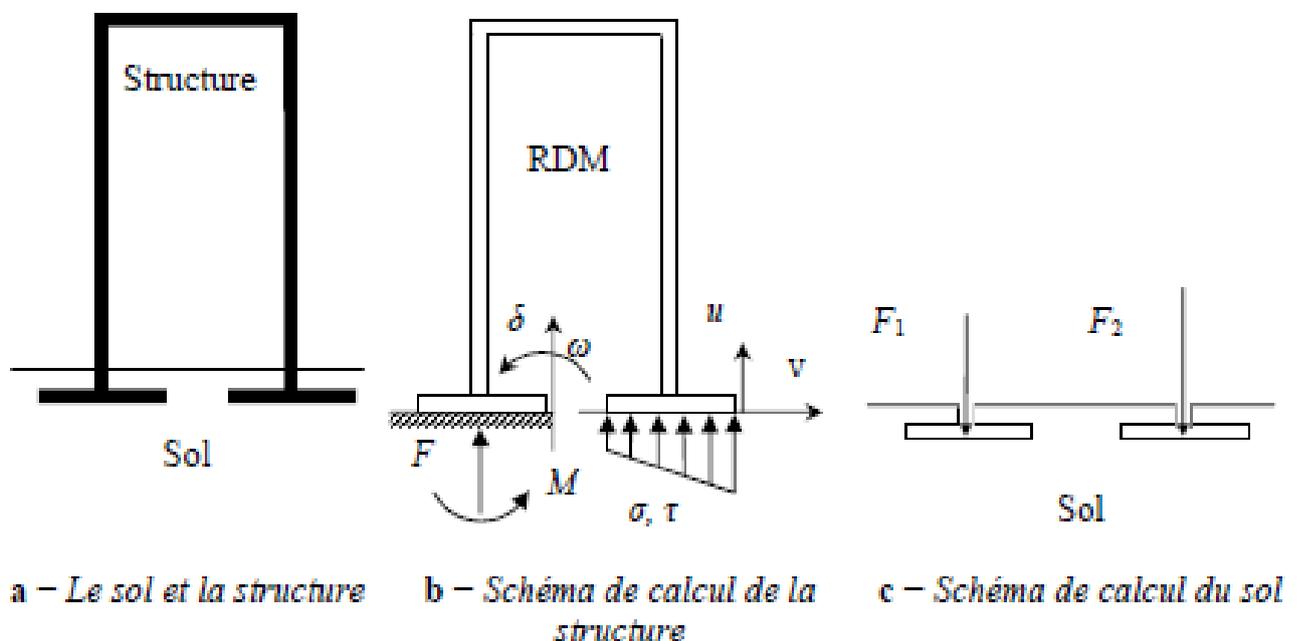


Figure 2-3 : Analyse du comportement d'un ouvrage simple : point de vue de la structure et point de vue du sol. [5]

2.3. PARTIE CALCUL

Cette première thématique a pour objectif la détermination de la période fondamentale des structures contreventées par des portiques autostables en tenant compte de l'interaction sol-structure pour différentes catégories de site. Au fait, cette partie du travail est une étude paramétrique de l'influence de l'interaction sol-structure sur la période fondamentale de structure sous chargement sismique tel que ces paramètres sont basés sur les caractéristiques du sol et la dimension de la fondation. Plusieurs catégories de site proposées par le code algérien (RPA99) sont prises en compte

Tableau 2.1 : Classification des sols selon le RPA. [6]

Caté- gorie	Description	q_c (MPa) (c)	N (d)	p_l (MPa) (e)	E_p (MPa) (e)	q_u (MPa) (f)	V_s (m/s) (g)
S ₁	Rocheux (a)	-	-	>5	>100-	>10	≥800
S ₂	Ferme	>15	>50	>2	>20	>0.4	≥400 - < 800
S ₃	Meuble	1.5 ~ 15	10 ~ 50	1 ~ 2	5 ~ 20	0.1 ~ 0.4	≥200 - < 400
S ₄	Très Meuble ou Présence de 3m au moins d'argile molle (b)	<1.5	<10	<1	<5	< 0.1	≥100 <200

Le type de sol considéré est l'argile avec ses trois types: molle, ferme et très ferme. Les propriétés de ses derniers sont définies comme le montre le tableau ci-après :

Tableau 2.2 : Valeurs typiques des propriétés mécaniques des sols. [1]

Type de sol	Densité t/m ³	Module E MPa	Coeff. de Poisson ν	Cohésion c _u apparente MPa	Angle de frottement interne φ' degré	Adhésion a kN/m ²
Sable limoneux		7 - 70	0,35	0	25	
Sable peu compact	1,75	15 - 20	0,35	0	29	
Sable dense	2,00	50 - 120	0,35	0	38	
Sable dense et gravier	2,07	90 - 200	0,40	0	30	
Argile molle	1,75	1 - 15	0,50	0 - 0,025	< 18	10-35
Argile ferme	2,00	10 - 20	0,50	0,025 - 0,100	18	10-35
Argile très ferme	2,07	25 - 200	0,50	0,100 - 0,200	> 18	35-60
Grès		≤ 50.000	0,35	60		
Craie		5000-20000	0,45	5		
Calcaire		25000-100000	0,47	83		
Basalte		15000-100000	0,45			

La période fondamentale est un paramètre essentiel pour la détermination de la réponse des structures à un chargement sismique. Ce paramètre est généralement calculé en utilisant des formules empiriques fournies par les règlements sismiques et développées à partir des données statistiques. Ces formules négligent généralement la flexibilité du sol qui peut avoir une influence significative sur la période fondamentale de la structure, et conduire par conséquent à un mauvais dimensionnement de celle-ci.

Le comportement du sol et de la structure est supposé de type élastique. L'analyse est effectuée en utilisant une modélisation par des ressorts. Les coefficients de raideur sont donnés par les formules suivantes (GAZETAS 1991) : (voir annexe)

$$k_V = \frac{0.73 G}{1 - \nu} \left(1 + 3.5 \frac{B}{H}\right) \left[1 + 0.2 \left(\frac{d}{B}\right)^{2/3}\right] \left(1 + 3.5 \frac{B}{H - D}\right) \quad (3.1)$$

$$k_H = \frac{2 G}{2 - \nu} \left(1 + 2 \frac{B}{H}\right) \left(1 + 0.5 \frac{d}{B}\right) \left(1 + 1.5 \frac{d}{H}\right) \quad (3.2)$$

$$k_\theta = \frac{\pi G B^2}{2(1 - \nu)} \left(1 + 0.2 \frac{B}{H}\right) \left(1 + \frac{d}{B}\right) \left(1 + 0.65 \frac{D}{H}\right) \quad (3.3)$$

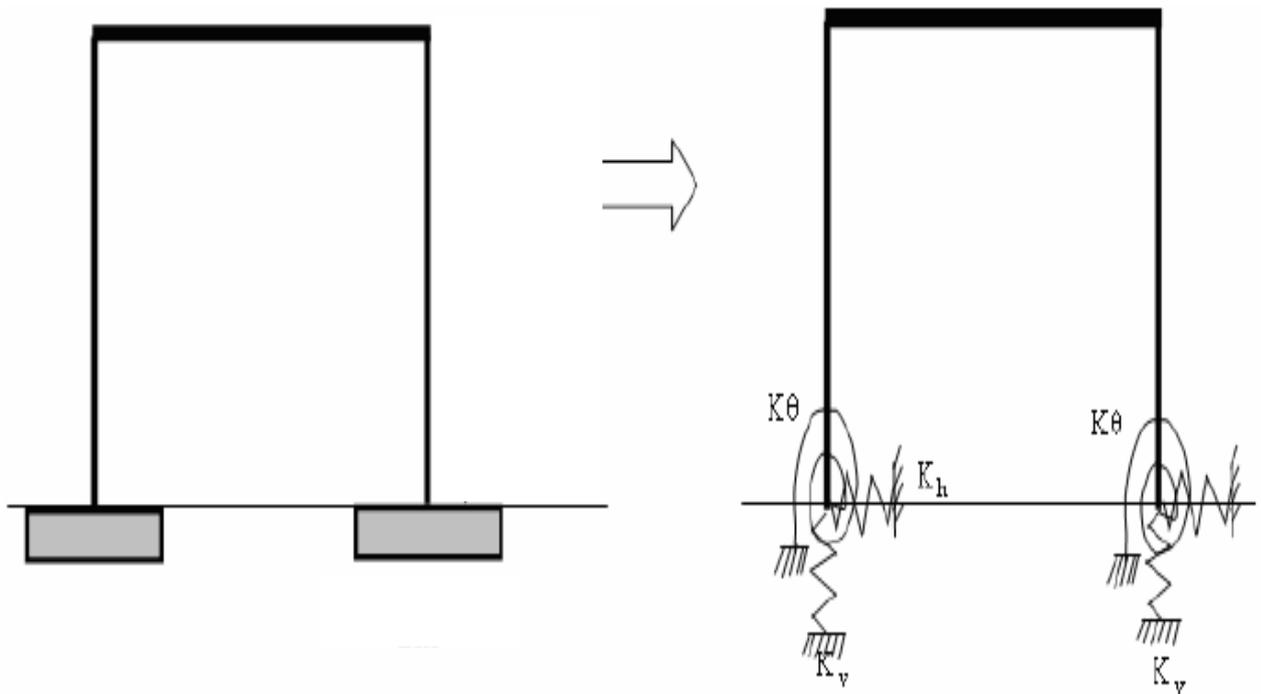


Figure 2-4: Modélisation de l'ISS par des ressorts.

Dans notre étude, nous proposons de prendre en compte l'interaction sol-structure pour une large gamme de sols.

Tableau 2.3 : Propriétés des sols considérés.

	Type de sol	Densité (t/m ³)	Module de Young E (MPa)	Coeff. de poisson ν	Coeff. de cohésion (KN/m ²)	Angle de frottement interne ϕ	Dimensions de la semelle (m)	Profondeur d'ancrage (m)
Sol 1	Argile molle	1.75	15	0.5	43	18	18	18
Sol 2	Argile ferme	2	20	0.5	100	18	1.8	1.5
Sol 3	Argile très ferme	2.07	30	0.5	105	19	1.6	1.5
Sol 4	Argile très ferme	2.07	40	0.5	110	20	1.3	1.5

Sol 5	Argile très ferme	2.07	60	0.5	120	25	1.3	1.3
Sol 6	Argile très ferme	2.07	80	0.5	130	27	1.2	1
Sol 7	Argile très ferme	2.07	100	0.5	140	30	1	1.1
Sol 8	Argile très ferme	2.07	200	0.5	200	40	0.8	1

2.3.1. Description du modèle :

Il s'agit d'un portique d'un bâtiment auto-stable (poteaux, poutres) à usage d'habitation R+4. Les poteaux de 3 m de hauteur (sauf pour le Rez De Chaussée c'est 3.2m), ont une section 0.3*0.3m². Les poutres de 4m de longueur ont une section de 0.3*0.4m². Le plancher est constitué d'une dalle à corps creux. La structure repose sur des semelles filantes en béton de largeur 2m.

L'interaction avec le sol est modélisée par l'intermédiaire des ressorts élastiques K_V, K_H, K_θ .

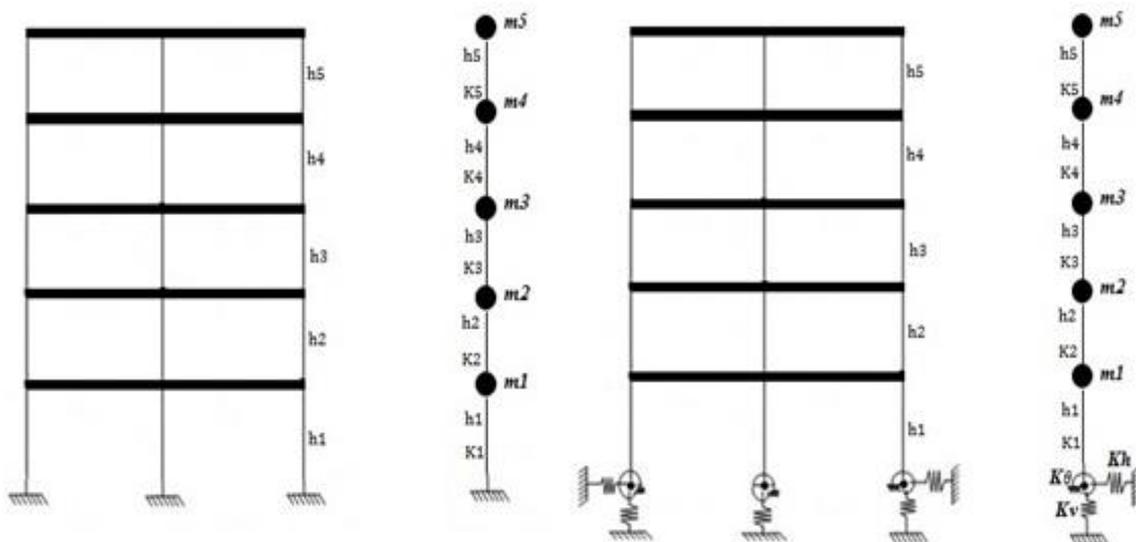


Figure 2-5: représentation de la structure étudiée.

Du fait que l'on considère un chargement sismique horizontal, la composante verticale des raideurs se simplifie. De plus, les semelles étant filantes, il ne peut y avoir de mouvement de rotation et donc k_θ se simplifie aussi. Il ne reste que la composante horizontale et la modélisation de la structure tenant compte de l'interaction sol structure, dans ce cas, se fera comme suit :

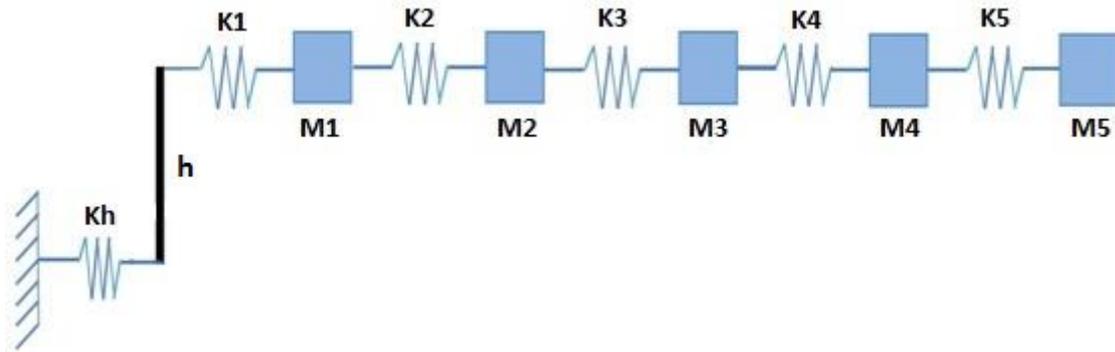


Figure 2-6 : Représentation de la structure étudiée (avec ISS)

Et l'équation d'équilibre s'écrit comme suit :

$$M\ddot{u} + K u = 0$$

Où :

$$M = \text{diag} (M_i * (1 + \alpha_i))$$

Tel que :

$$[M_i] = \text{diag} (36, 35, 35, 35, 32)$$

$$\text{Et : } [\alpha_i] = \left\{ \begin{array}{l} \frac{k_1}{5k_h} \\ \frac{k_1 k}{k_h(4k_1 + 5k)} \\ \frac{k_1 k}{k_h(7k_1 + 5k)} \\ \frac{K_1 K}{k_h(9k_1 + 5k)} \\ \frac{k_1 k}{K_h(10k_1 + 5k)} \end{array} \right\}$$

Ce qui donne :

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \left(1 + \frac{k_1}{5k_h}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 \left(1 + \frac{k_1 k}{k_h(4k_1 + 5k)}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \left(1 + \frac{k_1 k}{k_h(7k_1 + 5k)}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_4 \left(1 + \frac{k_1 k}{k_h(9k_1 + 5k)}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_5 \left(1 + \frac{k_1 k}{k_h(10k_1 + 5k)}\right) \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\begin{cases} k_h = \frac{2G}{2-\nu} \left(1 + 0.5 \frac{D}{B}\right) \\ k_1 = \frac{3*(2*EI)}{L_1^3} \\ k = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = \frac{3*(2*EI)}{L^3} \end{cases}$$

Et :

$$K = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & (k_4 + k_5) & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & -k_5 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 48833.24 & -28947.6 & 0 & 0 & 0 \\ -28947.6 & 57895.2 & -28947.6 & 0 & 0 \\ 0 & -28947.6 & 57895.2 & -28947.6 & 0 \\ 0 & 0 & -28947.6 & 57895.2 & -28947.6 \\ 0 & 0 & 0 & -28947.6 & 28947.6 \end{bmatrix}$$

Sol 1 (E=15) :

$$M = \begin{bmatrix} 62.028 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 52.3565 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 44.064 \end{bmatrix}$$

Tableau 2.4: Les solutions propres du système « KU=λMU » pour le site 1.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
λ_i (rad/s) ²	41.1	340	880.9	1522.6	2081.2
ω_i (rad/s)	6.41	18.439	29.68	39.02	45.62
U_i	-0.0317	-0.0757	0.0777	0.0532	-0.0228
	-0.0507	-0.0726	-0.0156	-0.0838	0.0633
	-0.0659	-0.0248	-0.0840	0.0100	-0.0888
	-0.0765	0.0376	-0.0246	0.0775	0.0783
	-0.0816	0.0779	0.0722	-0.0588	-0.0361

Sol 2 (E=20) :

$$M = \begin{bmatrix} 56.39 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 48.615 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 46.745 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 46.745 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 41.467 \end{bmatrix}$$

Tableau 2.5 : Les solutions propres du système « KU=λMU » pour le site 2.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
λ_i (rad/s) ²	44	367.3	950.8	1639.3	2230.6
ω_i (rad/s)	6.633249	16.165	30.835	40.488	47.229
U_i	-0.0327	-0.0783	0.0815	0.0507	-0.052
	-0.0524	-0.0761	-0.0135	-0.0859	0.0669
	-0.0682	-0.0269	-0.0869	0.007	-0.0917
	-0.0791	0.0382	-0.0269	0.0809	0.08
	-0.0845	0.0807	0.0744	-0.06	-0.0364

Sol 3 (E=30) :

$$M = \begin{bmatrix} 49.43 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 43.95 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 42.743 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 42.7348 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 38.22 \end{bmatrix}$$

Tableau 2.6 : Les solutions propres du système « KU=λMU » pour le site 3.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
λ_i (rad/s) ²	48.2	408	1054.5	1812.3	2448.8
ω_i (rad/s)	6.9426	20.199	32.473	42.57	49.48
U_i	-0.0341	-0.082	0.087	0.0628	-0.0291
	-0.0547	-0.0812	-0.0099	-0.0884	0.0725
	-0.0714	-0.0301	-0.0909	0.0036	-0.0955
	-0.0829	0.0391	-0.0304	0.0859	0.0818
	-0.0885	0.0847	0.0774	-0.0617	-0.0366

Sol 4 (E=40) :

$$M = \begin{bmatrix} 45.36 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 41.23 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 40.397 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 40.397 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 36.345 \end{bmatrix}$$

Tableau 2.7 : Les solutions propres du système « KU=λMU » pour le site 4.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
λ_i (rad/s) ²	51.1	436	1126.5	1931.9	2598
ω_i (rad/s)	7.148	20.88	33.56	43.95	50.97
U_i	-0.0350	-0.0843	0.0906	0.0669	-0.0321
	-0.0563	-0.0846	-0.0071	-0.0897	0.0764
	-0.0734	-0.0324	-0.0934	0.0005	-0.0979
	-0.0853	0.0395	-0.0329	0.0893	0.0827
	-0.0912	0.0874	0.0794	-0.0627	-0.0366

Sol 5 (E=60) :

$$M = \begin{bmatrix} 42.12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 40.81 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 38.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 38.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34.8384 \end{bmatrix}$$

Tableau 2.8 : Les solutions propres du système « KU=λMU » pour le site 5.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
λ_i (rad/s) ²	53.3	455.3	1191.9	2011.2	2704.8
ω_i (rad/s)	7.3	21.3377	34.524	44.846	52
U_i	-0.0357	-0.0849	0.0941	0.0731	-0.0327
	-0.0575	-0.0870	-0.0045	-0.0906	0.0735
	-0.0750	-0.0332	-0.0955	0.0026	-0.1006
	-0.0871	0.0406	-0.0351	0.0888	0.0872
	-0.0931	0.0899	0.0809	-0.0625	-0.0387

Sol 6 (E=80) :

$$M = \begin{bmatrix} 40.572 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 38.0688 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 37.6523 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 37.6523 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34.1344 \end{bmatrix}$$

Tableau 2.9 : Les solutions propres du système « KU=λMU » pour le site 6.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
λ_i (rad/s) ²	54.8	474.3	1225.2	2094.7	2798.7
ω_i (rad/s)	7.4	21.778	35	45.768	52.9
U_i	-0.0361	-0.0872	0.0955	0.0727	-0.0366
	-0.0582	-0.0891	-0.0029	-0.0908	0.0818
	-0.0761	-0.0355	-0.0966	-0.0042	-0.1008
	-0.0885	0.0400	-0.0364	0.0938	0.0836
	-0.0946	0.0909	0.0818	-0.0638	-0.0364

Sol 7 (E=100) :

$$M = \begin{bmatrix} 39.69 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 37.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 37.1272 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 37.1272 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 33.712 \end{bmatrix}$$

Tableau 2.10 : Les solutions propres du système « KU=λMU » pour le site 7.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
λ_i (rad/s) ²	55.6	482.3	1245.7	2129.1	2841.1
ω_i (rad/s)	7.456	21.96	35.29	46.12	53.3
U_i	-0.0364	-0.0878	0.0965	0.0739	-0.0376
	-0.0586	-0.0900	-0.0020	-0.0910	0.0829
	-0.0766	-0.0361	-0.0972	-0.0052	-0.1014
	-0.0891	0.0401	-0.0371	0.0948	0.0838
	-0.0953	0.0916	0.0823	-0.0641	-0.0363

Sol 8 (E=200) :

$$M = \begin{bmatrix} 37.9176 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 36.278 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 36.105 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 36.105 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 32.89 \end{bmatrix}$$

Tableau 2.11 : Les solutions propres du système « $KU=\lambda MU$ » pour le site 8.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
λ_i (rad/s) ²	58.3	509.4	1316.4	2246.7	2985.4
ω_i (rad/s)	7.635	22.57	36.3	47.4	54.64
U_i	-0.0372	-0.0897	0.0997	0.0779	-0.0408
	-0.0599	-0.0931	-0.0009	-0.0917	0.0864
	-0.0784	-0.0382	-0.0994	-0.0082	-0.1033
	-0.0913	0.0405	-0.0395	0.0979	0.0845
	-0.0977	0.0940	0.0839	-0.0648	-0.0362

2.3.2. Résultats et conclusion :

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 2.12 : Tableau récapitulatif des différents résultats

Type de sol	Argile molle	Argile ferme	Argile très ferme					
E	15	20	30	40	60	80	100	200
C	43	100	100	110	120	130	140	200
φ	18	18	19	20	25	27	30	40
K_h (MPa)	11.667	16.3	25.8	33.185	51.28	68.1567	84.85	160
T_{fix}/T	0.83	0.863	0.90333	0.93	0.9498	0.9629	0.97	0.99345

Cette étude paramétrique, montre l'effet des paramètres géotechniques sur les résultats, on a utilisé la même coupe du projet, avec les mêmes données et on a changé à chaque fois le paramètre à comparer ; paramètres géotechniques : le site (nature du sol). La comparaison est présentée sur le graphe suivant :

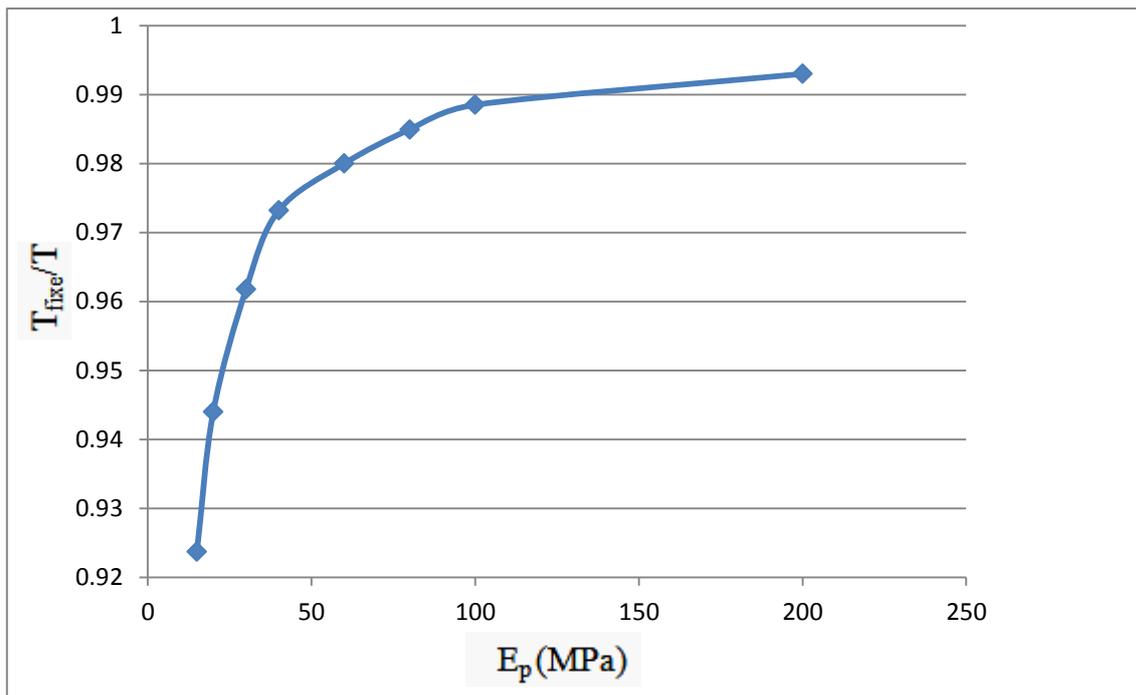


Figure 2-7: Représentation de la variation du rapport $\left(\frac{T_{fixe}}{T}\right)$ en fonction du module de Young.

Ces résultats ont été obtenus en tenant compte de la variation des paramètres de base relatifs au sol (E , ν , c , ϕ) en vue de déterminer le rapport entre la période propre du mode fondamentale, T_{fixe} , du modèle (considéré fixe à la base), et celle du même modèle (avec cette fois-ci prise en compte de l'ISS, T). Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'influence de l'interaction sol-structure sur la période propre fondamentale des structures de bâtiments.

L'étude numérique a été conduite en considérant différents module de Young dans le sol; cela a permis d'analyser l'effet de l'ISS sur la fréquence fondamentale de la réponse de la structure. L'effet d'ISS constaté est l'allongement de la période fondamentale de la structure par rapport à la valeur obtenue dans le cas de la structure à base encastree, cet effet est exprimé par l'augmentation du rapport $\left(\frac{T_{fixe}}{T}\right)$ lorsqu'on fait augmenter le coefficient de compression du sol.

La figure ci-dessus montre les valeurs du rapport $\left(\frac{T_{fixe}}{T}\right)$ obtenues en fonction du module de Young associé aux différentes catégories du site.

L'analyse de l'influence de l'interaction sol-structure (ISS) sur la période fondamentale des bâtiments, exécutée pour différents conditions de sol, a prouvé que cette influence dépend principalement de la rigidité relative sol-structure.

Considérer la déformabilité du sol dans l'analyse a un effet sur la période fondamentale de la structure: la période fondamentale de l'ensemble (structure + sol) est supérieure à la période fondamentale de la structure considérée parfaitement encastree.

CHAPITRE

III

CHAPITRE 3 : étude d'un tunnel

3.1. INTRODUCTION : [2]

Tous les ouvrages de génie civil sont en contact avec des sols ou des roches, cet effet d'interaction peut être localisé, dans les fondations de bâtiment ou d'ouvrage d'art. Cette interaction est plus complexe dans les soutènements, et totale dans le cas des tunnels.

Les conditions géologiques et hydrogéologiques sont les facteurs déterminants du degré de difficulté et du coût de réalisation d'un ouvrage souterrain. Ainsi les ouvrages souterrains exigent que l'on attache une grande importance à la reconnaissance du sous-sol en raison des interactions très fortes qui existent entre :

- La géologie et les caractéristiques géotechniques du site d'une part,
- La conception et la définition de l'ouvrage à construire, le choix et la mise en œuvre des méthodes de construction d'autre part

Le fonctionnement du soutènement (son niveau de chargement, notamment) dépend de sa géométrie (forme, épaisseur), de ses caractéristiques mécaniques (résistance, déformabilité, évolution dans le temps, comportement d'interface avec le massif), des interactions entre les éléments qui le composent (joints, interaction entre des voussoirs ou avec des renforcement), de sa vitesse de mise en place et de ses conditions d'utilisation (effets thermiques, surcharges, interactions diverses avec l'environnement). Le mode d'interaction sol-soutènement-revêtement conditionne la loi de transmission des efforts normaux et tangentiels le long de la surface de contact. La rigidité du soutènement a notamment une influence importante sur leur intensité. En fonction du chargement transmis au soutènement, quatre modes de fonctionnement peuvent être distingués [7] :

- Travail en compression ;
- Travail en flexion ;
- Travail en membrane ;
- Poinçonnement.

Les modes les plus courants sont les fonctionnements en compression et en flexion. Les types de rupture sont essentiellement l'écrasement, le poinçonnement et la fissuration (pour le béton projeté). Au niveau de la modélisation, trois hypothèses différentes peuvent être faites concernant la nature du contact entre le sol et un soutènement (contact longitudinal pour le béton projeté, contact radial pour des boulons ou des cintres) :

- Continuité complète du soutènement (ou du revêtement) et du massif ;

- Glissement avec frottement ou glissement parfait, sans décollement du massif par rapport au soutènement ;
- Glissement avec frottement ou glissement parfait, et décollement du massif par rapport au soutènement.

Le choix est fait en fonction du problème traité (nature du terrain et du soutènement) et surtout de la connaissance de l'interaction. Si cette connaissance n'est pas disponible, il est d'usage de considérer les deux cas extrêmes : l'état collé (continuité parfaite) et l'état de glissement parfait avec possibilité de décollement. Chacune de ces hypothèses peut avoir une influence importante sur les résultats, car les contraintes et les déformations du soutènement dépendent surtout du mode de construction adopté.

Bien que les conditions de calcul soient plus faciles dans le cas de l'adhérence parfaite, cette hypothèse correspond très rarement à la réalité du contact entre le soutènement et le massif de sol ou de roche. Le frottement est en général représenté par le critère de Coulomb, caractérisé par une cohésion et un angle de frottement.

3.2. LES METHODES USUELLES DE DIMENSIONNEMENT D'UN TUNNEL : [7]

Il n'est pas possible de fixer des règles immuables pour choisir une méthode de dimensionnement dans chaque cas. Aucune méthode ne peut rendre compte de la totalité des facteurs qui interviennent dans l'équilibre d'un ouvrage souterrain et de son revêtement. Suivant leur degré de complexité, elles sont capables de prendre en considération un plus ou moins grand nombre de paramètres. Les plus sophistiquées sont aussi celles dont l'utilisation est la plus onéreuse.

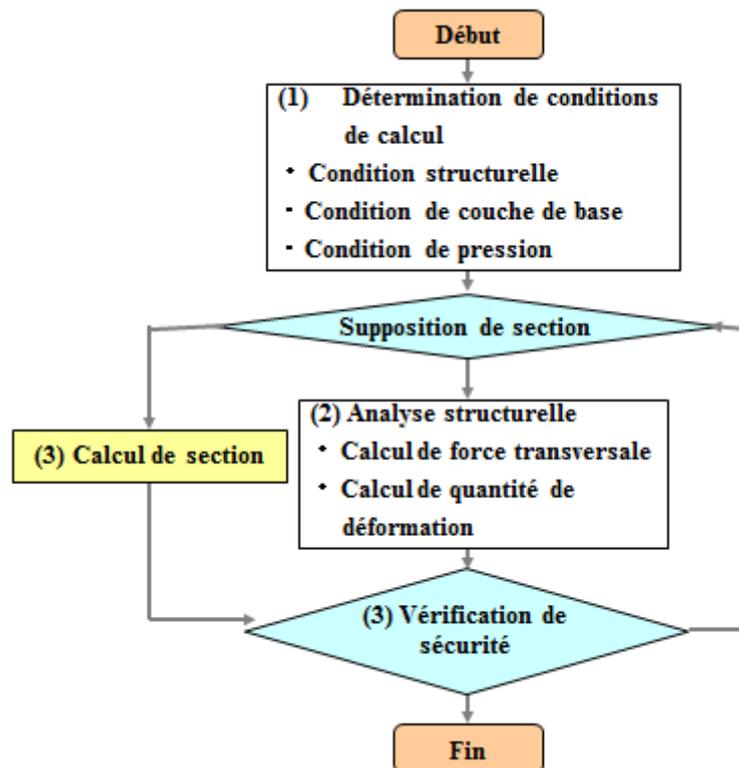


Figure 3-1 : Schéma de principe de méthode de conception de tunnel. [7]

Certaines méthodes simplifiées, donc plus économiques, sont souvent admissibles, mais leur domaine d'utilisation est obligatoirement plus restreint puisqu'il faut que les simplifications ne concernent pas l'un des paramètres qui se trouve être prépondérant dans le cas étudié.

Dans cet esprit, il est possible de citer quelques méthodes.

3.2.1. Approche empirique :

Des méthodes basées sur le collationnement de résultats obtenus sur un nombre important de chantiers variés, permettent, en partant de paramètres simples, de définir un soutènement en principe approprié. Ces méthodes concernent généralement le seul soutènement provisoire.

Les paramètres choisis peuvent être globaux et tirés eux-mêmes d'une expérimentation *in situ* comme la durée de stabilité d'une excavation non soutenue. Ils peuvent aussi être plus détaillés et tirés d'essais ou de mesures de laboratoire (fracturation, résistance au cisaillement, contraintes, comportement hydraulique).

3.2.2. Les méthodes d'analyse et de calcul :

On peut distinguer les méthodes de calcul suivantes :

➤ **Méthode des actions et des réactions (ou des réactions hyperstatiques) :**

Les déformations du revêtement sont calculées par les méthodes classiques de la résistance des matériaux, en l'assimilant à un portique, un arc, une coque ou une structure à barres.

Les déformations du terrain sont estimées à partir de la notion schématique du module de réaction, c'est-à-dire que l'on suppose que la réaction en un point est uniquement fonction de la déformation en ce point et lui est proportionnelle.

➤ **Méthode du solide composite :**

Dans ce type de méthodes, on utilise un modèle mathématique dans lequel le terrain et le revêtement de l'ouvrage, considérés comme constituant ensemble un solide composite, avec des comportements mécaniques différents, sont représentés par des mailles (ou des volumes) élémentaires liés les uns aux autres en fonction de lois qui traduisent ce comportement.

On fait l'hypothèse que les déformations aux frontières du modèle sont nulles, mais cette hypothèse n'est pas pénalisante si le modèle est assez étendu. La méthode la plus courante utilisée est celle des éléments finis.

➤ **La méthode convergence-confinement [3]:**

Cette méthode peut fournir des résultats de pré-dimensionnement intéressants, en tenant compte d'un comportement élasto-plastique du terrain. La principale difficulté réside dans l'estimation de l'allure de l'évolution du déconfinement, qui se révèle être un paramètre à la fois très important, mais difficile à estimer.

La méthode a été développée dans le cas d'un tunnel profond de section circulaire, creusé dans un massif dont le comportement est homogène et isotrope, soumis au champ de contrainte géostatique.

Le creusement est considéré à grande profondeur de sorte que l'on peut négliger le gradient de la pesanteur. Enfin, le soutènement du tunnel, posé à une distance constante du front de taille, est également considéré comme ayant un comportement homogène et isotrope. Avec ces hypothèses, le problème admet une symétrie cylindrique, ou axisymétrique.

La méthode de convergence-confinement s'intéresse au dimensionnement des tunnels soutenus. C'est une méthode de dimensionnement de tunnels simple pour tenir compte des conditions de mise en œuvre du soutènement derrière le front de taille au prix d'une simplification des

lois de comportement et d'une homogénéisation d'un certain nombre de zones du massif. Elle permet d'analyser l'interaction entre le massif et le soutènement.

Elle conduit à un pré dimensionnement satisfaisant du soutènement et elle oriente au stade de l'avant-projet, le choix des caractéristiques de soutènement et donne l'ordre de grandeur des déformations à attendre.

Par rapport à d'autres domaines de la géotechniques, tels que ; les fondations ou les ouvrages de soutènement, ou les calculs à la rupture qui ont connu depuis longtemps un large développement, les tunnels et ouvrages souterrains constituent un champ d'application privilégié de la méthode des éléments finis (M.E.F.), car elle permet d'appréhender au moins deux aspects essentiels de cette spécialité, et qui ne sont pris en considération dans les calculs à la rupture :

- Les phénomènes d'interaction entre les terrains encaissant et les structures (soutènement et revêtement du tunnel, ouvrages voisins existants).
- Les déformations induites par les excavations.

L'interaction entre le terrain et le revêtement se traduit différemment le long du périmètre d'une section. En effet, dans certaines zones, le terrain exerce des poussées radiales voire tangentielles sur le revêtement ; dans d'autres zones, c'est l'inverse, en fonction de la déformation relative terrain/revêtement et de l'état de plasticité du terrain.

De ce fait, l'étude de l'équilibre à long terme du tunnel revêtu suscite un intérêt important. D'un point de vue mécanique, il s'agit d'un problème d'interaction complexe entre deux structures de comportement très différent : le massif avec la cavité d'une part, le soutènement d'autre part.

3.3. TUNNELS SOUTENUS

De façon générale, le problème du tunnel soutenu a deux particularités importantes : il est essentiellement tridimensionnel, à proximité du front de taille les champs de déplacement et de contrainte sont complexes ; d'autre part, c'est un problème couplé, car il s'agit d'étudier l'interaction entre le soutènement d'une part et le massif percé du tunnel d'autre part. L'application de concepts simples empruntés à la méthode de convergence-confinement permet de découpler le problème et de l'étudier en condition de déformations planes.

En effet, la construction d'un tunnel avec ses phases de creusement, de pose de revêtement est un problème tridimensionnel qui traduit un couplage fort entre deux structures de comportement très différent : le massif d'une part, le revêtement d'autre part.

Pour traiter ce problème complexe d'interaction, les méthodes numériques par éléments finis permettent souvent une modélisation plus fine et plus proche du phénomène réel de phasage de creusement. Par ailleurs, les méthodes de type 2D axisymétrique (Ranken et Ghaboussi, 1975; Corbetta, 1990 ; Bemaud, 1991) ou 3D (Hanafy et Emery, 1982 ; Pan et Hudson, 1989) sont celles qui simulent le creusement et la pose du soutènement de la façon la plus réaliste. Etant donné la complexité du problème, les méthodes approchées qui permettent de simplifier les calculs restent toujours souhaitables, à condition bien entendu qu'elles donnent des résultats acceptables et qu'elles soient validées grâce à une confrontation avec des solutions exactes.

Quant aux méthodes de calcul utilisées dans ce travail, il est à noter que les résultats obtenus par un programme « cadre.for* » sont très rigoureux, car ce dernier ne fait pas d'approximation sur le sol mais tient réellement compte des caractéristiques de résistance mécanique et de l'interaction sol-structure.

La modélisation par le biais du programme « cadre.for » nous permet le calcul et la détermination des différents efforts et sollicitations selon des méthodes d'analyses qui prennent en considération l'interaction sol-structure, principe incontournable en ce qui concerne les ouvrages souterrains.

3.4. LES CHARGES AGISSANTES SUR LES TUNNELS

Les principales charges agissant sur les constructions souterraines proviennent de la poussée des couches constituant le terrain, c'est à dire la poussée géologique (appelée aussi poussée du souterrain) et la pression hydrostatique.

Le calcul des sollicitations d'un ouvrage souterrain dépend de l'état de contrainte géostatique du massif, c'est à dire l'état de contrainte existant avant le creusement du tunnel. Cet état de contrainte étant supposé connu, par les méthodes de calcul de ces ouvrages souterrains.

Ainsi, vu la complexité du problème de détermination des actions agissant sur des ouvrages, certaines hypothèses simplificatrices ont été émises :

- Le terrain est supposé homogène, élastique et isotrope,
- La déformation est bidirectionnelle,
- Les actions extérieures considérées sont dues au poids des terres sus-jacentes.

* Programme élaboré dans le langage FORTRAN.

Ces actions extérieures se définissent en contraintes verticales agissant sur la calotte engendrant des poussées latérales sur les flancs du tunnel.

3.5. PARTIE CALCUL

Cette application concerne un tronçon du tunnel de Hai El Badr-Badjarah. Ce tunnel est implanté dans les marnes jaunâtres, sa profondeur moyenne est de 11m et son rayon d'excavation est de 5,1m. Les sondages mettent en évidence la présence d'eau dans le terrain en question, ces derniers démontrent que l'eau existante ne constitue pas une nappe phréatique continue, mais elle est sous forme de poches dans les fractures suite aux ruissellements des eaux pluviales.

Les calculs seront faits selon la coupe suivante :

- Marne jaunâtre : 2.5 mètres au-dessus de la clé de voute
- Une couverture de terre égale à 11 mètres

Le profil de sol est présenté sur la figure suivante :

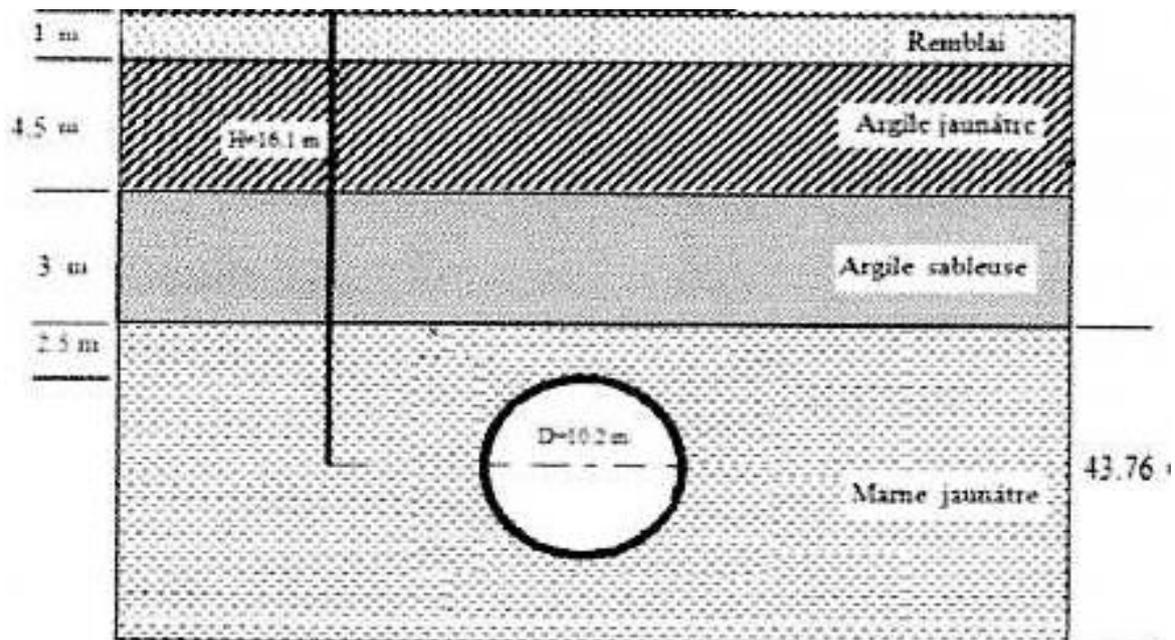


Figure 3-2 : Profil du sol.

Les caractéristiques géotechniques des couches sont données dans le tableau suivant :

Tableau 3. 5 : Caractéristiques géotechniques des couches constituant le terrain.

Couches	Remblai	Argile jaunâtre	Argile sableuse	Marne jaunâtre
Caractéristiques				
Module de Young E (MPa)	7,8	30	30	25
Coefficient de poisson (ν)	0.3	0.3	0.3	0.3
Poids de la couche γ (KN/m ³)	18	20	20	20
Hauteur de la couche h(m)	1	4.5	3	43.76
Cohésion du terrain C (KN/m ²)	0	30	30	30
Angle de frottement interne Φ	25	25	25	24

L'étude porte sur une section transversale du tunnel, les deux appuis sont supposés élastiques. Le modèle adopté pour prendre l'interaction du tunnel avec le sol est la modélisation par des ressorts (K_V, K_H, K_θ).

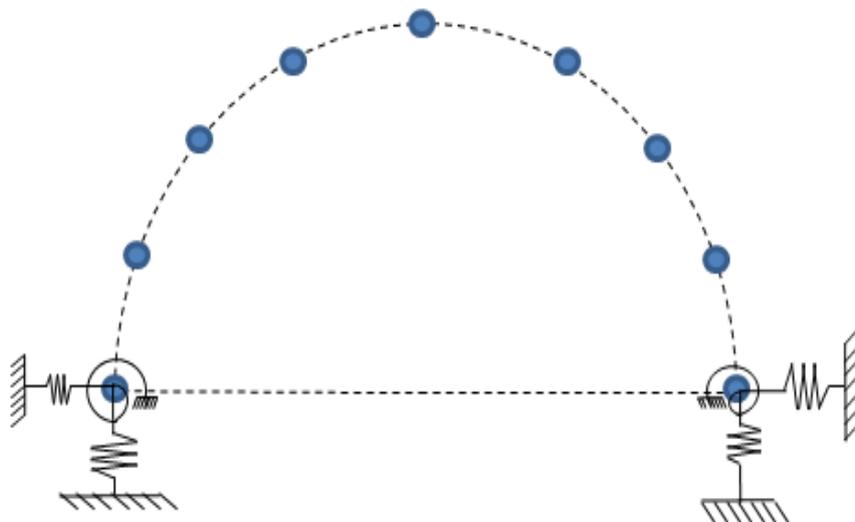


Figure 3-3 : Modélisation de l'interaction sol structure (tunnel).

La contrainte verticale est donnée par :

$$\sigma_0 = \sum \gamma_i h_i$$

$$\sigma_0 = 18 * 1 + 20 * (45 + 3 + 7.6) = 50 \text{KN/m}^2$$

$$\sigma_0 = 0.05 \text{MPa}$$

Pour pouvoir comparer avec les résultats obtenus par la méthode convergence-confinement [mémoire de PFE de TCHATCHI Belkacem et KADEM Ahmed : Modélisation par éléments finis Q4 d'une section transversale complète de tunnels creusés dans les massifs multicouches] (ne tenant pas compte de l'interaction sol-structure), on doit procéder à l'homogénéisation des couches deux à deux. Puis on calcule et on corrige la moyenne des valeurs trouvées de E.

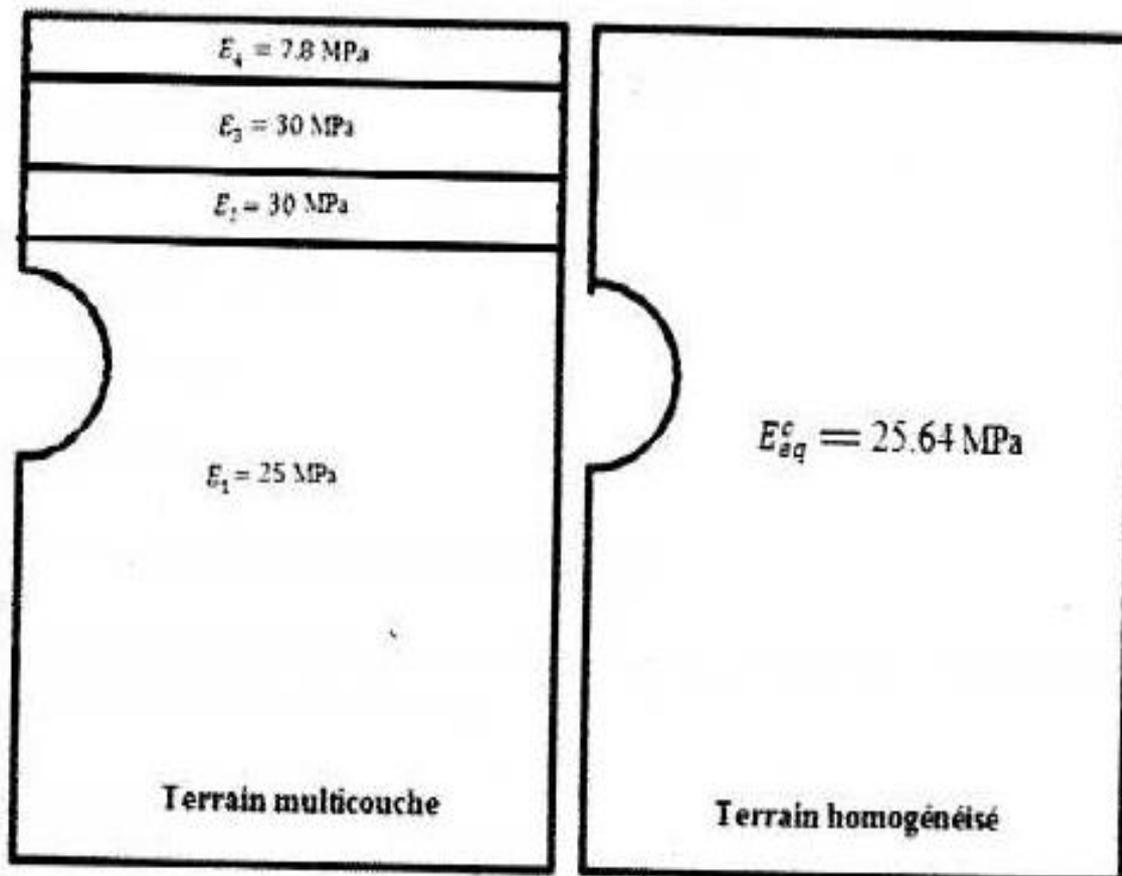


Figure 3-4 : Le profil du sol homogénéisé.

Calcul des modules de Young moyens :

- Homogénéisation de la couche d'argile sableuse et la moitié de la couche marne jaunâtre :

$$E_1^{moy} = \frac{E_1 * h_1 + 0.5 * E_2 * h_2}{h_1 + 0.5 * h_2} = \frac{25 * 43.76 + 0.5 * 30 * 3}{43.76 + 0.5 * 3} = 25.16MPa$$

- Homogénéisation de la moitié de la couche de marne jaunâtre et la moitié de la couche d'argile sableuse:

$$E_2^{moy} = \frac{E_2 * h_2 + E_3 h_3}{h_2 + h_3} = \frac{30 * 3 + 30 * 4.5}{3 + 4.5} = 30MPa$$

- Homogénéisation de la moitié de la couche de marne jaunâtre et la couche de remblai :

$$E_3^{moy} = \frac{0.5 * E_3 * h_3 + E_4 * h_4}{0.5 * h_3 + h_4} = \frac{0.5 * 30 * 4.5 + 7.8 * 1}{0.5 * 4.5 + 1} = 23.17MPa$$

- Le module de Young équivalent corrigé est :

$$E_{eq} = \frac{\sum E_i^{moy}}{n - 1} = \frac{25.16 + 30 + 23.17}{3} = 26.11MPa$$

- Le module de Young équivalent corrigé est :

$$E_{eq}^c = E_{eq} \left(1 + \frac{E_1 - E_{eq}}{\sum E_i} \right) = 26.11 * \left(1 + \frac{25 - 26.11}{25 + 30 + 30 + 7.8} \right) = 25.64MPa$$

$$G = \frac{E}{2 * (1 - \nu)} = \frac{25.64}{2 * (1 - 0.3)} = 18.31MPa$$

L'étude est réalisée par le programme « cadre.for » pour une analyse statique de l'effet de l'interaction sol structure. Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

3.6. RESULTATS ET CONCLUSION :

La section transversale du tunnel étudiée est discrétisée en neuf (09) nœuds comme suit :

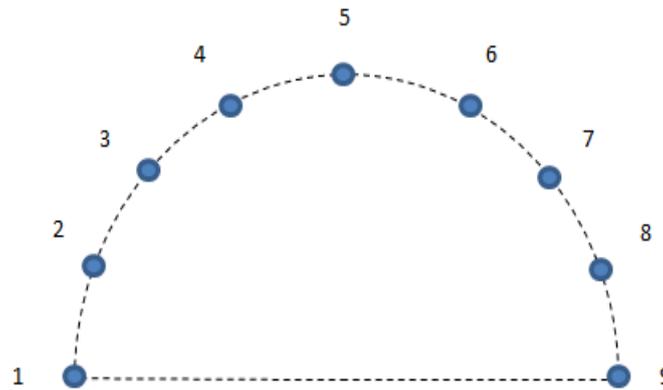


Figure 3-5 : Représentation de la section discrétisée en neuf (09) nœuds.

Reliés par huit (08) éléments barres numérotées comme suit :

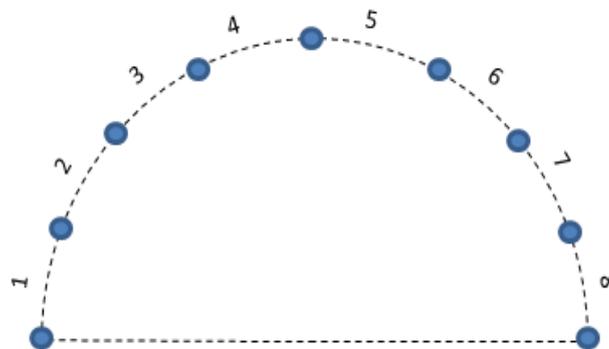


Figure 3-6 : Représentation de la section discrétisée en huit (08) membrures.

➤ Avec ISS :

DEPLACEMENT DES NŒUDS

Tableau 3. 6 : Déplacement des nœuds.

NO.NOEUD	DEPL.X (mm)	DEPL.Y (mm)	ROTA.Z
1	0.093	7.272	0.000044
2	-7.779	12.566	0.012175
3	-49.161	44.523	0.04314
4	-76	108.178	0.005288
5	-47.87	40.694	-0.044831
6	-54.468	-9.882	-0.009078
7	-48.631	-7.685	0.012021
8	20.414	6.853	0.016363
9	-0.093	7.205	-0.000014

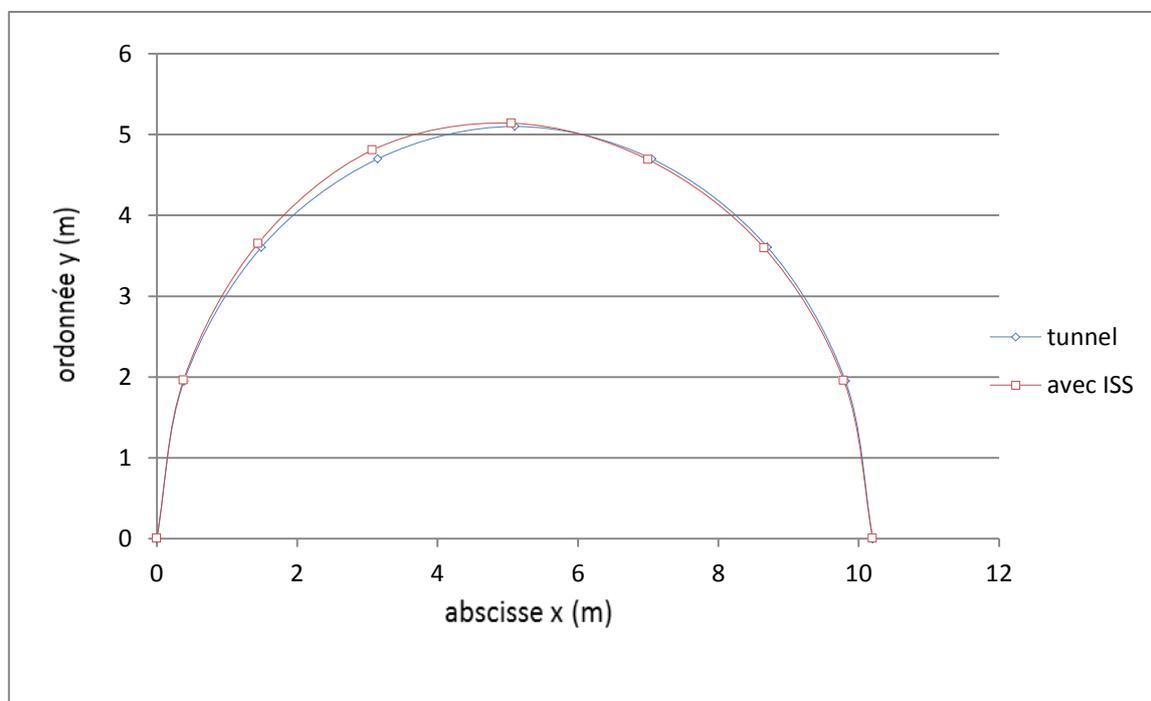
Tableau 3. 7 : Efforts résultants.

NO.MEMB	Extrémité « i »			Extrémité « j »		
	FX	FY	MZ	FX	FY	MZ
1	-252.134	-45.538	-17.236	252.134	-53.874	25.523
2	-253.648	-46.222	-25.523	253.648	-53.236	32.498
3	-245.179	-84.017	-32.498	245.179	-7.899	-37.467
4	-244.703	-17.180	37.467	244.703	-86.506	34.415
5	-254.021	-53.259	-34.415	254.021	-46.353	27.536
6	-252.897	-52.136	-27.536	252.897	-46.781	22.239
7	-251.501	-53.786	-22.239	251.501	-45.944	14.418
8	-249.828	-54.306	-14.418	249.828	-45.107	5.273

REACTIONS AUX SUPPORTS

Tableau 3. 8 : Réactions aux supports.

NO.NOEUD	REACT.X	REACT.Y	MOMEN.Z	DEPL.X	DEPL.Y	ROTA.Z
1	-4.541	-256.173	-17.236	0.093	7.272	0.000044
9	4.541	-253.827	5.273	-0.093	7.205	-0.000014

**Figure 3-7 : Représentation graphique du tunnel avant et après déformation (avec ISS).**

➤ Sans ISS :

DEPLACEMENT DES NŒUDS

Tableau 3.1: Déplacements des noeuds.

NO.NOEUD	DEPL.X (mm)	DEPL.Y (mm)	ROTA.Z (rad)
1	0	0.002	0
2	-7.803	5.282	0.012148
3	-49.155	37.220	0.04313
4	-75.992	100.869	0.005291
5	-47.866	33.401	-0.044818
6	-54.866	-17.144	-0.009059
7	-48.6	-14.915	0.01204
8	-20.352	-0.356	0.016381
9	0	0.002	0

Tableau 3.6 : Efforts résultants.

NO.MEMB	Extrémité « i »			Extrémité « j »		
	FX (KN)	FY (KN)	MZ (KN.m)	FX (KN)	FY (KN)	MZ (KN.m)
1	-252.135	-45.538	-17.243	252.135	-53.873	25.53
2	-253.649	-46.223	-25.53	253.649	-53.235	32.504
3	-245.179	-84.018	-32.504	245.179	-7.898	-37.462
4	-244.704	-17.18	37.462	244.704	-86.505	34.418
5	-254.021	-53.26	-34.418	254.021	-46.352	27.537
6	-252.897	-52.137	-27.537	252.897	-46.78	22.239
7	-251.5	-53.786	-22.239	251.5	-45.943	14.416
8	-249.827	-54.307	-14.416	249.827	-45.107	5.271

REACTIONS AUX SUPPORTS

Tableau 3.72 : Réactions aux appuis.

NO.NOEUD	REACT.X (KN)	REACT.Y (KN)	MOMEN.Z (KN.m)	DEPL.X (mm)	DEPL.Y (mm)	ROTA.Z (rad)
1	-4.541	-256.174	-17.243	0	0.002	0

9	4.541	-253.826	5.271	0	0.002	0
---	-------	----------	-------	---	-------	---

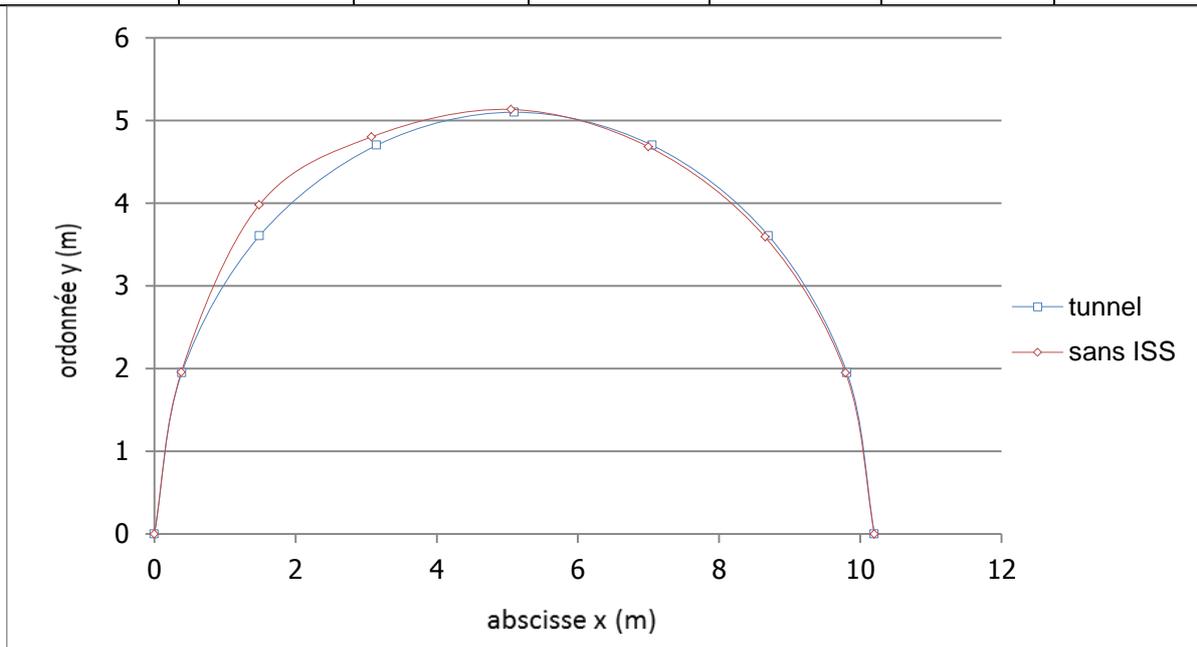


Figure 3-8: Représentation graphique du tunnel avant et après déformation (sans ISS).

Conclusion :

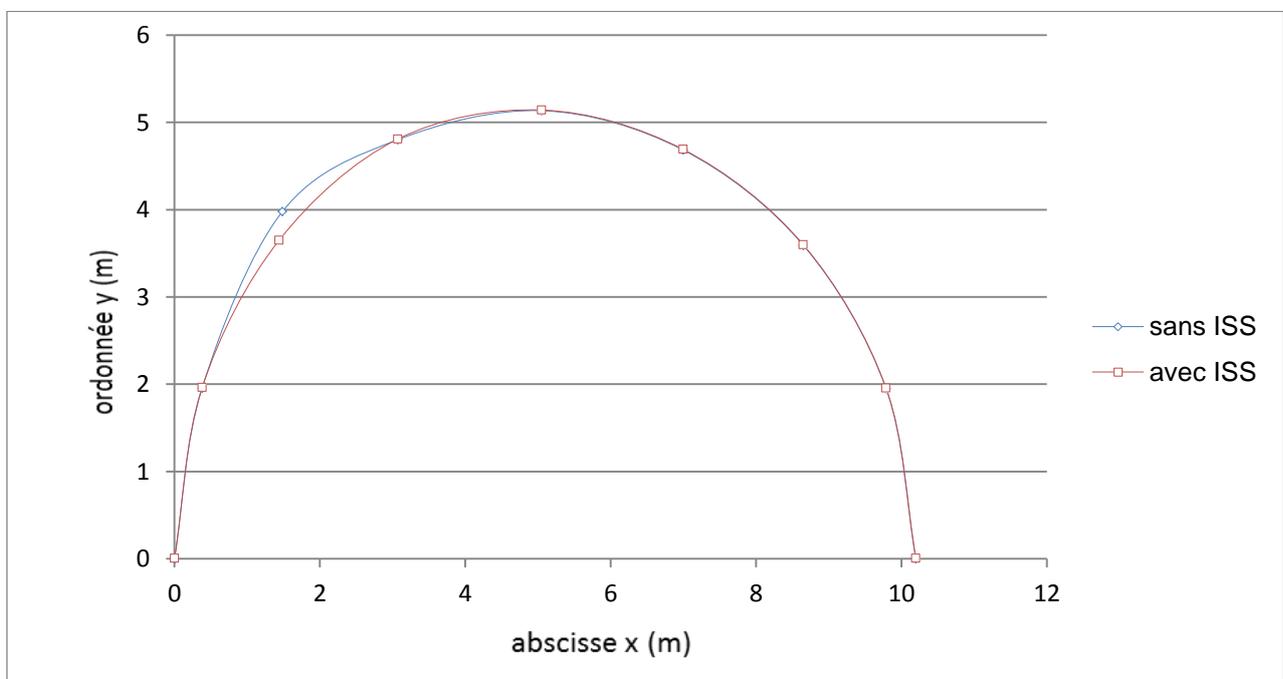


Figure 3-9 : Représentation graphique du tunnel après déformation (sans et avec ISS).

La prise en compte et l'influence des paramètres géotechniques a pu être évaluée, permettant alors de tirer des enseignements utiles à la conception et au dimensionnement des structures.

Le comportement du sol et de la structure étant supposé de type élastique, l'équilibre de la structure est influencé par les propriétés élastiques du sol, le mode de construction et le comportement de la structure.

L'étude de tels systèmes n'est possible que par une analyse couplée sol structure.

Le dimensionnement de la structure consiste alors à choisir une rigidité suffisamment faible pour limiter les sollicitations dans la structure. Des effets néfastes peuvent néanmoins devenir déterminants si la structure est très élancée et qu'elle doit subir des déplacements très importants.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire vise à déterminer l'influence de l'interaction sol-structure d'une part sur la fréquence fondamentale d'un bâtiment, à usage d'habitation, selon une étude paramétrique faisant varier les sites d'implantation et d'autre part sur la réponse d'un tunnel en termes de déplacement et efforts sous chargement sismique.

Le terme « interaction sol-structure » est utilisé pour caractériser les situations où le comportement d'une structure ne peut pas être évalué de façon précise sans considérer l'interaction sol-structure.

Les résultats ont montré que la période fondamentale de l'ensemble (structure-sol) est supérieure à la période fondamentale de la structure considérée parfaitement encastree. Comme une augmentation de T correspond aussi à une augmentation des déplacements de la structure par rapport au sol, certains règlements parasismiques impose de considérer l'interaction sol – structure dans certains cas.

Toutefois, on voit que l'interaction sol structure peut être négligée dans l'analyse des bâtiments courants construits sur des sols de qualité normale. Ce qui explique que les codes autorisent, sous certaines conditions, une évaluation de la réponse sismique des structures négligeant l'interaction sol – structure

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **A. CAPRA, V. DAVIDOVICI** ; Calcul dynamique des structures en zone sismique ; Collection U.T.I. ; Editions Eyrolles ; PARIS; 1982.
- [2] **PECKER** ; Dynamique des structures et des ouvrages ; 2006
- [3] **A. LAHMADI** ; Étude paramétrique de l'interaction entre ouvrages : tunnel – bâtiment – excavation ; Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de Magister ; Université El Hadj Lahkdar Batna ; 2006.
- [4] **G. GAZETAS**; Foundation engineering handbook, chapter 15:“foundation vibrations”; 2nd; Edited by HSAI-YANG FANG ; Edition Chapman & Hall; New York; 1991.
- [5] **J. P. MAGNAN** ; Géotechnique 1ère année ; tome 2 ; Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat ; 1997.
- [6] Règlement Parasismique Algérien ; V2003 RPA2003.
- [7] **P. MESTAT et M. Prat** ; Ouvrages en interaction ; HERMES Science ; Publications, 1999.

ANNEXE :

Les formules utilisées pour le calcul des raideurs du sol [4].

La raideur du sol peut être calculée par différentes formules. Dans ce travail on a choisis de travailler avec les formules de GAZETAS, 1991.

Pour calculer les raideurs du sol, GAZETAS a pris en compte 3 paramètres :

- La forme de la fondation : circulaire, filante, rectangulaire ou de forme arbitraire.
- Le type de sol : demi-espace élastique, sol multicouche profond, couche de sol sur un substratum rocheux.
- L'encrage des fondations : fondation superficielle, fondation encrée à petite profondeur D , fondation profonde (pieux).

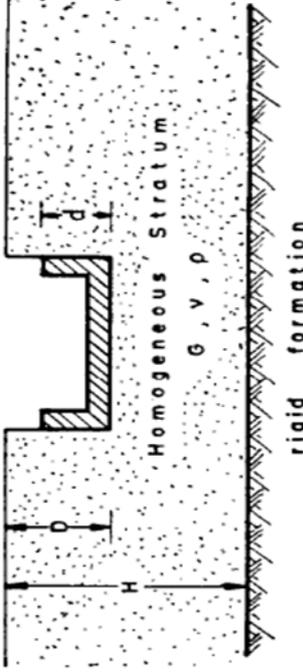
GAZETAS a résumé ces travaux dans six (6) tableaux :

- 1- Les fondations de forme arbitraire reposant à la surface d'un demi-espace élastique et homogène.
- 2- Les fondations partiellement ou totalement enterrées dans un demi-espace élastique et homogène.
- 3- Fondations circulaires et filantes reposant à la surface d'un sol homogène sur un substratum rocheux.
- 4- Fondations circulaires et filantes partiellement ou totalement enterrées dans un sol homogène sur un substratum rocheux.
- 5- Fondations carrées à la surface d'un sol non-homogène.
- 6- Pieux traversant deux sols non homogènes et un sol homogène ou un demi-espace élastique.

Dans cette étude on a travaillé avec des fondations filantes du groupe 4 dont les formules sont données par les tableaux (A.2) et (A.3).

Pour les valeurs de E et ν présentées sont dépendants de la classification des sites qui est données dans le (tableau 3.1 : classification RPA 2003).

Tableau A.1 : Fonctions d'impédance de fondations enterrées dans un sol homogène sur substratum rocheux.

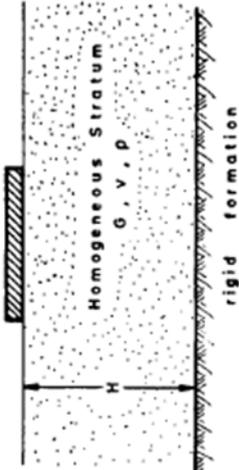


Foundation Shape		Circular Foundation of Radius R	Strip Foundation
Static stiffnesses, K	Vertical	$K_{z,emb} \approx K_{z,sur} \left(1 + 0.55 \frac{d}{R} \right) \left[1 + \left(0.85 - 0.28 \frac{D}{R} \right) \frac{D}{H-D} \right]^{\dagger}$	$K_{z,emb} \approx K_{z,sur} \left[1 + 0.2 \left(\frac{d}{B} \right)^{2/3} \right] \left(1 + 3.5 \frac{B}{H-D} \right)$
	Horizontal, y or x	$K_{y,emb} \approx K_{y,sur} \left(1 + \frac{d}{R} \right) \left(1 + 1.25 \frac{D}{H} \right)^{\dagger}$	$K_{y,emb} \approx K_{y,sur} \left(1 + 0.5 \frac{d}{B} \right) \left(1 + 1.5 \frac{D}{H} \right)$
	Rocking, rx or ry	$K_{rx,emb} \approx K_{rx,sur} \left(1 + 2 \frac{d}{R} \right) \left(1 + 0.65 \frac{D}{H} \right)$	$K_{rx,emb} \approx K_{rx,sur} \left(1 + \frac{d}{B} \right) \left(1 + 0.65 \frac{D}{H} \right)$
	Coupled swaying-rocking	$K_{yrx,emb} \approx \frac{1}{3} d K_{y,emb}$	$K_{yrx,emb} \approx \frac{1}{3} d K_{y,emb}$
	Torsional	$K_{t,emb} \approx K_{t,sur} \left(1 + 2.67 \frac{d}{R} \right)$	—
Dynamic stiffness coefficients, $k(\omega)$	The relationships between K_{emb} and K_{sur} follow approximately the same pattern as those between embedded and surface foundation on a homogeneous halfspace. Therefore, use the results of Table 15.2 as a first approximation.		
Radiation dashpot coefficients, $C(\omega)$	C_{emb} exceeds C_{sur} by an amount that depends on the geometry of the sidewall-soil contact surface and is practically independent of the presence or absence of a rigid base at shallow depths. Therefore, use the results of Table 15.2, but with C_{sur} corresponding to the layered profile and thus obtained according to Table 15.3 (approximate guideline).		

* Sources are listed in the text.

† $K_{z,sur}, K_{y,sur}, \dots$ are the stiffnesses for the corresponding surface foundations, and can be obtained from Table 15.3.

Tableau A.2 : Fonctions d'impédance de fondations à la surface d'un sol homogène sur substratum rocheux.



Foundation Shape		Circular Foundation of Radius $B = R$	Rectangular Foundation 2B by 2L ($L > B$)	Strip Foundation $2L \rightarrow \infty$
Static stiffnesses, K	Vertical, z	$K_z = \frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.3 \frac{R}{H} \right)$	$K_z = \frac{2GL}{1-\nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{3/4} \right] \left(1 + \frac{\frac{B}{H}}{0.5 + \frac{B}{L}} \right)$	$K_z \approx \frac{0.73G}{1-\nu} \left(1 + 3.5 \frac{B}{H} \right)$
	Lateral, y	$K_y = \frac{8GR}{2-\nu} \left(1 + 0.5 \frac{R}{H} \right)$	•	$K_y \approx \frac{2G}{2-\nu} \left(1 + 2 \frac{B}{H} \right)$
	Lateral, x	$K_x = K_y$	•	—
	Rocking, rx	$K_{rx} = \frac{8GR}{3(1-\nu)} \left(1 + 0.17 \frac{R}{H} \right)$	•	$K_{rx} = \frac{\pi GB^2}{2(1-\nu)} \left(1 + 0.2 \frac{B}{H} \right)$
	Rocking, ry	$K_{ry} = K_{rx}$	•	—
Torsional, t	$K_t = \frac{16}{3} GR^3 \left(1 + 0.10 \frac{R}{H} \right)$	•	—	
Dynamic stiffness coefficients, $k(\omega)$	Vertical, z	$k_z = k_z(H/R, a_0)$ is obtained from Graph III-1	$k_z = k_z(H/B, L/B, a_0)$ is plotted in Graph III-2 for rectangles and strip	
	Horizontal, y or x	$k_y = k_y(H/R, a_0)$ is obtained from Graph III-1		$k_y = k_y(H/B, a_0)$ is obtained from Graph III-3
	Rocking, rx or ry	$k_{rx}(H/R) \approx k_{rx}(\infty)$ $\alpha = rx, ry, t$		$k_{rx}(H/R) \approx k_{rx}(\infty)$
Radiation dashpot coefficients, $C(\omega)$	Vertical, z	$C_z(H/B) \approx 0$ at frequencies $f < f_c$, regardless of foundation shape $C_z(H/B) \approx 0.8C_z(\infty)$ at $f \geq 1.5f_c$ At intermediate frequencies: interpolate linearly. $f_c = \frac{V_{Lz}}{4H}$. $V_{Lz} = \frac{3.4V_s}{\pi(1-\nu)}$		
	Lateral, y or x	$C_y(H/B) \approx 0$ at $f < 3f_c$; $C_y(H/B) \approx C_y(\infty)$ at $f > \frac{3}{2}f_c$ At intermediate frequencies: interpolate linearly. $f_c = V_s/4H$. Similarly for C_x		
	Rocking, rx or ry	$C_{rx}(H/B) \approx 0$ at $f < f_c$; $C_{rx}(H/B) \approx C_{rx}(\infty)$ at $f > f_c$. Similarly for C_{ry}		
Torsional, t	$C_t(H/B) \approx C_t(\infty)$			