

12/91

84

وزارة الجامعات
Ministère aux Universités

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT: GENIE CIVIL

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

CONTRIBUTION A L'ANALYSE
ET AU CALCUL DES PIEUX ISOLÉS

Proposé par :

Etudié par :

Dirigé par :

L.T.P.C.

NOURAI Nawel Mounia

A. BOUDJENOUN

PROMOTION

JUIN 1991

وزارة الجامعات
Ministère aux Universités

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT: GENIE CIVIL



PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

CONTRIBUTION A L'ANALYSE
ET AU CALCUL DES PIEUX ISOLES

Proposé par :

L.T.P.C.

Etudié par :

NOURAI Nawel Mounia

Dirigé par :

A. BOUDJENOUN

PROMOTION

JUIN 1991

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

*A la mémoire de "Mani",
A mes parents,
A ma tante Fatiha,
A mon oncle Mohamed.*

Nawel

REMERCIEMENTS



— Je remercie vivement mon promoteur, M. A. Boudjennoun, dont la présence permanente à mes côtés a été très bénéfique.

— Je remercie également MM. Belkacemi et Berrah pour leur collaboration continuelle, ainsi que tous les membres du Centre de calcul du Laboratoire des Travaux Publics du Centre (L.T.P.C).

— Je remercie enfin M. Dahmar qui a apporté son aide et sa contribution à la rédaction et à la composition de ce mémoire.

RESUME



Le présent travail a trait à l'analyse du comportement et au calcul d'un pieu isolé soumis à un chargement axial et/ou latéral. Il s'articule sur trois volets.

Le premier consiste en l'analyse du comportement du pieu sous charge axiale puis latérale.

Pour le chargement axial, on examine les différents modes de rupture grâce auxquels on a pu analyser l'influence du sol environnant sur le comportement du pieu (influence du frottement latéral).

Pour le chargement latéral, on analyse le comportement du pieu en considérant celui du sol élastique.

Quant au deuxième volet, il est consacré à l'élaboration d'un programme de calcul de pieu sur la base de la méthode de Joseph. E. Bowles.

Le troisième volet a pour finalité la validation des résultats obtenus par le programme suscité à travers une série de comparaisons à des résultats réels.

SUMMARY

The present work deals with the study of the behavior and the analysis of an isolated pile under axial and/or lateral loading. It consists of three parts. The first one is the study of the behavior of a pile subjected to axial and lateral loading separately. For the axial loading, we study the different modes of rupture.

For the lateral loading we analyse the behavior of the pile considering an elastic behavior of the soil.

Regarding the second part, it is devoted to the development of a pile analysis computer program based on the methode of J.E. Bowles. Finally, the third part aims at validating the results given by the aforesaid program through a series of comparison to real and well established ones.

هذه المحتويات المذكورة تتعلق بتعليق تعامل وحساب وتك محمول خاضع لتأثيرات محورية وجانبية. وينقسم إلى ثلاثة أقسام. القسم الأول يتمثل في تحليل تعامل وتك تحت تأثير قوى محورية ثم جانبية. بالنسبة للتأثير المعوري، نظرنا إلى دراسة مختلف حالات التدهور التي قد تحدثها دراسة تأثير التربة المصغرة على تعامل التوك. فيما يخص القوى الجانبية فقد درست تعامل التوك بأغراض تربة لينة - القسم الثاني يتعلق بكتابة برنامج حاسوبي للاعتناء اعتمادا على منهجية جوزيف. بولس.

القسم الثالث يتمثل في مقارنة نتائج البرامج بنتائج تجريبية.

SOMMAIRE



CHAPITRE I : Introduction générale

- 1 - Introduction
- 2 - Position du problème
- 3 - Présentation du sujet et objectifs

CHAPITRE II : Généralités

- 1 - Définitions
- 2 - Classification des pieux
- 3 - Mode d'action des pieux
 - 3.1. *Eléments fondamentaux considérés*
 - 3.2. *Utilisation des pieux*
 - 3.3. *Choix du type de pieu*
 - 3.4. *Analyse des forces agissant sur le pieu*
 - 3.5. *Reconnaissance du Sol*

CHAPITRE III : Analyse du comportement des pieux isolés

I - Pieux chargés axialement

- 1 - Répartition des efforts longitudinaux dans un pieu
- 2 - Interaction sol-pieu
 - 2.1. *Introduction*
 - 2.2. *Analyse des différents modes de rupture*
 - 2.3. *Analyse du mécanisme de transfert de charges et approche théorique*

II - Pieux chargés latéralement

- 1 - Comportement du sol
- 2 - Equation d'équilibre
- 3 - Module de réaction K_s
 - 3.1. *Introduction*
 - 3.2. *Détermination de K_s*
 - 3.2.1. *Module de réaction à partir de l'essai pressiométrique*
 - 3.2.2. *Module de réaction selon Terzaghi*
 - 3.2.3. *Module de réaction utilisé dans le programme*
 - 3.3. *Calcul des raideurs du sol*

CHAPITRE IV : Présentation de la méthode utilisée

- 1 - Introduction
- 2 - Principe de résolution
- 3 - Présentation de la méthode
 - 3.1. *Construction de la matrice de rigidité*
- 4 - Application de la méthode au cas du pieu
 - 4.1. *Modèle mathématique adopté*
 - 4.2. *Etablissement des matrices A et S*
 - 4.3. *Algorithmes généraux régissant le programme et utilisation des courbes de mobilisation du frottement latéral*

CHAPITRE V : Programme

- 1 - Introduction
- 2 - Options et capacités du programme
- 3 - Organigramme
- 4 - Vérification de la validité des résultats

CHAPITRE VI : Exemples

- 1 - Chargement vertical
- 2 - Chargement latéral
- 3 - Courbe de chargement (P, z)
- 4 - Courbe de réaction (P, y)
- 5 - Détermination de la capacité portante

ANNEXE I : Structure du fichier d'entrée de données

ANNEXE II : Cas des sols stratifiés

ANNEXE III : Détermination de la courbe de mobilisation du frottement latéral à partir d'un essai statique

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE I

INTRODUCTION GENERALE

1 - Introduction.

Très souvent, les couches superficielles d'un terrain sont compressibles, tandis que les couches sous-jacentes sont résistantes à partir d'une certaine profondeur. Il paraît donc naturel de fonder l'ouvrage sur ce substratum.

Ce procédé existait déjà dans la préhistoire ; en effet, l'homme préhistorique devant construire sa demeure sur des sols mous, avait recours à des fondations profondes ; il s'agissait à l'époque de petits troncs d'arbres enfoncés à l'aide de masses.

L'évolution de la science et de la technologie, d'une part, les considérations économiques grandissantes, d'autre part, ont mené les ingénieurs de fondations à rechercher avec plus de précision le comportement réel de celles-ci, en procédant à une étude, conception et réalisation adéquates.

La conception et la réalisation d'une fondation consistent en l'application de procédés généraux de construction : à noter qu'elles doivent bénéficier d'une grande importance, car c'est de la bonne réalisation d'une fondation que résulte la bonne tenue de l'ensemble.

L'étude d'une fondation est plus complexe : elle fait appel à divers domaines scientifiques (mécanique des sols, calcul des structures, informatique, analyse matricielle...).

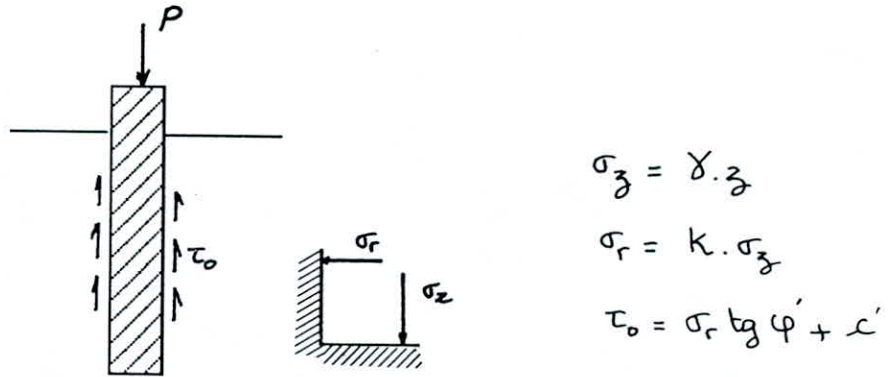
Cette étude de fondation contient tout un spectre de méthodes de calcul ; l'évolution permanente de ces méthodes et la confrontation avec les résultats expérimentaux ont permis d'émettre quelques réserves concernant les méthodes classiques et de positionner notre problème

2 - Position du problème.

Les méthodes utilisées actuellement pour calculer les pieux sous charge verticale reposent sur des idées sommaires quant au mécanisme du phénomène et, très souvent, elles se trouvent infirmées par les résultats expérimentaux, obtenus notamment par essais de chargement statiques des pieux, avec mesure des efforts transmis à différents niveaux.

La décomposition des efforts résistants en frottements latéraux et en résistance de pointe semble licite. Par contre, l'évaluation des effets résistants unitaires se fait "à la limite" et la charge de service du pieu est déduite par application des coefficients de sécurité de 2 (frottement latéral) et de 3 (terme de pointe) : une telle procédure apparaît peu convaincante quand on sait, d'après les résultats expérimentaux, que la notion de charge limite est floue dans la réalité, alors qu'au contraire, la charge de fluage, fin de la partie quasi-linéaire de la courbe de chargement, dans laquelle on désire faire travailler le pieu, est une caractéristique intrinsèque.

De plus, les contraintes limites sont, en général, reliées simplement aux contraintes verticales du niveau correspondant (sur la base de la théorie de Mohr-Coulomb) de la manière suivante :



$$\sigma_z = \gamma \cdot z$$

$$\sigma_r = k \cdot \sigma_z$$

$$\tau_0 = \sigma_r \operatorname{tg} \varphi' + c'$$

Plusieurs remarques sont à faire :

- Il y a incertitude pesant sur la détermination de c' et φ' .
- Il semble bien que le frottement latéral doive être étudié en fonction des caractéristiques locales en tenant compte de la déformabilité du milieu en cours de chargement.
- Comme à la rupture, par définition, la déformation est infinie, le fait de diviser la contrainte par un coefficient de sécurité ne prédétermine absolument pas l'ordre de grandeur de la déformation correspondante.

Avec les structures de plus en plus audacieuses que l'on réalise aujourd'hui, certaines fondations sont soumises à des efforts de renversement qui peuvent être importants (piles de ponts, appontements, jetées, batardeaux). Il existe même des ouvrages qui ne travaillent qu'horizontalement, ce sont des ouvrages d'accostage et ducs d'Albe qui peuvent recevoir des navires géants modernes des efforts considérables.

Il y a peu de temps encore, tous les calculs de fondations soumises à des efforts de renversement se faisaient dans l'hypothèse de "l'état limite" selon des méthodes qui ne rendaient pas compte du comportement de la fondation tant que les efforts agissants restaient inférieurs à la charge limite, or c'est bien ce comportement qu'il est nécessaire de prévoir au niveau du projet pour toutes les sollicitations auxquelles sera soumis l'ouvrage en service.

Il semblait donc qu'une approche réaliste du comportement des pieux (sous charge verticale et/ou de renversement) devait s'intéresser d'abord aux premières phases du chargement et qu'elle devait prendre en compte les propriétés de déformation du sol.

C'est ainsi que sont apparues des méthodes nouvelles de calcul "calcul en déplacements" par opposition au "calcul à la rupture". Il s'agit dans le cadre de cette étude de faire un calcul de pieu soumis à un chargement axial et de renversement en se basant sur un calcul en déplacements.

3 - présentation du sujet et objectifs

Le dimensionnement d'une fondation sur pieux nécessite :

- L'estimation de la capacité portante axiale des pieux isolés.
- L'estimation du tassement des pieux isolés sous charge de service.
- L'estimation des déplacements et des efforts sous charge de flexion.
- L'estimation d'éventuels effets de groupe.

L'objet de cette étude consiste en l'élaboration d'un programme permettant l'évaluation des paramètres cités ci-dessus.(excepté le dernier point)

On obtient à l'aide de ce programme le déplacement horizontal et/ou vertical et/ou la rotation en tête de pieu, ainsi que la distribution des moments fléchissants, des déplacements et des efforts tranchants en fonction de la profondeur, en vue d'un éventuel ferrailage ou de détecter un déplacement inadmissible du pieu pour la bonne tenue de la structure.

CHAPITRE II

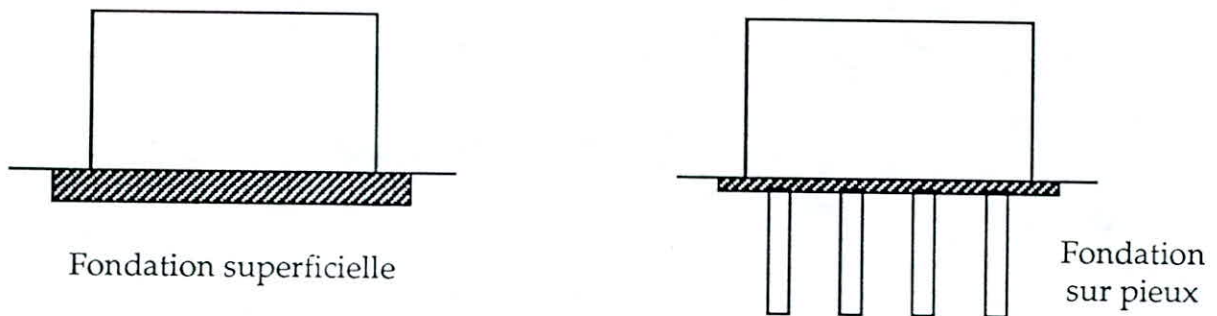
GENERALITES

1 - Définitions.

Dans son sens le plus strict, la fondation est l'élément qui sert de support à l'ouvrage et à ses charges. Elle comprend la couche superficielle de l'écorce terrestre et la partie de l'édifice destinée à reporter les efforts sur le sol.

L'exécution des fondations revêt une importance particulière, car leur défaillance peut entraîner la ruine de la superstructure, alors qu'inversement, les dommages dans la superstructure peuvent être localisés et entraînent rarement des désordres dans les fondations.

On distingue deux catégories de fondations : superficielles et profondes. Les premières sont placées immédiatement sous la partie la plus basse de l'ouvrage qu'elles supportent.



Lorsque le terrain en surface est de mauvaise qualité (argile molle, vase, tourbe...), les fondations superficielles sont inadéquates, soit parce qu'elles conduisent à des tassements excessifs ou encore par leur coût trop élevé, on a recours aux fondations profondes qui ont pour but de reporter les charges dans une couche plus résistante située à une profondeur donnée.

Naturellement, aucune ligne de séparation précise n'existe entre les deux classes et on passe progressivement de l'une à l'autre.

Les fondations profondes sont souvent classées en :

- pieux
- puits (ou faux puits)
- parois
- caissons.

Dans le cadre de cette étude, on s'intéressera aux fondations sur pieux.

Les pieux sont des éléments droits très élancés, en bois, métalliques ou le plus souvent en béton armé, voire précontraint.

Les pieux en béton peuvent être soit préfabriqués, soit moulés dans le sol ; le sol peut être refoulé lors de la mise en place ou excavé.

2 - Classification des pieux.

Différents critères de classification existent, notamment suivant :

— *Le refoulement ou l'extraction du sol* : il s'agit là du déplacement imposé au terrain lors de la mise en place.

Il y a des pieux dont la mise en place provoque un refoulement du sol, et il y en a dont l'exécution se fait après extraction du sol de forage du pieu, et qui, de ce fait, ne provoquent pas le refoulement du sol.

Les pieux nécessitant le refoulement du sol, conduisent généralement à une plus grande charge de rupture et à un tassement moindre que ceux des pieux exécutés après extraction du sol et la détente consécutive du terrain.

— *Le mode de mise en place* : plusieurs procédés de mise en place existent : battage, vibrofonçage, vissage, verinage, forage préalable, parfois aussi l'enfoncement est facilité par lançage, ce procédé très perturbateur pour le sol environnant, le pieu doit toujours être arrêté suffisamment avec la profondeur à atteindre par la pointe. Il faut aussi attirer l'attention sur le fait que lors du refoulement du sol par battage ou vibrofonçage, des nuisances à l'environnement sont à craindre.

— *Le mode fabrication* : On distingue les pieux moulés dans le sol et les pieux préfabriqués, parfois un mode de fabrication mixte est utilisé.

— *La forme et la nature du matériau constitutif* : Ce deux critères sont souvent liés entre eux (circulaire, carré..., bois, acier, béton,...).

Pour les pieux en bois, on utilise des grumes, d'où une section quasi-circulaire et une forme légèrement tronconique.

Pour les pieux métalliques (acier), on utilise soit des poutrelles (profilés laminés ou profilés soudés), soit des tubes.

Pour les pieux préfabriqués en béton armé, les sections sont le plus souvent carrées, parfois octogonales ou circulaires, les fûts sont prismatiques ou tronconiques, les pointes sont coniques ou pyramidales et parfois de section plus grande que celle du fût.

— *Le mode de transmission des efforts*

— *Le type d'efforts*

Ces deux derniers critères feront l'objet d'analyse plus approfondie ultérieurement.

3 - Mode d'action des pieux.

3.1. Éléments fondamentaux considérés.

L'étude d'une fondation sur pieux nécessite la connaissance des éléments suivants :

- la destination du pieu
- la géologie du site
- les résultats des sondages
- le type de pieu
- le matériel de battage et les formules correspondantes
- la portance des pieux à partir des formules statiques
- le déplacement admissible.

3.2. Utilisation des pieux.

On utilise les pieux :

— pour transmettre des charges à travers l'eau ou les sols mous jusqu'à une couche porteuse adéquate, au moyen de pieux résistant par la pointe.

— pour transmettre des charges à une couche épaisse de sol relativement peu consistante par frottement latéral le long des pieux.

— pour compacter les sols pulvérulents et accroître ainsi leur force portante (pieux de compactage).

— pour ancrer des ouvrages sujets au soulèvement par suite des pressions hydrostatiques ou d'un moment de renversement.

— pour fournir l'ancrage nécessaire permettant de résister à des tractions horizontales (pieu d'ancrage).

— pour protéger les ouvrages à la mer contre le choc des navires ou de tout objet flottant (pieu de protection et ducs d'Albe).

— pour reporter la fondation en-dessous du niveau d'affouillement et assurer la sécurité en cas d'érosion du sol.

— pour résister à des forces horizontales.

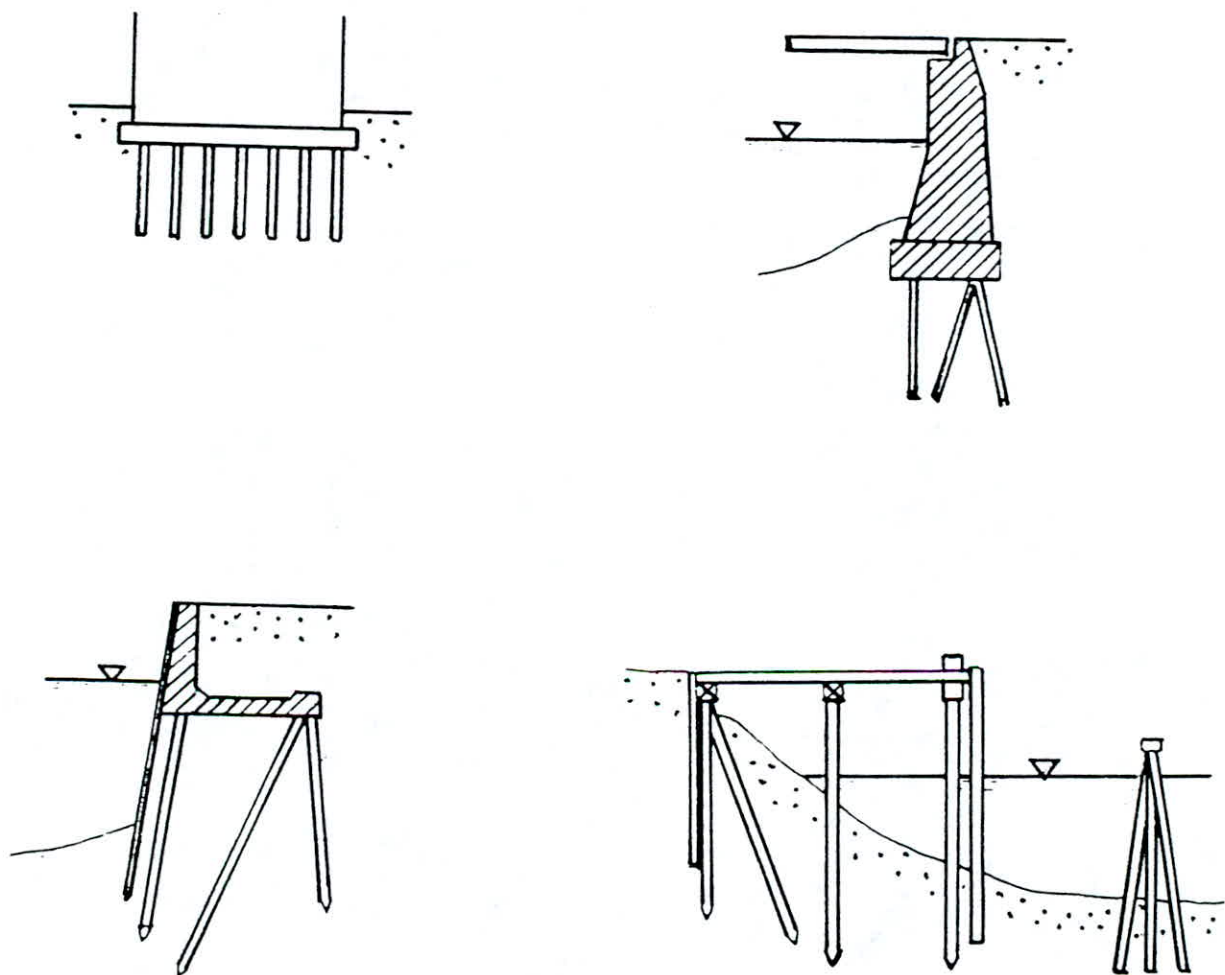


FIG. II.1 - Exemples d'utilisation des pieux

3.3. *Choix du type de pieu.*

Le choix du type de pieu fait intervenir divers paramètres tels que le prix, la disponibilité, la durabilité, les conditions de détérioration, le type de sol, la longueur, le type d'ouvrage et de charge, la capacité portante, la proximité d'ouvrages et le mode de mise en place.

3.4. *Analyse des forces agissant sur le pieu.*

Les pieux doivent être capables de résister sans dommage aux phénomènes suivants :

- Ecrasement dû à la charge verticale.
- Chocs durant le battage.
- Contraintes apparaissant lors de leur manutention.
- Contraintes de traction dues aux sous-pressions, au soulèvement ou au rebond pendant le battage.
- Flambement pour les parties ne recevant pas le support latéral du terrain comme par exemple dans l'air, l'eau ou la vase.

Les pieux doivent avoir une surface latérale suffisante pour transmettre la charge au sol dans le cas de pieux flottants et la pointe, une section suffisante pour les pieux travaillant en pointe.

3.5. *Reconnaissance du sol.*

La nécessité d'emploi de pieux peut être évidente ou apparaître à la suite d'études géotechniques. Les types et longueurs de pieux peuvent être déterminés à partir des profondeurs, épaisseurs, consistance et qualités des différentes couches. De tels renseignements permettent d'éviter des dépenses excessives et de faire une estimation raisonnable. Il est toujours regrettable de lésiner sur le nombre, la profondeur ou la qualité des sondages.

CHAPITRE III

ANALYSE DU COMPORTEMENT DES PIEUX ISOLÉS

1- Pieux chargés axialement.

L'analyse d'un pieu soumis à une charge axiale est actuellement en mécanique des sols, l'un des problèmes les plus délicats et certainement des plus controversés, car :

- la résolution théorique est déjà complexe étant donnée l'action simultanée du frottement latéral et de la pointe.

- la résolution pratique l'est encore plus avec le remaniement du sol, l'état de surface des pieux et le fait que le sol est généralement composé de plusieurs couches de caractéristiques distinctes.

Cependant, l'évolution notable des connaissances en matière de fondations a permis de fixer des acquis qui seront exposés dans cette étude.

1.1. Répartition des efforts longitudinaux dans un pieu.

Un effort axial appliqué en tête de pieu se transmet au terrain d'une part, par adhérence et frottements latéraux "effort de frottement latéral" et d'autre part, par compression du sol sous la pointe du pieu "effort de pointe". La répartition entre ces deux composantes dépend de la stratification et des caractéristiques physiques du sol, ainsi que de l'importance du chargement.

Il est possible que les premières couches soient si peu résistantes que le frottement latéral dans cette portion soit négligeable.

D'autre part, il se peut que le sol en pointe soit si résistant que le déplacement vertical se trouve pratiquement empêché, et par conséquent le frottement latéral mobilisé négligeable, voire nul.

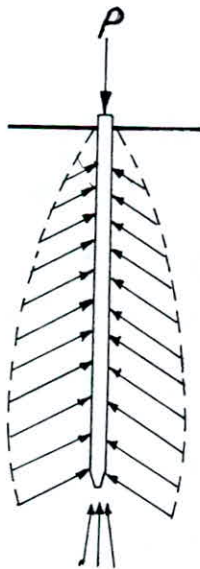


FIG III.1.1- répartition
des efforts longitudinaux
dans un pieu
(cas général)

On distingue :

- Les pieux travaillant en pointe : Les charges apportées par la superstructure sont intégralement reportées à une certaine profondeur connue. Il s'agit en quelque sorte de "poteaux porteurs enterrés" qui véhiculent les charges apportées par l'ouvrage au travers de formations de mauvaise qualité.

- Les pieux flottants : à l'opposé des précédents, ils ne doivent leur portance qu'à l'action du frottement latéral des terrains ambiants sur leur fût (argile plastique, sable peu compact, limons, ou alternance de ces diverses formations). On adopte cette solution lorsqu'il n'existe pas de couche résistante à une profondeur raisonnable et donc qu'il est impossible d'adopter la solution suscitée. La sécurité de tels pieux tient essentiellement à une bonne définition du frottement latéral réel à attendre des formations traversées.

- Les pieux travaillant à la fois en pointe et au frottement : représente le cas intermédiaire le plus couramment employé.

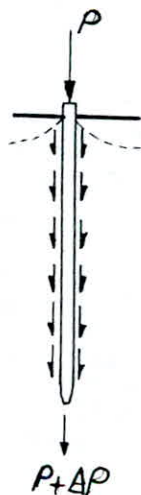
* *Frottement négatif* : C'est un effort parasite pouvant s'exercer sur le pieu.

C'est par définition, la surcharge que supporte le pieu lorsque l'une ou plusieurs des couches qu'il traverse tassent par rapport au fût du pieu.

Ceci se produit principalement dans deux cas :

- Lors d'un rabattement d'une nappe phréatique.
- Surcharge sur des couches très compressibles par des remblais ou à la suite de stockage de matières pondérées.

C'est le sol qui s'enfoncera par rapport au pieu et non le contraire. Il se développe donc un frottement négatif dirigé vers le bas qui viendra surcharger le pieu.



ΔP : surcharge due
au frottement négatif développé

Fig III.1.2 - répartition du frottement négatif

1.2 - Interaction sol-pieu.

1.2.1. Introduction.

L'action réciproque du sol et de la structure intéresse inévitablement la technique des fondations. La fondation et les formations géologiques qui la supportent sont, tout autant, un système porteur que la structure du bâtiment.

Dans le but de réaliser un dimensionnement économique et sûr, il faut analyser le phénomène de l'interaction sol-pieu, établir les modes de rupture possibles et estimer les tassements résultant des charges appliquées.

Il faudra par la suite s'assurer que :

- la structure est à l'abri de la rupture.
- les tassements sont compatibles avec un comportement adéquat de la structure.

1.2.2. Analyse des différents modes de rupture.

Le mode de rupture dépend essentiellement des contraintes tangentielles du sol environnant et du type de pieu.

L'analyse de ce problème doit beaucoup à Vésic qui, après de longs travaux, a pu établir différents types de rupture possibles.

Cas 1: Pieu battu dont la pointe repose sur un substratum rocheux, les couches autour du fût sont trop faibles pour exercer une résistance latérale notable. Le pieu se rompt pratiquement comme un matériau comprimé au-delà de sa contrainte admissible de compression.

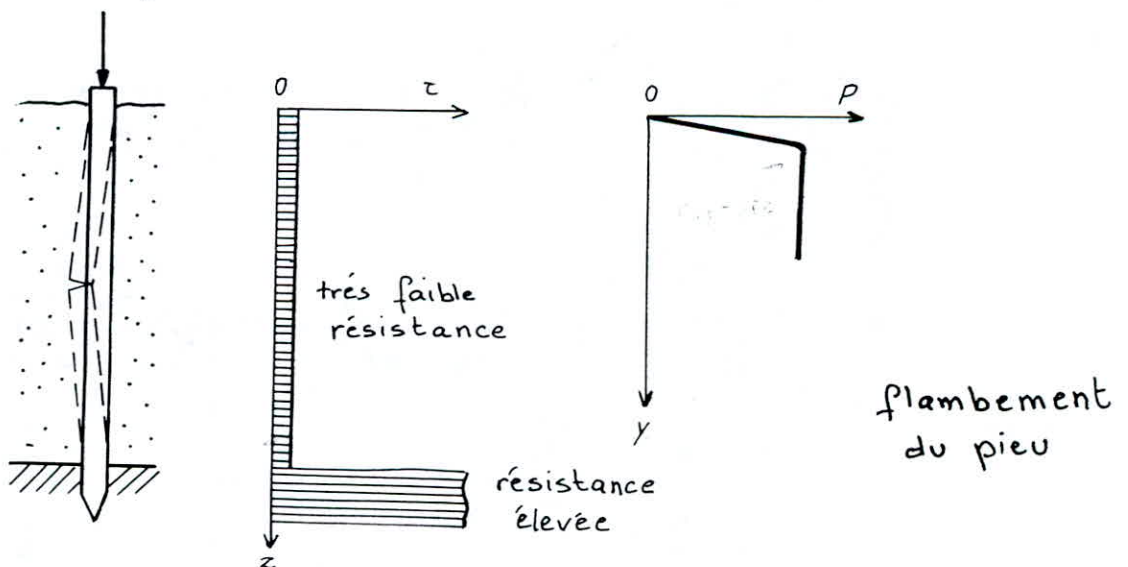
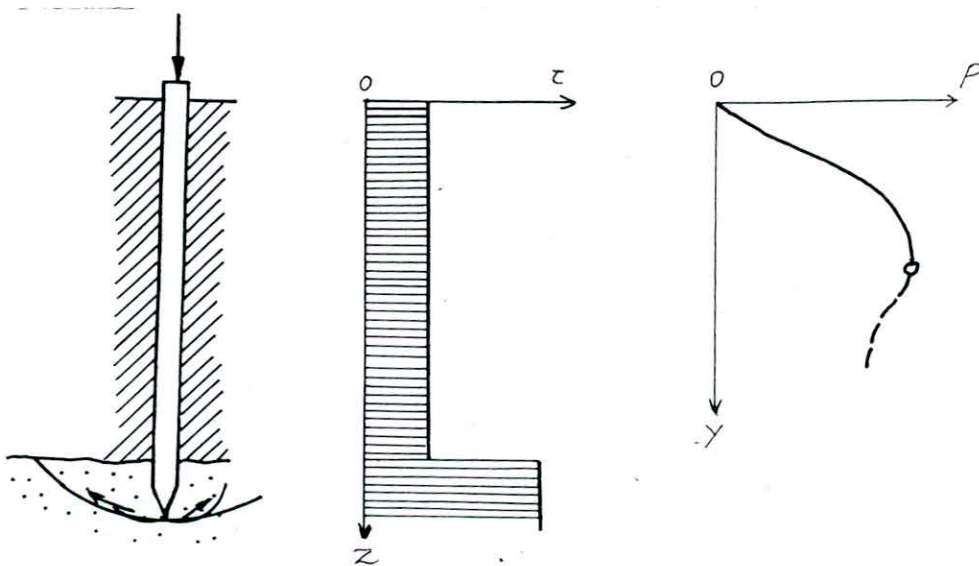


Fig III.1.2.a

Cas 2 : C'est un cas typique caractérisant l'utilisation la plus appropriée des pieux. En effet, le pieu pénètre à travers les couches ayant une faible résistance au cisaillement jusqu'à atteindre une couche à résistance élevée qu'il pourrait pénétrer éventuellement.

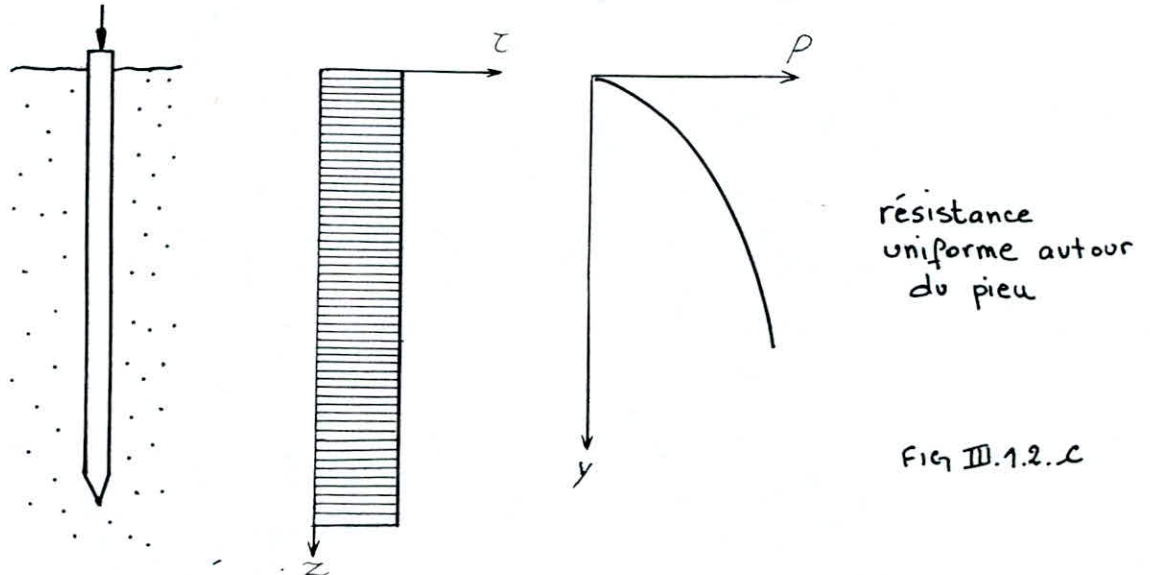
Dans la mesure où il n'existe pas de couches plus faibles sous la pointe du pieu, une charge P en augmentation provoquera une rupture généralisée en cisaillement au niveau de la couche inférieure. Ceci est dû au fait que la couche supérieure n'empêche pas la formation d'une tranche glissante. L'effet de frottement latéral est plutôt léger, puisque la couche inférieure s'oppose à la présence de tassements excessifs. En conséquence, le degré de mobilisation de contraintes de cisaillement le long du fût sera faible. L'allure du diagramme chargement-tassement est celle que l'on rencontre typiquement dans le cas de fondations superficielles sur sol dense.



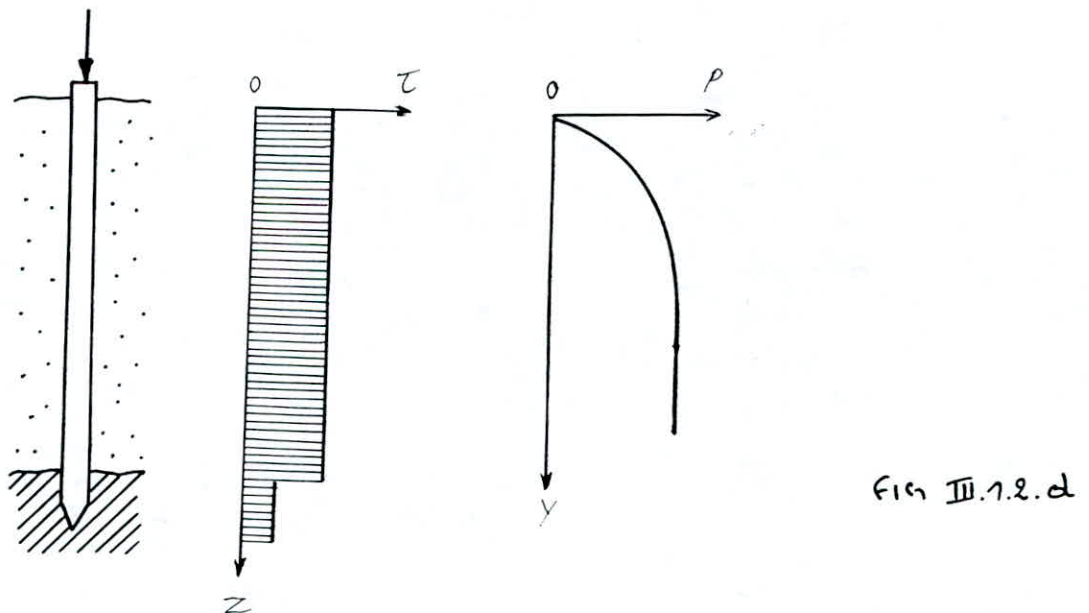
rupture généralisée sous
la pointe du pieu

Fig III.1.2.b

Cas 3 : La résistance au cisaillement du sol se trouvant autour du pieu est pratiquement uniforme. Ainsi, une rupture par poinçonnement (punching) est probable. Le diagramme chargement-tassement ne présente pas de tangente verticale et il n'y a pas de charge de rupture définie. La charge sera reprise par résistance en pointe et frottement latéral.



Cas 4 : Il ne présente pas une application typique des pieux : la couche inférieure est de résistance plus faible. Ainsi, la charge sera essentiellement reprise par frottement latéral sans développement de résistance en pointe. Le diagramme chargement-tassement présente une tangente verticale qui représente la charge correspondant à la mobilisation totale du frottement latéral.



résistance faible dans la couche inférieure
frottement latéral prédominant

Cas 5 : Un arrachement est mis en action et puisque la résistance en pointe est nulle, comme dans le cas 4, le même diagramme caractérisera le comportement.

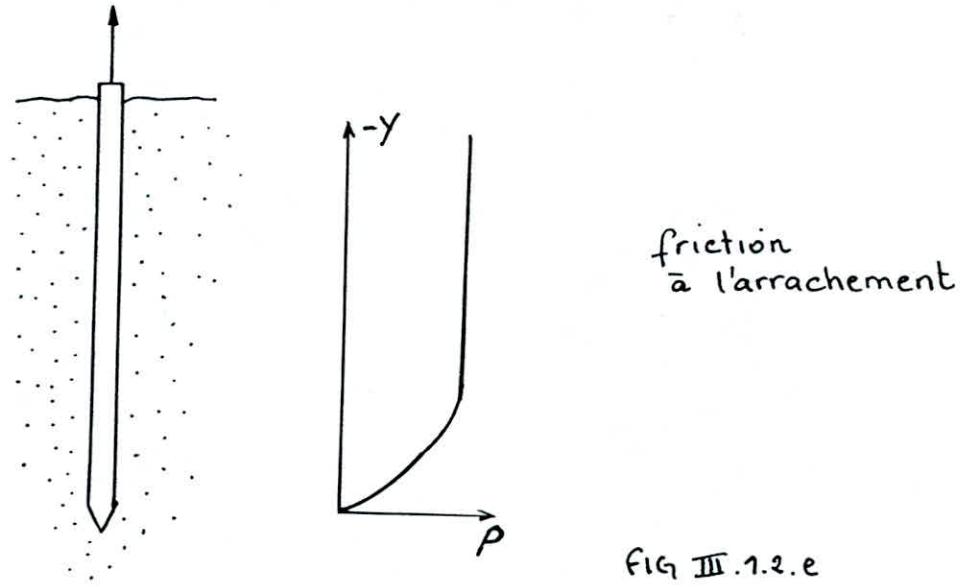


FIG III.1.2.e

Dans les cas 3 et 4, la définition de la charge limite nécessite une considération particulière puisque le diagramme chargement-tassement ne présente habituellement pas de tangente verticale. Pour cela, un critère est sélectionné permettant de définir une charge pour laquelle le tassement est compatible avec le comportement de la superstructure.

1.2.3. Analyse du transfert de charges.

Les figures des cas 1, 2, 3, 4, 5 précédents ont montré les différents types de comportement du pieu. Dans cette section, il s'agira de dériver des expressions mathématiques en vue de mieux comprendre l'interaction sol-pieu et d'avoir une meilleure emprise sur le comportement du pieu.

Cette analyse constitue la base de toute considération théorique concernant la mobilisation du frottement latéral et le mécanisme de transfert de charges.

Tout d'abord, il faut noter que l'expérience est indispensable à toute tentative de considération théorique ; en effet, c'est grâce à l'exploitation des résultats pratiques que l'on peut commencer à rationaliser et à positionner la problématique. Pour ce qui est du mécanisme de transfert de charges, l'examen d'un grand nombre d'essais de chargement montre que le processus de mobilisation de la résistance est toujours identique.

Le frottement latéral se mobilise proportionnellement au déplacement du pieu pour les premiers millimètres, ensuite il atteint une valeur max que l'augmentation de charges n'affecte plus.

Il en résulte que sous les faibles charges, celles-ci sont entièrement absorbées par la mobilisation du frottement latéral dans les couches supérieures.

Lorsque la charge augmente, le frottement latéral max étant déjà mobilisé dans les couches supérieures, l'accroissement de charge est absorbé par la mobilisation progressive du frottement latéral en profondeur.

Enfin, pour les charges élevées, le frottement latéral est mobilisé sur tout le fût et l'effort de pointe est à son tour progressivement mobilisé jusqu'à la rupture.

Il en résulte que lorsque les pieux ne sont pas fichés dans un substratum rocheux, c'est le frottement latéral qui est mobilisé en premier et ceci pour un très faible déplacement.

- Approche théorique.

Lorsque l'on soumet un pieu à une charge axiale, cette dernière va être transférée au sol environnant et au sol sous la pointe. Le chargement va être repris d'une part par le frottement latéral et d'autre part sous la forme d'une résistance en pointe.

Donc, le chargement total est la somme de ces deux composantes. La distribution de la résistance en pointe est considérée comme uniforme. Cependant, la distribution du frottement latéral dépend de plusieurs paramètres.

Le transfert de charges dans les systèmes sol-pieu est, comme l'a dit Vésic, un phénomène très complexe dont l'évaluation numérique des paramètres est très difficile, voire impossible.

Cependant, quelques définitions concernant les caractéristiques d'un système sol-pieu sont essentielles pour un design rationnel des pieux.

Le problème essentiel du transfert de charges est montré en figure.

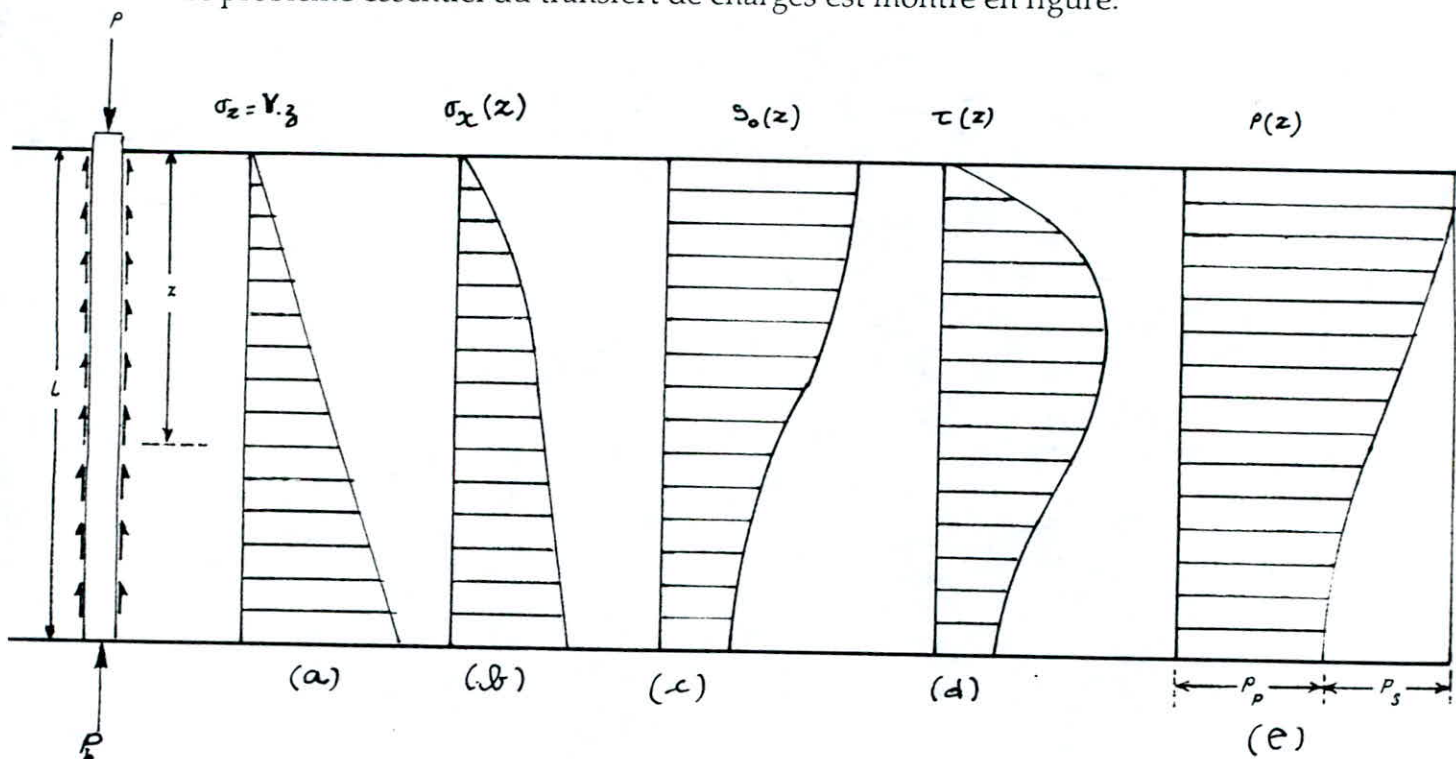


FIG III.13. ANALYSE DU TRANSFERT DE CHARGES

On veut déterminer les deux diagrammes (III.1.c) et (III.1.e). C'est-à-dire les mouvements verticaux des sections transversales du pieu et le chargement agissant sur ces sections, en fonction de la profondeur.

Ceci nécessite la détermination du frottement latéral ; et $P(z)$ sera obtenu de la relation suivante :

$$f_0(z) = - \frac{1}{C} \frac{dp(z)}{dz} \quad (\text{III.1})$$

$f_0(z)$ reste positive si $p(z)$ diminue avec la profondeur (i.e il n'y a pas apparition de frottement négatif).

Le déplacement vertical d'une section quelconque du pieu, située à une profondeur z , est donné par la formule :

$$S(z) = S_0 - \frac{1}{AE} \int_0^z p(z). dz \quad (\text{III.2})$$

A partir de là, les diagrammes des courbes de transfert de charges sont déterminés. Afin d'y arriver, il faut introduire une loi de mobilisation du frottement latéral.

Il y a plusieurs lois qui ont été proposées par différents auteurs. Cependant, dans le cadre de ce travail, il s'agira de consulter des courbes expérimentales existant déjà et qui ont été obtenues à partir d'essais expérimentaux (il en existe plusieurs).

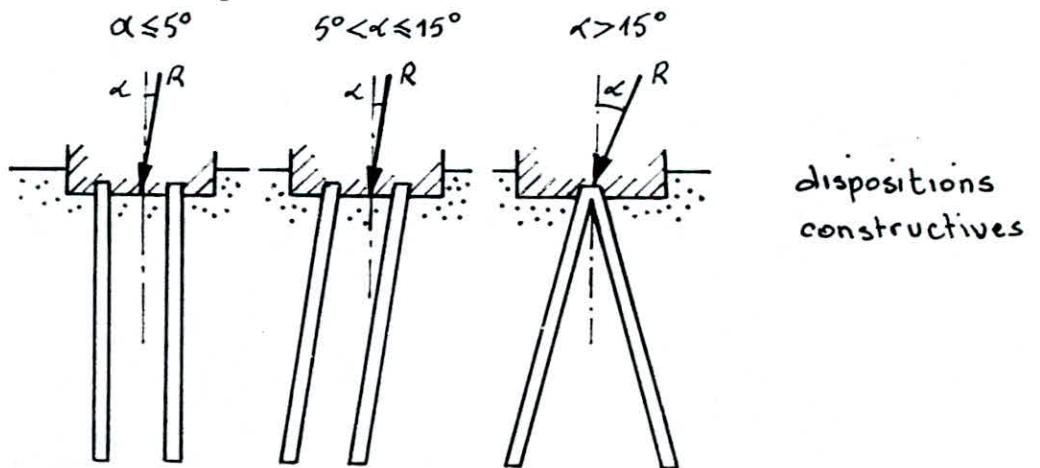
L'utilisation de ces courbes sera exposée dans la section (4.3).

Connaissant la distribution du frottement latéral, on arrive à déterminer $P(z)$.

$$P(z) = P_0 - \int_0^z p_0(z) \cdot c \cdot dz \quad (III.3)$$

2 - Pieux chargés latéralement.

Les développements ci-après sont faits dans le cas d'un pieu vertical. On peut admettre qu'il restent valables pour un pieu incliné dont la charge a une composante normale à son axe non nulle : on peut ainsi confondre sans risque d'erreur importante, charge normale à l'axe du pieu et charge latérale horizontale, compte tenu de la faible inclinaison des pieux ($< 20^\circ$).



2.1. Comportement du sol et poussées parasites.

Lorsqu'un pieu est sollicité par un effort T_0 et/ou un moment M_0 en tête, sa stabilité est assurée par une mobilisation des efforts de réaction du sol sur le fût du pieu.

Cas particulier ou $\alpha = \arctg(Q_h/Q_v)$. Ce pieu subira uniquement une compression axiale et donc pourra être calculé comme un pieu soumis à un chargement axial.

En un point donné, la réaction du sol est fonction du déplacement ; Y est une fonction croissante des forces extérieures P . On peut donc tracer une courbe $P(y)$ appelée "courbe de réaction", en ce même point.

L'allure de cette courbe fait apparaître au voisinage de l'origine un comportement de sol que l'on peut qualifier de quasi-élastique. En pratique, la courbe est souvent presque linéaire.

On définit alors le module de réaction k_s par la pente de cette portion de courbe

$$k_s = P/y$$

Il y a peu de temps encore, tous les calculs de fondations soumises à des efforts de renversement se faisaient dans l'hypothèse de l'état limite et selon des méthodes qui ne rendaient pas compte du comportement de la fondation, tant que les efforts restaient inférieurs à la charge limite et ne permettaient pas d'évaluer les déplacements obtenus, ce qui est le plus souvent primordial, car il y a des valeurs à ne pas dépasser pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

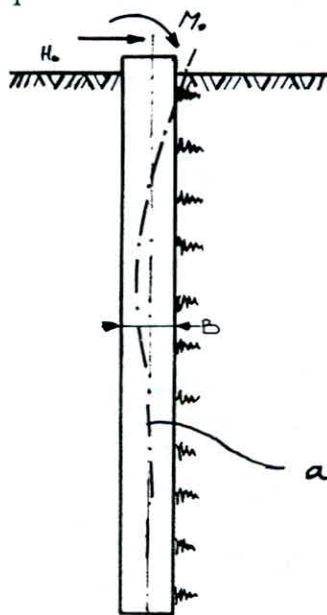
La méthode proposée est donc basée sur un calcul en déplacements. Cette méthode est dérivée de la théorie du module de réaction de Winkler. Ce dernier considère le sol en contact avec la fondation comme étant une série de ressorts indépendants sur lesquels la fondation repose. La réaction P dans le sol, à une profondeur z , est directement proportionnelle à la déformation en ce point.

Ces méthodes sont actuellement les plus utilisées pour déterminer les déplacements et les contraintes dans les pieux soumis à des efforts latéraux.

Il existe un autre cas très fréquent d'apparition d'efforts horizontaux : le milieu, lorsqu'il est compressible et soumis à un chargement de largeur limitée, a tendance à fluer horizontalement et devient lui-même le siège de déplacements importants ; il exercera ainsi des efforts horizontaux sur le pieu.

2.2. Principe de la méthode de calcul et équation d'équilibre.

Le pieu est considéré comme une poutre reposant sur appuis élastiques.



M_0 : moment de renversement

T_0 : charge horizontale

allure de la déformée

En appliquant la théorie de la flexion des poutres ; les équations générales s'écrivent :

$$M(z) = EI \frac{d^2 y}{dz^2} \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{dM(z)}{dz} = -T(z) \quad (\text{III.5})$$

$$\frac{dT(z)}{dz} = B \cdot p(z) \quad (\text{III.6})$$

L'équation générale des poutres sur appuis élastiques se déduira des formules (III.4) et (III.6).

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + B \cdot p(z) = 0 \quad (\text{III.7})$$

y : déplacement horizontal du pieu

B : largeur du pieu

E : module de Young

I : inertie du pieu

Compte tenu de $P(z) = k(z) \cdot y(z)$ cette équation s'écrit :

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + B \cdot k(z) \cdot y(z) = 0 \quad (\text{III.8})$$

La résolution de l'équation nécessite la connaissance de K_s

2.3. Détermination du module de réaction horizontal K_s .

La méthode du module de réaction latéral ou modèle de Winkler ou encore méthode des ressorts indépendants est un modèle d'interaction sol-structure pour lequel la réaction exercée par le sol en un point est directement proportionnelle au déplacement de ce point :

$$P = k_s y$$

Le module de réaction, ainsi que le faisait Terzaghi, n'est pas une caractéristique intrinsèque du sol. En effet, il dépend des dimensions de la surface de contact, de la nature et de la profondeur du sol.

Il est, par ailleurs, différent dans le sens vertical et dans le sens horizontal.

Pendant longtemps, on a mesuré le module de réaction à l'aide des essais à la table ou à la plaque. Ces essais peuvent être réalisés horizontalement au vérin sur les parois d'une tranchée pour obtenir le module horizontal.

Actuellement, c'est l'essai pressiométrique qui est le mieux adapté pour déterminer le module de réaction horizontal, car les champs de contraintes et de déformations autour du pieu sont pratiquement les mêmes qu'autour du pressiomètre.

On va exposer dans le cadre de cette analyse, différentes manières de déterminer le module de réaction :

- à partir du pressiomètre
- selon Terzaghi
- celui utilisé dans le programme

2.3.1. Module de réaction à partir de l'essai pressiométrique.

** Définition de la profondeur critique.*

L'expérience montre que, dans un sol homogène, la charge limite augmente avec la profondeur dite "profondeur critique D_c " au-delà de laquelle elle reste constante.

Cette profondeur critique varie avec :

- le type de sol,
- la résistance du sol,
- le diamètre du pieu.

Pour les efforts horizontaux, l'évaluation de la profondeur critique est très difficile. Elle est plus faible dans les argiles que dans le sable et elle est beaucoup moins importante que pour des sollicitations verticales.

Selon Menard, on a :

argiles : $D_c = 2B$.

sables : $D_c = 4B$

** Module de réaction horizontal en-dessous de la profondeur critique :*

Le module de réaction horizontal s'exprime en fonction du module pressiométrique par la relation :

- pour les pieux courts rigides :

$$K_s = \frac{3E}{0.67 \alpha R \lambda + 1.33 R_o (\lambda R/R)^\alpha}$$

- pour les pieux longs :

$$K_s = \frac{3E}{\alpha R + 1.33 R_o (2.7/R/R_o)^\alpha}$$

avec :

R : Rayon du pieu

R₀ : Rayon de référence égal à 30 cm

α : Coefficient de structure du sol, variable selon la nature du matériau et du rapport E/p_l obtenu par le pressiomètre (p_l étant la pression limite).

Ce coefficient est donné par le tableau 1.

λ, λ' : Coefficients de forme dépendant du rapport L/B (longueur sur le diamètre — ou largeur — du pieu).

Ils sont donnés par le tableau 2.

Dans le cas du calcul d'un pieu appartenant à un groupe, on se gardera d'utiliser systématiquement la valeur du module de réaction du pieu isolé.

D'après Davisson, la valeur à prendre vaut :

- 25% de K_s, pour un entraxe de 3 diamètres

- 100% de K_s, pour un entraxe de 8 diamètres.

** Module de réaction horizontal au -dessus de la profondeur critique :*

Entre la surface du sol et la profondeur critique, le module de réaction horizontal varie d'une valeur minimale jusqu'à une valeur maximale à la profondeur critique.

Menard suggère pour les argiles :

$$K(z) = \frac{K_c}{2} (1 + z/D_c)$$

et pour les sables :

$$K(z) = K_c \frac{z}{D_c}$$

où K_c est le module de réaction calculé à la profondeur critique.

TYPE DE MATERIAUX	TOURBE		ARGILE		LIMON		SABLE		SABLE ET GRAVIER	
	E/PI	α	E/PI	α	E/PI	α	E/PI	α	E/PI	α
Surconsolidé ou très serré	/	/	> 16	1	> 14	2/3	> 12	1/2	> 10	1/3
Normalement consolidé ou normalement serré	/	1	9.16	2/3	8.14	1/2	7.12	1/3	6.70	1/4
Sous-consolidé et remanié ou lâche	/	/	7.90	1/2	5.80	1/2	5.70	1/3	/	1/4

TYPE	ROCHE
	α
Très peu fracturé	2/3
Normal	1/2
Très fracturé	1/3
Très altéré	2/3

Tableau 1. Valeurs du coefficient de structure α

L/B	1		2	3	5	20
	Cercle	Carré				
λ'	1	1.12	1.53	1.78	2.14	2.65
λ	1	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50

Tableau 2. Valeurs des coefficients de forme.

2.3.2. Module de réaction selon Terzaghi .

a - *Sols non cohérents* :

Terzaghi recommande d'utiliser une distribution triangulaire avec un maximum au pied du pieu.

Pour calculer ce maximum, on utilise la relation :

$$K_s = \frac{\alpha \cdot L}{B}$$

avec :

B : diamètre (ou ~~long~~ eur) du pieu,

L : longueur du pieu,

α : Coefficient dépendant de la densité relative du sol et de la position du niveau d'eau.

Sa valeur est comprise entre 0.13 et 1.8 kg/cm².

Densité relative	lâche	moyenne	dense
Au-dessus du niveau d'eau	0.22	0.67	1.80
En-dessous du niveau d'eau	0.13	0.45	1.10

Tableau 3. Valeurs de α (Kg/cm²)

b - *Sols cohérents* :

Le module de réaction est maximum au pied du pieu. Il est donné par la relation :

$$K_s = \alpha / b$$

avec :

B : diamètre (ou largeur) du pieu,

α : Coefficient dépendant de la consistance du sol.

Sa valeur est comprise entre 80 et 320 kg/cm².

Consistance	raide	très raide	dure
(kg/cm ²)	80	160	320

Tableau 4. Valeurs de α (kg/cm²)

2.3.3. Module de réaction K_s utilisé dans le programme.

Dans la plupart des sols, le module de réaction K , augmente avec la profondeur et suit une loi parabolique, telle que :

$$K_s = A_s + B_s Z^n \quad (1)$$

Dans cette formule, n est un exposant compris entre 0,40 et 0,80.

Bowles (1974) a calculé la valeur de K , à partir de la capacité portante admissible qui donne des valeurs appréciables.

$$K_s = 120 q_{adm} \text{ (KN/m}^3\text{)}$$

où q_{adm} est donnée en KN/m^2 .

L'équation de la capacité portante ultime est donnée par :

$$q_{ult} = CN_c S_c + q N_q S_q$$

où les paramètres N_c et N_q sont les paramètres sans dimensions dépendant de la valeur de l'angle de frottement (φ) du Sol.

Ces paramètres sont donnés par les équations suivantes :

$$N_c = (N_q - 1) \cotg \varphi$$

$$N_q = K_p \exp(\pi \tg \varphi)$$

$$K_p = \tg(\pi/4 + \varphi/2)$$

Dans l'équation précédente, les paramètres S_c et S_q sont donnés respectivement par:

$$S_c = 1 + 0.2 B/L$$

$$S_q = 1 + B/L \sin \alpha$$

La capacité portante admissible est donnée par l'équation suivante :

$$q_{adm} = \frac{q_{ult}}{F_s}$$

où F_s est le facteur de sécurité.

En prenant $F_s = 3$

et sachant que $q = \gamma Z$, on obtient :

$$K_s = 40 (CN_c S_c + N_q S_q Z) \quad (2)$$

Par identification des équations (1) et (2), on a :

$$A_s = 40 (CN_c S_c)$$

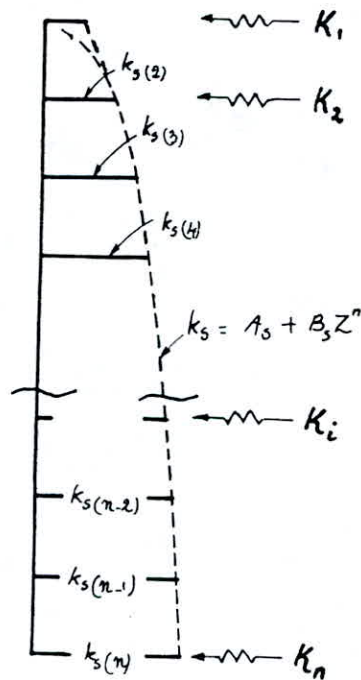
$$B_s = 40 (N_q S_c)$$

où c étant la cohésion et γ le poids spécifique du sol, obtenus à partir des essais au laboratoire ou in-situ.

3.3. Calcul des raideurs du sol .

(Méthode basée sur l'imbrication des ressorts)

Après avoir obtenu les valeurs de k_s à chaque profondeur. On calcule les raideurs K des ressorts selon une méthode basée sur une parabole appelée "parabole de Newmark" (1942).



Variation du module de réaction k_s avec la profondeur et méthode de concentration aux noeuds pour construire les raideurs nodales du sol

A partir de cette représentation, nous avons les valeurs des "raideurs du sol", telles que :

$$K_1 = B.L./24 [7k_s (1) + 6 k_s (2) - k_s (3)] \quad (III.9)$$

$$K_n = B.L. [7 k_s (n) + 6 k_s (n-1) - k_s (n-2)] \quad (III.10)$$

pour un K quelconque :

$$K_i = BL/12 [k_s (i-1) + 10 k_s (i) + k_s (i + 1)] \quad (III.11)$$

CHAPITRE IV

PRESENTATION DE LA METHODE UTILISEE

1. Introduction.

Des efforts considérables sont déployés pour la formulation de modèles mathématiques pour définir la réponse d'un sol supportant une structure donnée et pour mieux maîtriser le phénomène de l'interaction sol-pieu.

La formulation mathématique qui a eu le plus de succès jusqu'à présent, a été la méthode des différences finies.

Plus récemment, la littérature a commencé à identifier une méthode utilisant des éléments discrets en vue de formuler le modèle numérique du système et d'analyser son comportement, c'est la méthode des éléments finis.

L'analyse théorique adoptée dans le cadre de ce travail est inspirée de celui de Joseph E. Bowles.

Elle possède le même principe de base que celui des éléments finis : la discrétisation. Elle est cependant différente dans la mesure où la matrice de rigidité élémentaire est connue, c'est dans notre cas la matrice de rigidité d'un élément de poutre (6 dd.l).

Par ailleurs, la méthode de Joseph E. Bowles, en terme de procédures de calcul, utilise des résultats de recherches théoriques et expérimentales qui ont permis de mettre en évidence deux principes qui constituent la base de notre approche théorique.

Ces principes sont :

- Pour le calcul d'un pieu sous sollicitations latérales diverses (même poussées parasites), la notion de module de réaction latéral et modèle de Winkler permet d'évaluer, moyennant cette méthode, les déplacements horizontaux d'une section donnée du pieu ainsi que les efforts y agissant.

- Pour le calcul du tassement d'un pieu, on se sert des relations liant l'enfoncement du pieu, d'une part à l'effort latéral mobilisé le long du pieu, et d'autre part, à l'effort en pointe du pieu.

Il s'agit des relations (III.1) et (III.2) exposées au chapitre III.

La prise en compte d'un déplacement relatif sol-pieu dans ce cas permet aussi de calculer la mobilisation des frottements négatifs éventuels.

Tant pour la compression (efforts axiaux) que pour la flexion (efforts latéraux), l'interaction sol-pieu est représentée par des lois de réaction.

Cette solution matricielle est une solution générale complète pour un chargement bidimensionnel à trois degrés de liberté. Cette méthode est applicable aussi bien à des pieux verticaux qu'à des pieux inclinés à la seule condition que l'inclinaison soit dans le plan de chargement.

2 - Principe de résolution.

Bowles s'est proposé de donner une explication plus approfondie des faits observés en adoptant une loi de comportement du sol accompagnée d'une méthode de calcul qui permette l'utilisation pratique :

* La loi de comportement choisie résulte de la considération d'un domaine élastique (à partir des courbes de réaction) semblable au domaine élastique de la résistance des matériaux classique borné par une limite.

Au-delà de cette limite, définie par une condition de volume et de distorsion, le comportement est plastique, des déformations irréversibles se produisent.

* La méthode de calcul consiste en la résolution d'un système d'équations linéaires sous la forme :

$$P = K U$$

{P} : vecteur chargement

{U} : vecteur déplacement

[K] : matrice de rigidité

La section (3.1.) constitue une technique de construction de cette matrice.

Ce principe de résolution est de même basé sur la discrétisation du pieu en question en segments de pieu où les caractéristiques mécaniques et géométriques sont constantes (éventuellement différentes d'un segment à un autre).

3. Présentation de la méthode.

3.1. Construction de la matrice de rigidité k .

On construit indépendamment toutes les matrices élémentaires, puis on les assemble en construisant et en appliquant une transformation de coordonnées dans laquelle les degrés de liberté de l'élément d'une part et ceux des points d'assemblage d'autre part (nœuds) constituent les vecteurs objets de la transformation.

Cette méthode de construction est communément appelée "méthode de transformation de congruence".

Considérons une structure décrite à l'aide d'un ensemble de p éléments finis dont les équations individuelles locales, pour un élément à n degrés de liberté s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = S_{11} e_1 + S_{12} e_2 + \dots + S_{1n} e_n \\ F_2 = S_{21} e_1 + S_{22} e_2 + \dots + S_{2n} e_n \\ \vdots \\ F_i = S_{i1} e_1 + S_{i2} e_2 + \dots + S_{in} e_n \\ \vdots \\ F_n = S_{n1} e_1 + S_{n2} e_2 + \dots + S_{nn} e_n \end{array} \right.$$

Que l'on peut arranger comme suit :

$$F_{elt} = S_{elt} \cdot e_{elt} \quad (IV.2)$$

S_{elt} : rigidité de l'élément.

F_{elt} et e_{elt} sont les vecteurs couvrant tous les degrés de liberté de l'élément considéré.

Les équations définissant l'équilibre entre les forces extérieures P_{elt} et intérieures F_{elt} sont assemblées sous forme matricielle :

$$P_{elt} = A F_{elt} \quad (IV.3)$$

A : Matrice de proportionnalité.

On doit de même considérer la continuité des déplacements au nœud de l'élément considéré qui s'exprime sous la forme :

$$e = Bx \quad (IV.4)$$

B : matrice de connexion

x : déplacements globaux aux nœuds

Pour chaque élément on a :

$$P = AF$$

$$F = Se$$

$$e = Bx$$

Notre but étant de construire k donc de relier directement les forces extérieures aux déplacements. Aussi, en substituant (IV.3) dans (IV.2) on a :

$$P = A S e$$

de même en substituant (IV.4) dans (IV.2) on a :

$$P = A S B x$$

On démontre grâce au principe des travaux virtuels que :

$$B = A^t$$

Etant donné la définition du travail, on exprime le travail des forces extérieures comme suit:

$$W_{\text{ext}} = 1/2 P^t X$$

soit en utilisant l'équation (IV.2)

$$W_{\text{ext}} = 1/2 F^t A X \quad (*)$$

De même, le travail des forces internes sera :

$$W_{\text{int}} = 1/2 F^t e$$

soit, en utilisant l'équation (IV.4) :

$$W_{\text{int}} = 1/2 F^t B X \quad (**)$$

En vertu du principe de l'égalité des travaux des efforts intérieurs et extérieurs et par comparaison des équations (*) et (**), On voit que :

$$B = A^t$$

On construira ainsi les rigidités élémentaires dans le repère global sous leur forme conventionnelle, c'est-à-dire l'équation $P = KX$ dans laquelle :

$$K = A S A^t$$

Il semblerait que la méthode de transformation de congruence soit moins efficace que la méthode de rigidité directe car elle nécessite la formation de S_{elt} et il faudra de plus effectuer le produit matriciel.

Cependant, la matrice de rigidité est facile à construire. Les matrices des éléments ne devant pas nécessairement comporter de modes de déplacement rigide, les degrés de libertés correspondant à des conditions d'appuis stable et isostatique pour chaque élément, peuvent être exclus et la portion de matrice de rigidité à conserver dans S_{elt} sera celle contenant les autres degrés de liberté.

On schématise cela comme suit :

$$S_{elt} = \begin{bmatrix} S_{ff} & S_{fs} \\ S_{sf} & S_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_f \\ e_s \end{Bmatrix}$$

S_{fs} , S_{sf} , S_{ss} , ainsi que S_{ff} sont des sous-matrices.

Après cette transformation, on ne gardera que S_{ff} et sachant que e_s est la portion de degrés de liberté imposés, il restera à considérer seulement S_{ff} et e_f .

Le processus de transformation $K = ASA^t$ a pour effet de libérer chaque élément des appuis qui ont permis la construction de la matrice S_{ff} et qui sont évidemment les degrés de liberté rassemblés dans $\{e_s\}$.

A noter que lorsque repères local et global sont confondus, la matrice A sera peuplée seulement d'éléments égaux soit à zéro, soit à l'unité, une telle matrice est appelée "matrice booléenne", on peut imaginer sans peine qu'elle se prête à la conception d'algorithmes hautement performants, en particulier pour le produit matriciel de l'équation (IV.5).

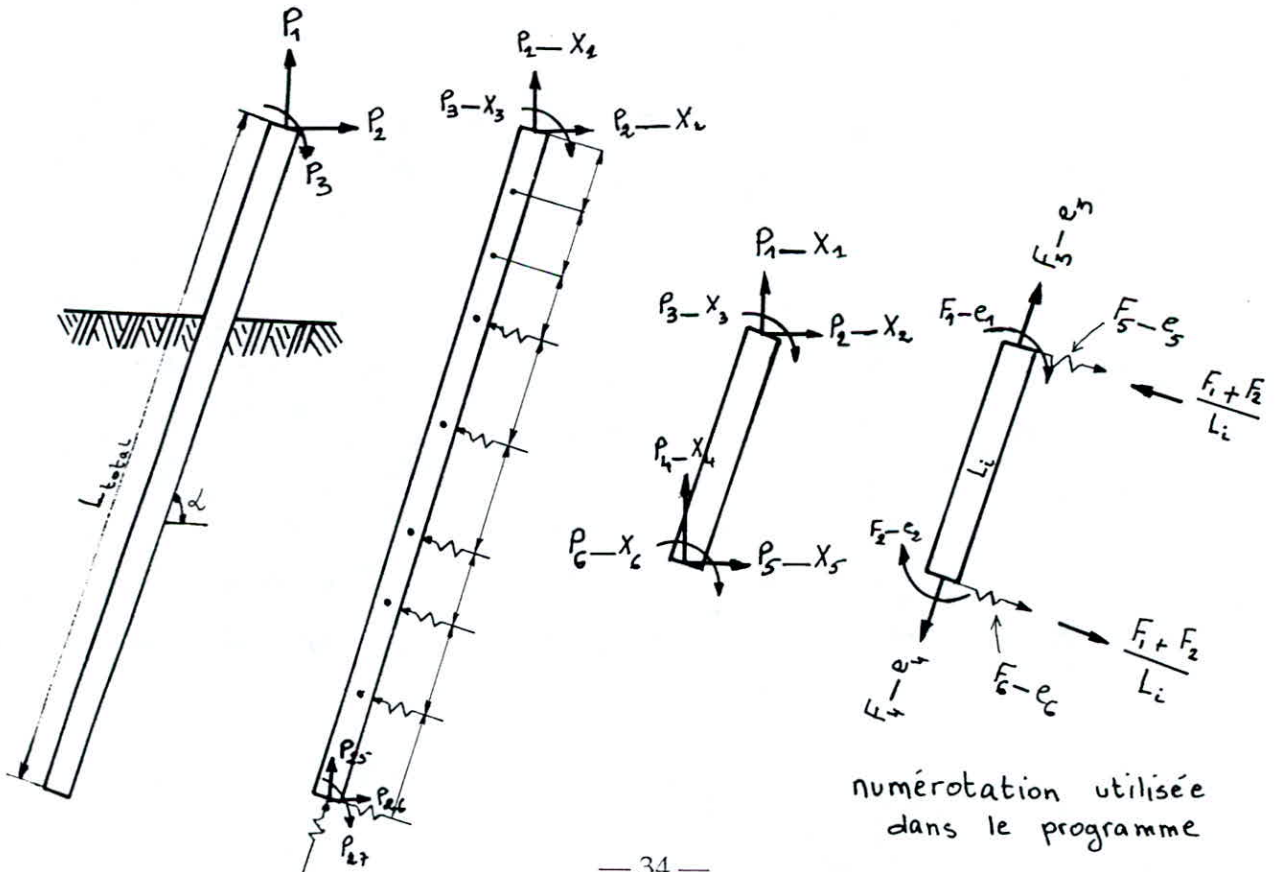
Si la rigidité de l'élément est donnée dans le repère local, il faut alors modifier l'équation (IV.5), afin d'inclure la transformation qui la rapportera aux axes globaux.

Dans ce cas, les coefficients de la matrice A ne seront plus exclusivement unitaires et A ne sera plus booléenne, mais elle sera toujours au pire peuplée de manière clairsemée par des valeurs unitaires et des cosinus directeurs

4 - Application de la méthode au cas du pieu.

4.1. Modèle mathématique adopté.

On utilise le modèle de Winkler, très utilisé pour la modélisation des systèmes en contact avec le sol.



Pour chaque élément :

F_1, F_2 : moments internes

F_3, F_4 : Efforts axiaux

F_5, F_6 : Forces de rappel dues aux ressorts situés aux extrémités de chaque élément.

Aussi :

e_1, e_2 : Rotations correspondant à F_1, F_2 respectivement.

e_3, e_4 : compressions axiales

e_5, e_6 : compression des ressorts.

Les P_i peuvent être soit des moments soit des forces appliquées

Les X_i seront donc soit des rotations soit des translations

Il faut construire A, S et établir le vecteur chargement en vue d'obtenir les déplacements X_i .

4.2. Construction de A et S .

On construit les matrices A et S pour chaque élément discret.

Pour un élément i donné, nous avons :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\cos\alpha}{L} & \frac{\cos\alpha}{L} & \sin\alpha & 0 & -\cos\alpha & 0 \\ -\frac{\sin\alpha}{L} & -\frac{\sin\alpha}{L} & \cos\alpha & 0 & \sin\alpha & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\cos\alpha}{L} & -\frac{\cos\alpha}{L} & 0 & -\sin\alpha & 0 & -\cos\alpha \\ \frac{\sin\alpha}{L} & \frac{\sin\alpha}{L} & 0 & \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} \frac{4EI}{L} & \frac{2EI}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2EI}{L} & \frac{4EI}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2EA}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_2 \end{bmatrix}$$

S et \bar{A} auront la même allure pour chaque élément.

SA et ASA^t sont générées pour chaque élément.

La résolution du système $P = ASA^t \cdot x$ ne se fait qu'après avoir généré la matrice ASA^t globale. La construction de cette dernière se fait par assemblage des ASA^t élémentaires au fur et à mesure de leur formation. Ce procédé peut être schématisé comme suit :

$$\begin{bmatrix} \blacksquare \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \blacksquare \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \blacksquare \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \blacksquare \blacksquare \blacksquare \end{bmatrix}$$

4.3. Algorithmes généraux et utilisation des courbes de mobilisation du frottement latéral.

Après avoir inversé ASA^t (utilisant une procédure d'inversion basée sur la méthode de Gauss-Jordan) et obtenu les X_i tels que $X = [ASA^t]^{-1}P$, il faudra s'assurer de la compatibilité des composantes axiales de X avec les caractéristiques de transfert du sol. Pour cela, on lit dans des courbes de mobilisation du frottement latéral.

Dans le programme élaboré, l'utilisation de ces courbes suit un algorithme bien défini :

1 - Calcul des X_i et par la suite le mouvement de l'élément correspondant (mouvement relatif sol-pieu).

2 - Utilisant une procédure d'interpolation, on lit dans la courbe (τ, δ) le frottement latéral mobilisé par ce mouvement.

3 - Transformer ce frottement latéral unitaire (t/m²) en total (kg) comme ceci :

$$\text{friction (i)} = \tau (i) * \text{périmètre (i)} * \text{longueur (i)}$$

4 - Reconstruire le vecteur P et recalculer les X_i .

C'est un processus itératif dont l'arrêt se fera lorsque le mouvement calculé et celui lu dans les courbes convergeront (selon un seuil de tolérance bien défini évidemment).

* Les déplacements d'éléments sont obtenus à partir de l'élément à l'extrémité inférieure du pieu (NM) qui se déplace comme suit :

$$\Delta (nm) = \text{déplacement en pointe} + X (np - 3) \sin \alpha + X (np - 2) \cos \alpha$$

$$+ \frac{L (nm)}{L (nm) + L (nm - 1)} X (np - 5) \sin \alpha + \frac{L (nm)}{L (nm) + L (nm - 1)} X (np - 4) \cos \alpha$$

Un calcul similaire est effectué pour chaque élément utilisant le déplacement de l'élément inférieur précédent et les déplacements additionnels d'éléments. Le rapport $L_i / (L_i + l_i - 1)$ est utilisé pour obtenir la partie du déplacement nodal total revenant à l'élément considéré.

Le déplacement axial en tout nœud est basé sur $2AE/L$ des éléments adjacents. Ce problème est apparu lors de la construction de la matrice ASA^t à l'étape précédente.

* Le k^{ème} déplacement d'élément ou déplacement relatif pieu-sol est :

$$\text{Déplacement (déplacement total de l'élément)} = \text{Déplacement en pointe} + \sum_{nm}^{nm.k} \varepsilon L_i$$

et cette valeur est utilisée pour obtenir la charge reprise par cisaillement (frottement latéral) le long de cet élément à partir de la courbe appropriée donnant la résistance au cisaillement en fonction du déplacement.

$$\text{Charge de friction} = (L_k) (\tau) \times \text{périmètre du pieu.}$$

La charge de friction élémentaire (relative à l'élément) est utilisée pour réviser (corriger) la matrice P en chaque nœud de haut en bas du pieu. L'inverse de la matrice ASA^t est encore utilisé pour calculer de nouvelles valeurs des X et la procédure itérative se poursuit jusqu'à ce que le glissement actuel et le précédent coïncident conformément à un seuil de tolérance défini ($\leq 0,002$ par exemple).

* Lorsque les valeurs des X, au degré requis de précision, ont été obtenues, elles sont utilisées conjointement avec la matrice élémentaire SA (dont le calcul est refait dans le programme pour des raisons d'économie de mémoire de stockage) pour obtenir les forces élémentaires comme suit :

$$F_i = (SA^t)_i X.$$

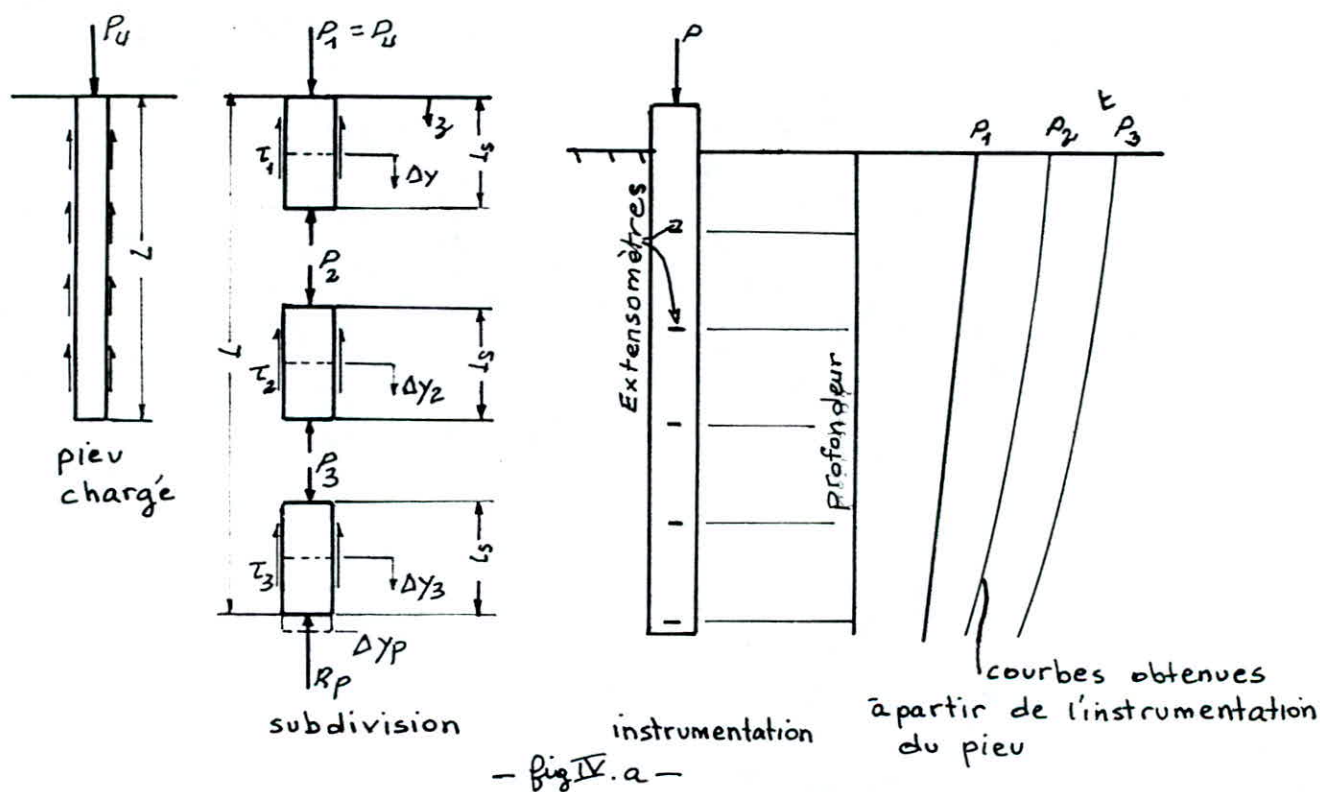
En raison de la formulation utilisée dans la méthode et compte tenu de la définition des valeurs de X, la matrice S doit être ajustée pour assurer la compatibilité.

* Des précautions doivent être prises pour éviter la présence des forces de traction dans le pieu soumis à des charges compressives si le pieu est trop long et si trop de frottement latéral est mobilisé par le sol. Le programme contourne ce problème en imposant des zéros dans la matrice P s'il y a plus de frottement latéral disponible au niveau du segment d'un pieu qu'il n'est nécessaire pour reprendre la force nodale au sommet de ce segment (que ce soit un pieu en traction ou en compression).

* Détermination de la capacité portante à partir des courbes de mobilisation du frottement latéral.

Il s'agit là d'appliquer une méthode basée sur le transfert de charge appelé "méthode du transfert de charge" et dont l'algorithme est le suivant :

1 - Subdiviser le pieu en un nombre convenable de segments (le cas des 3 segments est montré dans la fig. IV. a). Dans le cas où le pieu est subdivisé en un grand nombre d'éléments ou de segments, le calcul à la main est dépassé. Bowles (1974a) a utilisé la méthode des éléments finis et une notation matricielle pour développer un programme permettant l'obtention d'une solution comparable dans une certaine mesure, à celle de la méthode de Coyle et Reese, qui est disponible dans l'ouvrage suscit.



2 - Supposer un petit déplacement en pointe Δy_p (la valeur zéro pourrait être choisie, mais en général la pointe se déplace d'une certaine valeur sous l'effet des charges, sauf éventuellement dans le cas des pieux à résistance en pointe).

3 - Calculer la résistance en pointe P_p due au déplacement en pointe supposé. Modéliser le sol par des ressorts en utilisant le concept de "subgrade reaction" est une méthode, mais la méthode basée sur la théorie élastique peut être également utilisée.

4 - Calculer le déplacement moyen du segment à l'extrémité inférieure du pieu. Pour la première itération, supposer que le déplacement est Δy_p . Ayant cette valeur de glissement, utiliser la courbe appropriée donnant la résistance au cisaillement compatible avec le glissement.

La charge au niveau de l'extrémité supérieure du segment est la charge en pointe + la charge reprise par frottement latéral :

$$P_3 = P_p + \tau_3 L_3 c$$

τ : frottement latéral unitaire

c : périmètre latéral du pieu

Souvent, il y aura une courbe pour chaque segment.

5 - Recalculer le déplacement moyen du segment jusqu'à ce que le glissement utilisé et le glissement calculé soient suffisamment proches. La convergence absolue est quasiment impossible et sa recherche est injustifiée du fait de l'imprécision relative des données d'entrée.

6 - Après avoir convergé au niveau du segment à l'extrémité inférieure du pieu, on passe au segment suivant. Comme première estimation du glissement, utiliser la valeur $\Delta y_p + \Delta y_n$ de l'étape 5. Obtenir la première estimation de la résistance au cisaillement, calculer la charge dans le segment $n-1$ (P_{n-1}), et poursuivre la procédure jusqu'à obtention de convergence satisfaisante.

La charge moyenne dans le segment inférieur est :

$$P_{av} = (P_t + P_b)/2$$

et le glissement moyen correspondant est approximativement (une valeur exacte nécessiterait l'établissement d'une équation différentielle et son intégration sur la longueur du segment)

$$\Delta y_n = P_{av} L / AE + \Delta y_p$$

Dans tout autre segment, la déformation axiale est :

$$\Delta y_{n-i} = P_{av} L_i / AE + \sum_1^i \Delta y_i + \Delta y_p$$

$$P_{av} = (P_t + P_b)/2$$

La charge ultime qui pourrait être appliquée à l'extrémité supérieure du pieu (sommet,) est :

$$P_{ult} = P_p + \sum_1^n \tau_n \cdot L_n \cdot c$$

CHAPITRE V

PROGRAMME

1 - Introduction.

La différence essentielle entre un calcul classique des structures et un calcul de structures en contact avec le sol, telles que fondations (superficielles ou profondes) ou murs de soutènement, réside dans le fait que la présence du sol rend l'analyse plus complexe et nécessite la prise en compte de plusieurs autres paramètres.

Dans le programme élaboré, il y a résolution d'un système d'équations linéaires (procédure classique d'un calcul automatique des structures).

Cependant, cette résolution est faite dans le respect du comportement de sol adopté (comportement élastique), et ce, en introduisant les algorithmes exposés dans le chapitre précédent, en vue d'aboutir à des résultats réalistes et fiables.

2 - Options et capacités du programme.

Le Programme traite, pour des pieux verticaux ou inclinés, les éléments suivants selon le souhait de l'utilisateur :

- La capacité portante ultime du pieu et sa réponse, c'est-à-dire, effet de déplacement-rotation et force agissant dans les éléments du pieu, étant donné un déplacement en pointe, ou bien un pourcentage de charge repris par la pointe ou encore pour un pieu en friction.

- Les déplacements et efforts aux nœuds pour un chargement donné.

- Les courbes de chargement.

- La réponse de pieux partiellement enfoncés (avec ou sans mouton).

- Le pieu peut être de formes diverses : rond, carré, pieu en "H".

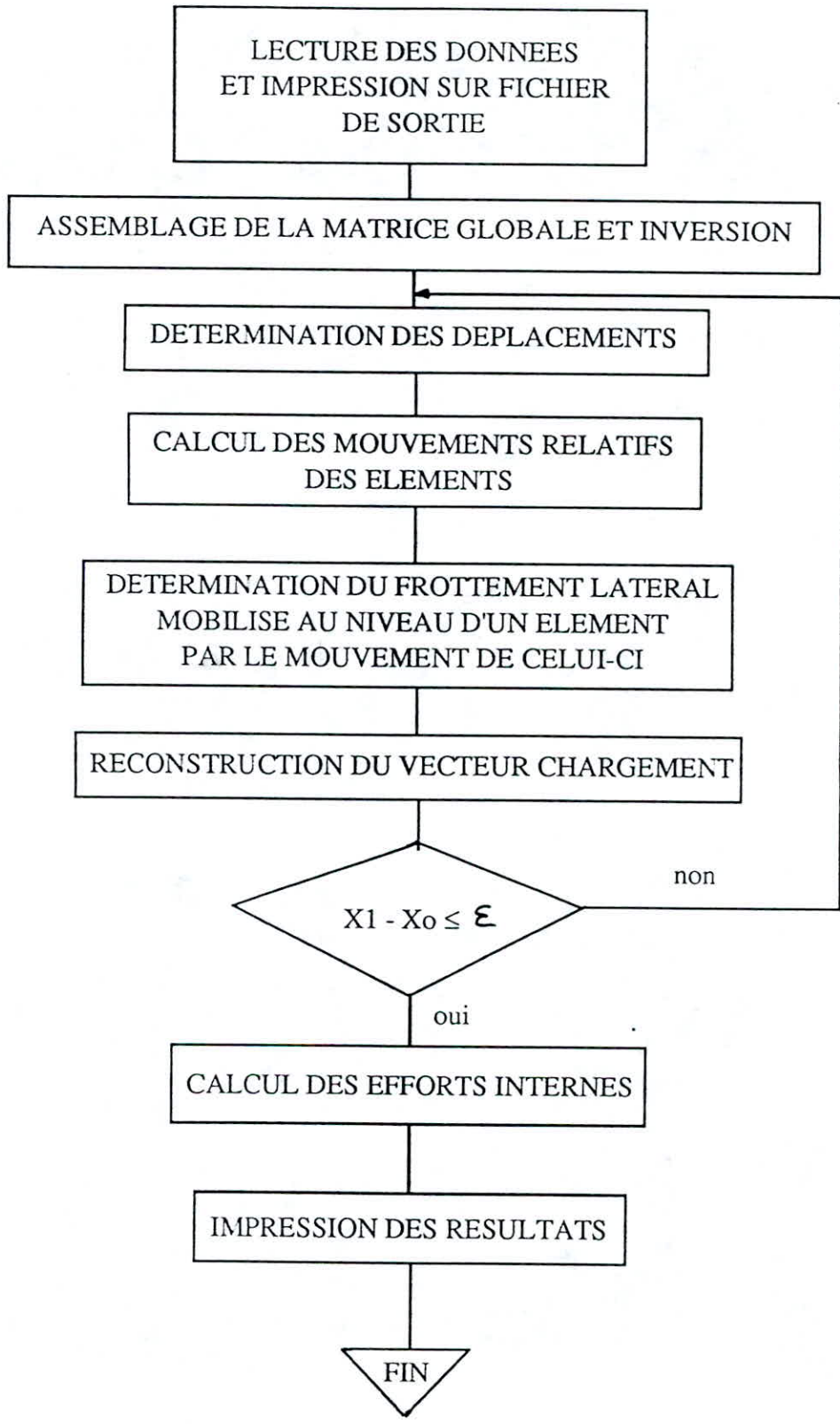
La variabilité de l'inertie ainsi que de la longueur des éléments peuvent être accommodées.

- Un nombre non limité de courbes de mobilisation du frottement latéral peut être utilisé.

Ces courbes doivent être lues dans l'ordre de haut en bas avec instructions à l'ordinateur du nombre d'éléments de pieu à utiliser pour un ensemble de courbes de données.

- Toute variation raisonnable du module du sol avec la profondeur peut être utilisée

3 - Organigramme.



4 - Vérification de la validité des résultats :

Dans des problèmes complexes comme celui-ci, il est important de faire un nombre adéquat de vérifications. Des parties des résultats peuvent être systématiquement vérifiées comme suit :

1 - Les moments $F(1)$ et $F(2)$ d'éléments adjacents doivent être égaux et de signes opposés.

2 - Les forces axiales $F(3)$ de l'élément $i + 1$ et $F(4)$ de l'élément i doivent être égales et de signes opposés.

3 - Les forces dans les ressorts latéraux de sol $F(5)$ et $F(6)$ doivent être ajoutées au niveau des nœuds intérieurs pour obtenir la force nodale dans le ressort. Il est à noter également que l'effet nodal et l'effet de l'élément sont de signes opposés.

4 - $\sum M = 0$ pour l'élément 1 à l'extrémité inférieure et $\sum M = 0$ pour le pieu en entier.

5 - $\sum F_h = 0$, $\sum F_v = 0$ pour le pieu en entier et doit inclure l'effet du frottement latéral. En général, les trois équations de l'équilibre statique sont satisfaites au niveau de chaque nœud, alors qu'elles ne le sont pas pour les segments du pieu pris individuellement.

CHAPITRE VI

EXEMPLES

Exemple 1

Détermination de la reponse d'un pieu chargé comme suit:

Ph=12.5 kips
M =50 kips.ft

nombre de degrés de liberte du pieu : 16
 nombre d'éléments de pieu : 5
 nombre de charges appliquées : 2
 angle d'inclinaison : 90.00
 module de Young : 30000 Kips/in²
 longueur du pieu : 40.000 ft
 valeur de la raideur en pointe : 100 Kips/ft²
 valeur initiale de la deflection : 0 ft
 deflection horizontale max : 2.000 in
 caractéristiques mécaniques du sol : $K_s = 10+2Z^{**1}$ (Kips/ft³)
 conditions de chargement : 1
 nombre de cas de chargement : 1

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES SEGMENTS DE PIEU

élément	longueur (ft)	inertie (in ⁴)	largeur (in)	perimètre (in)	aire (in ²)
1	8.000	566.50	12.200	10.000	200.000
2	8.000	566.50	12.200	10.000	200.000
3	8.000	566.50	12.200	10.000	200.000
4	8.000	566.50	12.200	10.000	200.000
5	8.000	566.50	12.200	10.000	200.000

RAIDEURS NODALES DU SOL : (Kips/ft)

élément	noeud supérieur	noeud inférieur
1	31.1778	84.0444
2	127.4122	149.1111
3	192.4889	214.1778
4	257.5656	279.2444
5	322.6422	344.3111

CALCUL DU COMPORTEMENT DU PIEU (EFFORTS-DEPLACEMENTS)

EFFORTS DANS LES SEGMENTS DE PIEU

	effort normal (kips)	effort tranchant (kips)	moment fléchissant (kips.ft ²)
element 1	0.000 0.000	4.956 4.764	50.000 -110.354
element 2	0.000 0.000	7.222 0.832	110.354 -74.824
element 3	0.000 0.000;	1.075 -1.353	74.824 -24.036
element 4	0.000 0.000	-1.627 -0.845	24.036 2.913
element 5	0.000 0.000	-0.977 0.000	-2.913 15.289

DEPLACEMENTS NODAUX

noeud	dep vertical (ft)	dep horizontal (ft)	Rotation (rad)
1	0.000	0.159	0.015
2	0.000	0.057	0.010
3	0.000	0.006	0.003
4	0.000	-0.006	0.000
5	0.000	-0.003	-0.001
6	0.000	-0.002	-0.000

somme des forces horizontales : 14.047 Kips

force horizontale appliquée : 12.5000 Kips

résistance en pointe : 0.000 Kips

deplacements en tête de pieu :

horizontal : 1.9074 in

vertical : -0.0363 in

rotation : 0.0152 rad

Exemple 1'

Idem que l'exemple 1, avec, cette fois-ci 10 segments.

nombre de degrés de liberté du pieu : 33
 nombre d'éléments de pieu : 10
 nombre de charges appliquées : 2
 angle d'inclinaison : 90.00
 module de Young : 30000 Kips/in²
 longueur du pieu : 40.000 ft
 valeur de la raideur en pointe : 100.000 Kips/ft²
 valeur initiale de la deflection : 0.000 ft
 deflection horizontale max : 2.000 in
 caractéristiques mécaniques du sol : $K_s = 10+2*Z**1$ (Kips/ft³)
 conditions de chargement : 1
 nombre de cas de chargement : 1

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES SEGMENTS DE PIEU

element	longueur (ft)	inertie (in ⁴)	largeur (in)	perimètre (in)	aire (in ²)
1	4.000	566.50	12.200	10.000	20.000
2	4.000	566.50	12.200	10.000	20.000
3	4.000	566.50	12.200	10.000	20.000
4	4.000	566.50	12.200	10.000	20.000
5	4.000	566.50	12.200	10.000	20.000
6	4.000	566.50	12.200	10.000	20.000
7	4.000	566.50	12.200	10.000	20.000
8	4.000	566.50	12.200	10.000	20.000
9	4.000	566.50	12.200	10.000	20.000
10	4.000	566.50	12.200	10.000	20.000

RAIDEURS NODALES DU SOL : (Kips/ft)

element	noeud supérieur	noeud inférieur
1	12.8778	31.1778
2	42.0222	47.4444
3	58.2889	63.7111
4	74.5556	79.9778
5	90.8222	96.2444
6	107.0889	112.5111
7	123.3556	128.7778
8	139.6222	145.0444
9	155.8889	161.3111
10	172.1556	177.5778

EFFORTS DANS LES SEGMENTS DE PIEU

	effort normal (kips)	effort tranchant (kips)	moment fléchissant (kips.ft2)
element 1	0.000 0.000	2.010 3.096	50.000 -91.959
element 2	0.000 0.000	4.173 2.577	91.959 -104.842
element 3	0.000 0.000	3.166 1.467	104.842 -94.752
element 4	0.000 0.000	1.717 0.343	94.752 -71.927
element 5	0.000 0.000	0.390 -0.458	71.927 -46.170
element 6	0.000 0.000	-0.509 -0.839	46.170 -24.281
element 7	0.000 0.000	-0.920 -0.864	24.281 -9.431
element 8	0.000 0.000	-0.937 -0.656	9.431 -1.784
element 9	0.000 0.000	-0.705 -0.317	1.784 0.419
element 10	0.000 0.000	-0.339 0.105	-0.419 -0.000

DEPLACEMENTS NODAUX

noeud	dep vertical (ft)	dep horizontal (ft)	Rotation (rad)
1	0.000	0.156	0.015
2	0.000	0.099	0.013
3	0.000	0.054	0.010
4	0.000	0.023	0.006
5	0.000	0.004	0.003
6	0.000	-0.005	0.001
7	0.000	-0.007	0.000
8	0.000	-0.007	-0.000
9	0.000	-0.005	-0.001
10	0.000	-0.002	-0.001
11	0.000	-0.001	-0.000

somme des forces horizontales : 12.500 Kips

force horizontale appliquée : 12.5000 Kips

résistance en pointe : 0.000 Kips

deplacements en tête de pieu :

horizontal : 1.8732 in

vertical : 0.0000 in

rotation : 0.0153 rad

Remarques :

Le moment obtenu au noeud 3 est de 108 kips.ft;

Le noeud 3 est equivalent au noeud de l'exemple précédent,
le moment y agissant est de 110.2 kips.ft.

On constate donc que le fait d'utiliser plus de segments
(ie de discretiser d'avantage) n'influerait pas de manière notable
sur les résultats finaux.

Les equations de l'équilibre statique sont vérifiées (12.5).

Exemple 2

calcul du comportement du pieu soumis à un chargement général:

Ph= 10 kips
 Pv= -75 kips
 M = 15 kips.ft

nombre de degres de liberte du pieu : 12
 nombre d'éléments de pieu : 3
 nombre de charges appliquées : 3
 angle d'inclinaison : 30,00
 module de Young : 30000 Kips/in2
 longueur du pieu : 50,000 ft
 valeur de la raideur en pointe : 200 Kips/ft2
 valeur initiale de la deflection : -0,188 ft
 deflection horizontale max : 2,500 in
 caractéristiques mécaniques du sol : $K_s = 10+10 \times I \times 0,67$ (Kips/f
 conditions de chargement : 1
 nombre de cas de chargement : 1

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES SEGMENTS DE PIEU

element	longueur (ft)	inertie (in ⁴)	largeur (ft)	perimètre (ft)	aire (in ²)
1	15,000	733,10	14,586	4,700	21,460
2	20,000	733,10	14,586	4,700	21,460
3	15,000	733,10	14,586	4,700	21,460

RAIDEURS NODALES DU SOL : (Kips/ft)

element	noeud supérieur	noeud inférieur
1	114,3280	475,1349
2	1073,4730	1165,4994
3	1180,4608	1169,2772

CALCUL DU COMPORTEMENT DU PIEU (EFFORTS-DEPLACEMENTS)

EFFORTS DANS LES SEGMENTS DE PIEU

	effort normal (kips)	effort tranchant (kips)	moment fléchissant (kips.ft ²)
element 1	-72.124 69.093	17.528 3.363	15.000 -95.149
element 2	-69.093 56.385	7.613 -3.518	95.149 17.504
element 3	-56.385 37.903	-3.282 1.167	-17.504 0.000

DEPLACEMENTS NODAUX

noeud	dep vertical (ft)	dep horizontal (ft)	Rotation (rad)
1	-0.022	0.119	0.010
2	-0.003	0.007	0.004
3	-0.001	-0.003	-0.001
4	-0.001	-0.002	-0.000

somme des forces horizontales : -9.704 Kips
 force horizontale appliquée : 10.0000 Kips
 résistance en pointe : 38.487 Kips

deplacements en tête de pieu :
 horizontal : 1.4335 in
 vertical : -2.2953 in
 rotation : 0.0097 rad

DETERMINATION DE LA CAPACITE PORTANTE DU PIEU

capacité portante du pieu : 101.543 Kips

Exemple 3

Tracé de la courbe de chargement pour le pieu de l'exemple précédent, on fait varier le chargement de 20 à 250 kips. (on utilise 10 segments de pieu)

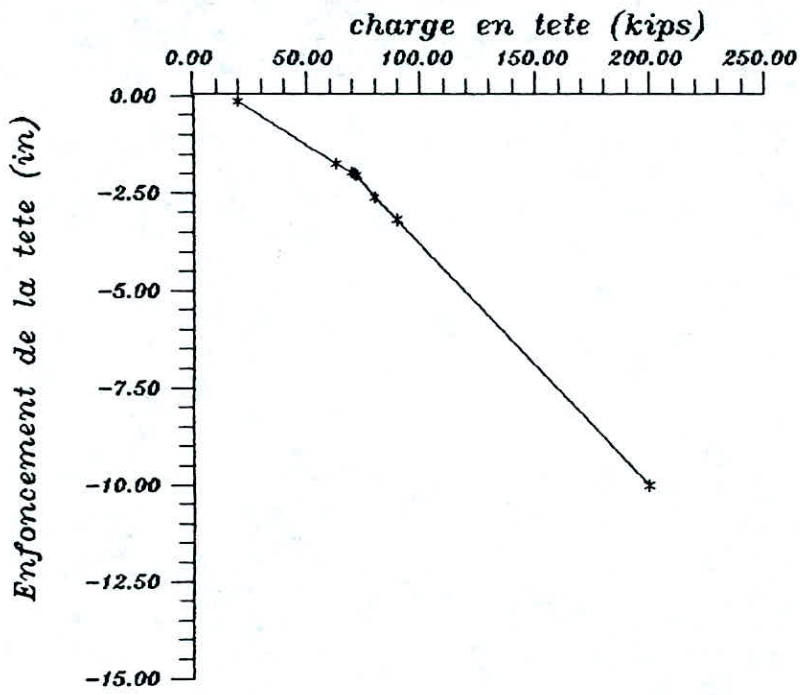
nombre de degres de liberte du pieu : 33
 nombre d'éléments de pieu : 10
 nombre de charges appliquées : 1
 angle d'inclinaison : 90.00
 module de Young : 30000 Kips/in²
 longueur du pieu : 50 ft
 valeur de la raideur en pointe : 260 Kips/ft²
 valeur initiale de la deflection : -0.005 ft
 deflection horizontale max : 2.000 in
 caractéristiques mécaniques du sol : $K_s = 10 + 10*Z**0.67$ (Kips/f
 conditions de chargement : 1
 nombre de cas de chargement : 9

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES SEGMENTS DE PIEU

element	longueur (ft)	inertie (in ⁴)	largeur (in)	perimetre (in)	aire (in ²)
1	5.000	733.10	14.586	4.700	21.460
2	5.000	733.10	14.586	4.700	21.460
3	5.000	733.10	14.586	4.700	21.460
4	5.000	733.10	14.586	4.700	21.460
5	5.000	733.10	14.586	4.700	21.460
6	5.000	733.10	14.586	4.700	21.460
7	5.000	733.10	14.586	4.700	21.460
8	5.000	733.10	14.586	4.700	21.460
9	5.000	733.10	14.586	4.700	21.460
10	5.000	733.10	14.586	4.700	21.460

RAIDEURS NODALES DU SOL : (Kips/ft)

element	noeud supérieur	noeud inférieur
1	31.6044	92.9860
2	138.0225	155.6230
3	187.7025	202.4911
4	230.3661	243.5812
5	268.8831	281.0392
6	304.5263	315.9000
7	338.0069	348.7687
8	369.7745	380.0388
9	400.1362	409.9845
10	429.3257	438.8185



Exemple 4

Comportement du pieu soumis à un chargement latéral
 $P_h=30$ KN (on utilise 10 segments de pieu).

nombre de degrés de liberté du pieu : 33
 nombre d'éléments de pieu : 10
 nombre de charges appliquées : 1
 angle d'inclinaison : 90.00
 module de Young : 20409.1808 KN/cm²
 longueur du pieu : 15 m
 valeur de la raideur en pointe : 1200 KN/m²
 valeur initiale de la deflection : 0.02 m
 deflection horizontale max : 7.500 cm
 caractéristiques mécaniques du sol : $K_s = 1570 + 3500 * Z^{*0.67}$ (KN/m³)
 conditions de chargement : 1
 nombre de cas de chargement : 1

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES SEGMENTS DE PIEU

élément	longueur (m)	inertie (cm ⁴)	largeur (cm)	perimètre (cm)	aire (cm ²)
1	1.500	30510.0	37.05	143.00	138.400
2	1.500	30510.0	37.05	143.00	138.400
3	1.500	30510.0	37.05	143.00	138.400
4	1.500	30510.0	37.05	143.00	138.400
5	1.500	30510.0	37.05	143.00	138.400
6	1.500	30510.0	37.05	143.00	138.400
7	1.500	30510.0	37.05	143.00	138.400
8	1.500	30510.0	37.05	143.00	138.400
9	1.500	30510.0	37.05	143.00	138.400
10	1.500	30510.0	37.05	143.00	138.400

RAIDEURS NODALES DU SOL : (KN/m)

element	noeud supérieur	noeud inférieur
1	3771.3811	11087.5983
2	16448.9819	18544.2387
3	22363.1561	24123.6712
4	27442.0644	29015.2558
5	32027.3335	33474.4542
6	36270.4897	37624.4770
7	40256.2038	41537.3476
8	44037.9852	45259.9035
9	47652.4092	48824.8011
10	51127.2757	52257.3585

CALCUL DU COMPORTEMENT DU PIEU (EFFORTS-DEPLACEMENTS)

EFFORTS DANS LES SEGMENTS DE PIEU

	effort normal (KN)	effort tranchant (KN)	moment fléchissant (KN.m)
element 1	0.000 0.000	2.339 4.921	-0.000 -41.491
element 2	0.000 0.000	7.301 5.331	41.491 -64.650
element 3	0.000 0.000	6.429 3.937	64.650 -70.170
element 4	0.000 0.000	4.478 2.157	70.170 -63.068
element 5	0.000 0.000	2.381 0.593	63.068 -49.157
element 6	0.000 0.000	0.643 -0.507	49.157 -33.393
element 7	0.000 0.000	-0.543 -1.129	33.393 -19.204
element 8	0.000 0.000	-1.197 -1.384	19.204 -8.503
element 9	0.000 0.000	-1.457 -1.425	8.503 -2.064
element 10	0.000 0.000	-1.492 -1.376	2.064 0.000

DEPLACEMENTS NODAUX

noeud	dep vertical (m)	dep horizontal (m)	Rotation (rad)
1	0.00000	0.00062	0.0001
2	0.00000	0.00044	0.0001
3	0.00000	0.00029	0.0001
4	0.00000	0.00016	0.0001
5	0.00000	0.00007	0.0000
6	0.00000	0.00002	0.0000
7	0.00000	-0.00001	0.0000
8	0.00000	-0.00003	0.0000
9	0.00000	-0.00003	0.0000
10	0.00000	-0.00003	-0.0000
11	0.00000	-0.00003	-0.0000

somme des forces horizontales : 30.000 KN

force horizontale appliquée : 30.0000 KN

résistance en pointe : 0.000 KN

deplacements en tête de pieu :

horizontal :0.00744 cm

vertical :0.00000 cm

rotation :0.00012 rad

Exemple 5

Calcul du comportement du pieu soumis à un chargement latéral
 $P_h=50 \text{ KN}$.

nombre de degres de liberte du pieu : 33
 nombre d'éléments de pieu : 10
 nombre de charges appliquées : 1
 angle d'inclinaison : 90.00
 module de Young : 20409.1808 KN/cm²
 longueur du pieu : 15.000 m
 valeur de la raideur en pointe : 1200 KN/m²
 valeur initiale de la deflection : 0.020 m
 deflection horizontale max : 7.500 cm
 caractéristiques mécaniques du sol : $K_s = 1570 + 3500 * Z^{0.67}$ (kN/m³)
 conditions de chargement : 1
 nombre de cas de chargement : 1

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES SEGMENTS DE PIEU

element	longueur (m)	inertie (cm ⁴)	largeur (cm)	perimètre (cm)	aire (cm ²)
1	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
2	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
3	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
4	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
5	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
6	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
7	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
8	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
9	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
10	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400

RAIDEURS NODALES DU SOL : (KN/M)

element	noeud supérieur	noeud inférieur
1	452.5657	1330.5118
2	1973.8778	2225.3086
3	2683.5787	2894.8405
4	3293.0477	3481.8307
5	3843.2800	4016.9345
6	4352.4588	4514.9372
7	4830.7445	4984.4817
8	5284.5582	5431.1884
9	5718.2891	5858.9761
10	6135.2731	6270.8830

CALCUL DU COMPORTEMENT DU PIEU (EFFORTS-DEPLACEMENTS)

EFFORTS DANS LES SEGMENTS DE PIEU

	effort normal (kN)	effort tranchant (kN)	moment fléchissant (kN.m ²)
element 1	0.000 0.000	8.150 13.471	0.000 -62.775
element 2	0.000 0.000	19.986 9.364	62.775 -75.365
element 3	0.000 0.000	11.293 2.396	75.365 -56.969
element 4	0.000 0.000	2.726 -1.881	56.969 -30.890
element 5	0.000 0.000	-2.077 -3.039	30.890 -10.749
element 6	0.000 0.000	-3.293 -2.379	10.749 -0.104
element 7	0.000 0.000	-2.546 -1.243	0.104 3.153
element 8	0.000 0.000	-1.317 -0.339	-3.153 2.569
element 9	0.000 0.000	-0.357 0.223	-2.569 0.943
element 10	0.000 0.000	0.233 0.628	-0.943 0.000

DEPLACEMENTS NODAUX

noeud	dep vertical (m)	dep horizontal (m)	Rotation (rad)
1	0.000	0.018	0.006
2	0.000	0.010	0.005
3	0.000	0.004	0.003
4	0.000	0.001	0.001
5	0.000	-0.001	0.000
6	0.000	-0.001	-0.000
7	0.000	-0.001	-0.000
8	0.000	-0.000	-0.000
9	-0.000	-0.000	-0.000
10	0.000	0.000	-0.000
11	0.000	0.000	-0.000

somme des forces horizontales : -50.000 KN

force horizontale appliquée : 50.0000 KN

résistance en pointe : 0.000 KN

deplacements en tête de pieu :

horizontal : 1.8008 cm

vertical : 0.0000 cm

rotation : 0.0055 rad

Exemple 6

Tracé de la courbe de réaction d'un pieu chargé latéralement
On fait varier le chargement de 50 à 300 KN.

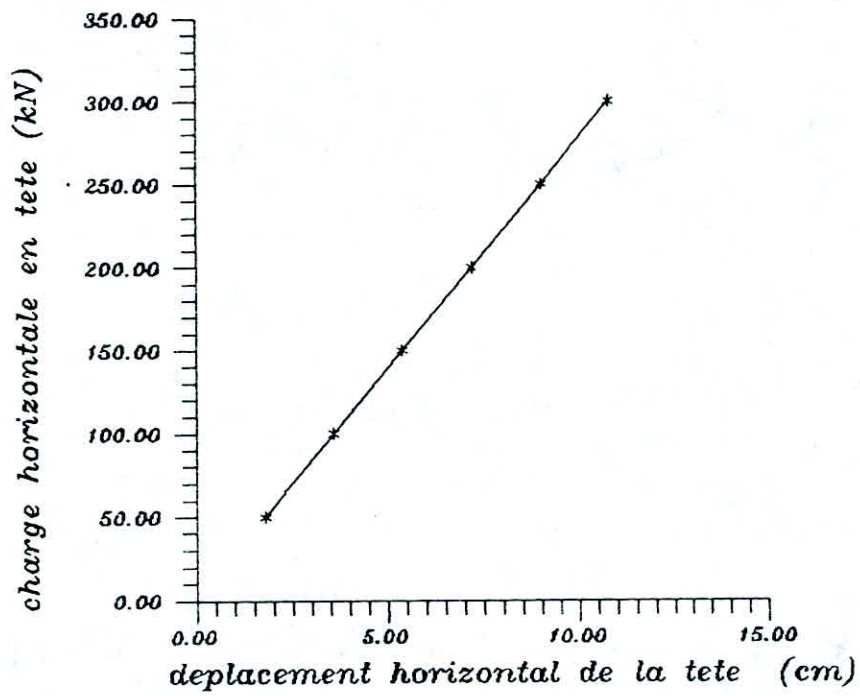
nombre de degres de liberte du pieu : 33
 nombre d'éléments de pieu : 10
 nombre de charges appliquées : 1
 angle d'inclinaison : 90.00
 module de Young : 20409.1808 KN/cm2
 longueur du pieu : 15.000 m
 valeur de la raideur en pointe : 1200.000 KN/m2
 valeur initiale de la deflection : 0.02 m
 deflection horizontale max : 7.500 cm
 caractéristiques mécaniques du sol : $K_s = 1570 + 3500 * Z^{*0.67}$ (KN/m2)
 conditions de chargement : 1
 nombre de cas de chargement : 5

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES SEGMENTS DE PIEU

element	longueur (cm)	inertie (cm ⁴)	largeur (cm)	perimètre (cm)	aire (cm ²)
1	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
2	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
3	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
4	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
5	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
6	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
7	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
8	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
9	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400
10	1.500	30510.00	37.050	143.000	138.400

RAIDEURS NODALES DU SOL : (KN/m)

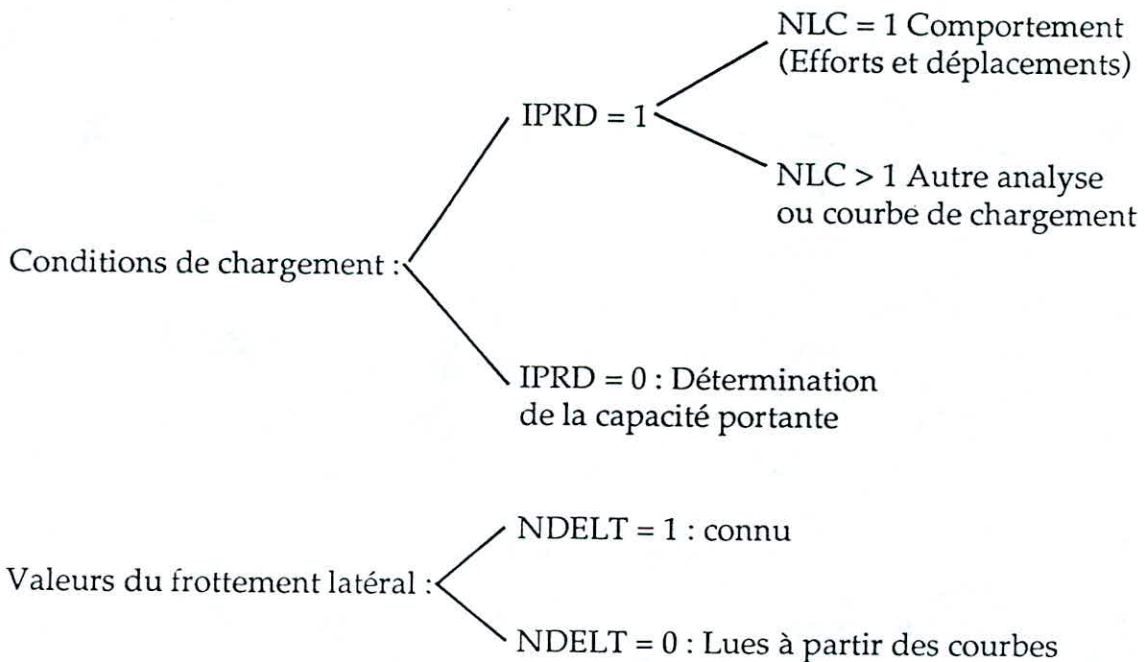
element	noeud supérieur	noeud inférieur
1	452.5657	1330.5118
2	1973.8778	2225.3086
3	2683.5787	2894.8405
4	3293.0477	3481.8307
5	3843.2800	4016.9345
6	4352.4588	4514.9372
7	4830.7445	4984.4817
8	5284.5582	5431.1884
9	5718.2891	5858.9761
10	6135.2731	6270.8830



ANNEXE I

Structure du fichier d'entrée des données

Nombre total de degrés de liberté du système
Nombre d'éléments discrets
Nombre de charges non nulles
Nombre de courbes de mobilisation du frottement latéral
Numéro du nœud où commence le sol
Angle d'inclinaison du pieu
Module de Young du matériau constitutif
Longueur du pieu
Résistance en pointe du pieu
Section de la pointe
Pourcentage repris par la pointe
Valeur initiale de la déflexion de la pointe
Déplacement max du pieu
Caractéristiques du sol : A_s , b_s , expo.



Caractéristiques géométriques des segments de pieu : longueur - inertie - largeur -
Périmètre et aire.

Lecture de toutes les courbes de chargement,

Pour lire ces courbes on prend un nombre (nb point) de points de la courbe pour
pouvoir effectuer une interpolation correcte.

ANNEXE II

Cas des sols stratifiés

Le sol sur lequel repose une fondation est le plus souvent constitué de plusieurs couches de caractéristiques distinctes.

Pour chaque couche, on adopte une variation linéaire du module de réaction latéral, c'est le cas le plus courant en Europe et en Algérie.

Une variation plus générale est adoptée aux USA et au Canada : variation parabolique par exemple.

Le problème, dans le cas des sols stratifiés, se pose au niveau des couches de transition.

Il n'y a pas passage direct d'une couche à une autre. Il s'agit d'un passage progressif, c'est cette portion qui est appelée couche de transition.

La question qui se pose : Quelle valeur de K_s prendra-t-on à l'interface ?

La solution adoptée est la suivante :

Après avoir délimité une interface nette entre les différentes couches et décomposé le pieu en segments égaux, on calcule le module de réaction dans chaque nœud en respectant la loi de variation adoptée excepté les nœuds se trouvant aux interfaces.

Pour calculer K_s dans ces nœuds, on fait la moyenne de K_s des nœuds se trouvant de part et d'autre de l'interface (interpolation linéaire).

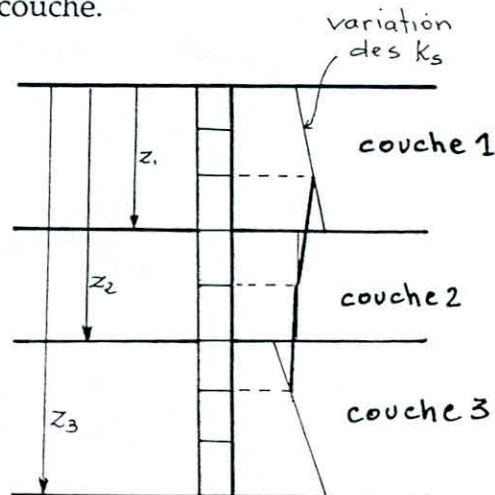
Cette solution assure la continuité de la déformée.

En supposant un pieu enfoncé dans un sol constitué de trois couches distinctes, on considère des variations de K_s différentes dans chaque couche.

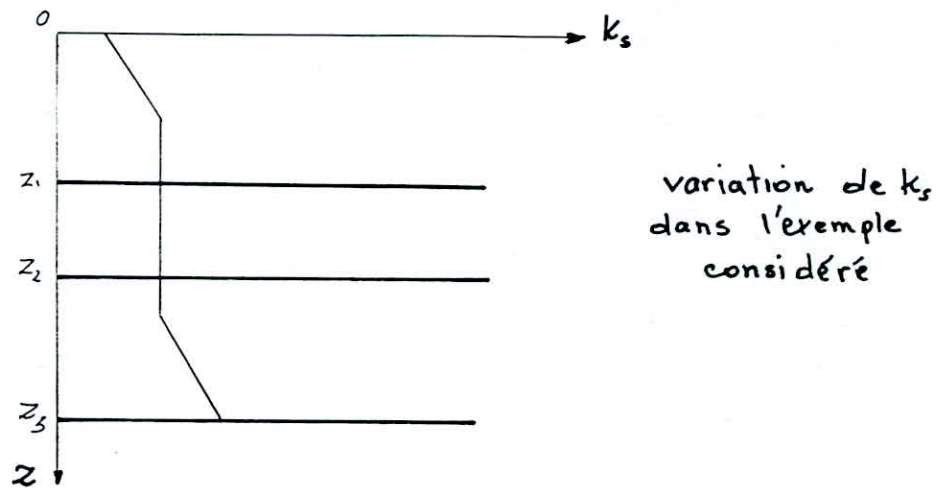
$$\text{Couche 1 : } K_s(z) = b_1 * Z + a_1 \quad 0 \leq Z \leq Z_1$$

$$\text{Couche 2 : } K_s(z) = a_2 \quad Z_1 \leq Z \leq Z_2$$

$$\text{Couche 3 : } K_s(z) = b_3 + Z \quad Z_2 \leq Z \leq Z_3$$



La variation de K_s dans l'exemple considéré aura donc la forme suivante :



La validité de la solution adoptée est testée comme suit :

On considère un exemple donné pour lequel le pieu est enfoncé dans un monocouche.

Le sol étant constitué d'une seule couche, on résoud le problème en divisant cette couche en deux pour lesquelles les lois de variation de K_s sont les mêmes.

Les résultats obtenus sont comparés avec ceux obtenus en considérant la couche unique et la même variation de K_s .

ANNEXE III

Détermination de la courbe de mobilisation du frottement latéral à partir d'un essai statique

* Un essai statique de pieu a pour but d'éprouver une fondation profonde en la sollicitant suivant un programme bien déterminé, en vue d'évaluer sa capacité portante.

Il consiste à appliquer des charges Q_0 sur la tête du pieu, par palier, puis à mesurer les déplacements s_0 correspondants de la tête.

Pour connaître la distribution des efforts le long du fût, et notamment en pointe, on instrumente le pieu par du matériel de mesure complémentaire.

Il s'agit essentiellement d'extensomètres installés le long du fût du pieu, afin de pouvoir étudier la mobilisation du frottement latéral et la résistance de pointe.

Les extensomètres sont constitués par des jauges de contraintes (pieux métalliques) ou des cordes vibrantes noyées dans le béton.

Moyennant un programme de travail bien déterminé (chargement, feuillet de relevé de mesures pour chaque palier, différentes lectures) on tire différentes relations.

Celles-ci sont présentées sous forme de graphiques, comme indiqué sur les figures A1, A2, A3, celles-ci illustrent un cas réel.

- La figure A1 représente la courbe dite de chargement, qui s'obtient en portant en abscisse la charge appliquée en tête Q_0 (mesurée directement au dynamomètre ou indirectement à l'aide de manomètres) et en ordonnée, le déplacement vertical de la tête du pieu s_0 .

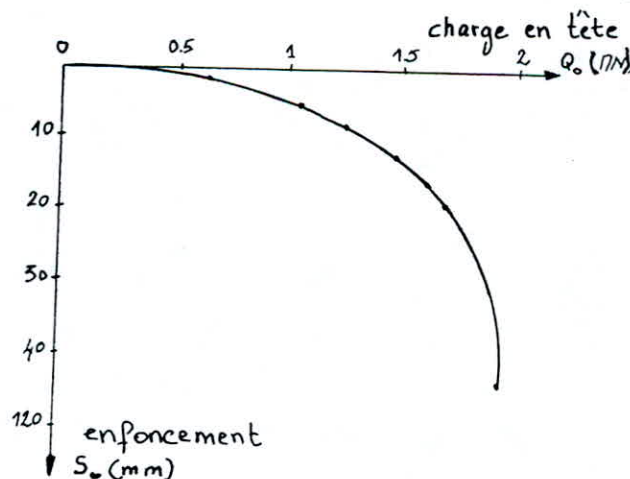


Fig. A1. - Exemple de relation "Charge en tête - Déplacements verticaux"
obtenue pour un pieu foré

- La figure A2 représente l'ensemble des relations "déplacement vertical de la tête - logarithme du temps" pour chaque palier. Chacune d'elles s'obtient en portant en abscisse, sur échelle logarithmique la durée d'application t du palier et en ordonnée le déplacement vertical moyen correspondant de la tête du pieu s_0 . On obtient ainsi une famille de relations comportant généralement en fin de palier une partie droite appelée "droite de stabilisation".

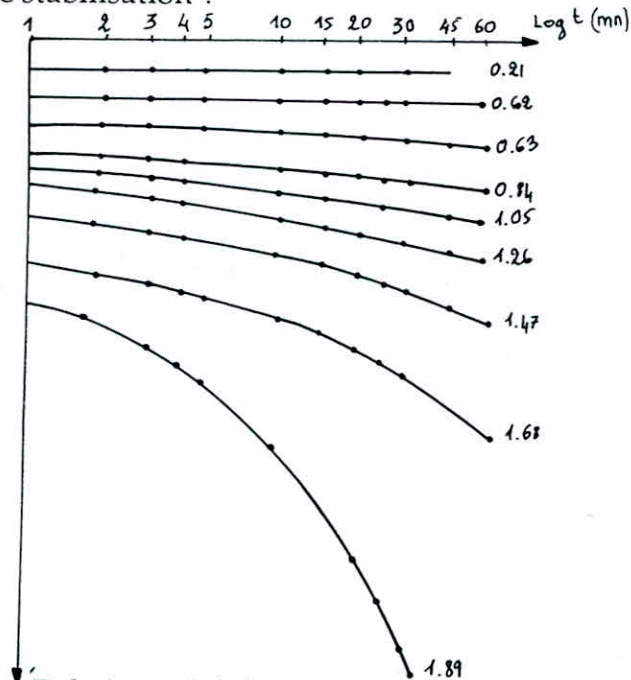


Fig. A2. - Relations "Déplacement de la tête - Logarithme du temps" obtenues pour le pieu précédent

- La figure A3 représente la relation "Charge en tête-pente des droites de stabilisation". On l'obtient en portant en abscisse la charge en tête Q_0 et en ordonnée la pente des droites de stabilisation (α). Le graphique ainsi obtenu, présente, dans certains cas, et si l'essai a été poussé suffisamment loin, deux segments de droite qui se coupent en un point dont l'abscisse indique ce qu'il est convenu d'appeler la charge critique de fluage Q_c du pieu (charge de fluage).

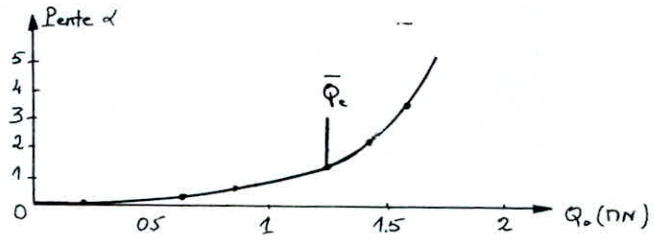


Fig. A3. - Exemple de construction graphique Q_0 — comportant un premier segment de droite prolongé par une courbe. La charge Q_c est située à la jonction droite - courbe

Dans d'autres cas, le premier segment débouche sur une partie courbe et on considère alors que la charge Q_c se situe à la jonction du segment et de la courbe. C'est ce cas qui est illustré en A3.

Dans le cas où le pieu est équipé d'extensomètres, il y a lieu de fournir pour chaque palier :

- Les raccourcissements unitaires $\Delta l/l$ du fût.
- La distribution des efforts le long du fût pour chaque palier (fig. A4).
- Les courbes de mobilisation du frottement latéral unitaire pour les différents niveaux du fût en fonction de leur déplacement y (fig. A5).

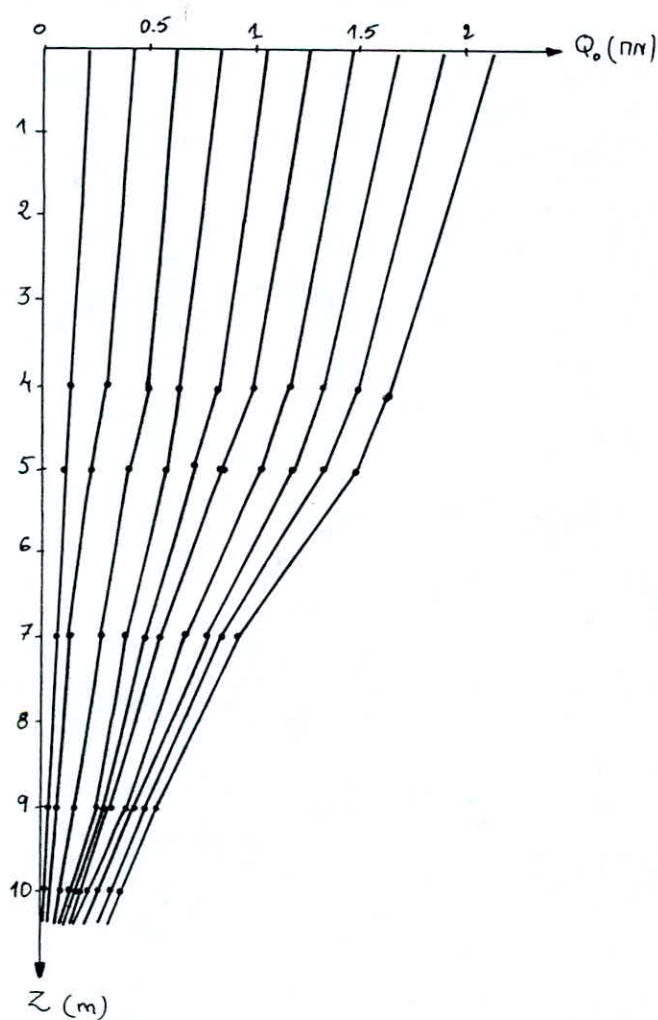


Fig. A4. - Exemple de distribution des efforts le long du pieu

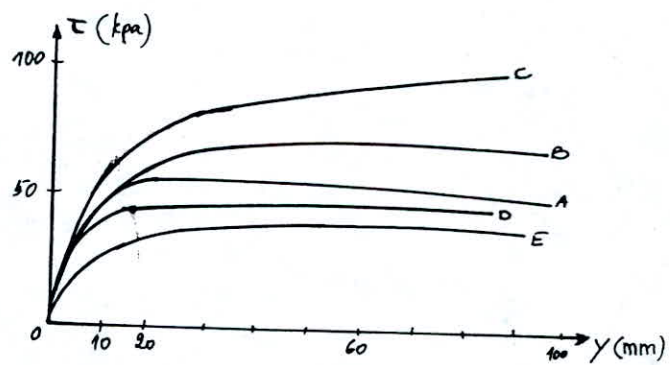


Fig. A5. - Courbes de mobilisation du frottement latéral unitaire pour le pieu de la figure A4.

CONCLUSION

Le travail effectué dans le cadre de ce projet a trait à l'analyse du comportement et au calcul d'un pieu isolé soumis à un chargement axial et/ou latéral.

Après l'analyse des principaux éléments du comportement d'un pieu isolé dans les conditions de chargement sus-citées, il a été procédé à l'élaboration d'un programme de calcul de pieu sur la base de la méthode de J. E. Bowles, méthode basée sur un calcul en déplacement.

Ce programme a permis l'obtention du déplacement horizontal et/ou vertical et/ou la rotation en tête de pieu, ainsi que la distribution des moments fléchissants, des efforts tranchants et des déplacements en fonction de la profondeur.

Enfin, et aux fins de valider les résultats obtenus par le programme développé, une investigation comparative a été effectuée dans le but de confronter ces résultats à des résultats expérimentaux et s'est avérée concluante.

Dans l'optique de recherches futures, il serait intéressant de traiter ,entre autres ,les points suivants :

- établir des lois mathématiques régissant le phénomène de mobilisation du frottement latéral.
- considérer un comportement élasto-plastique du sol.
- tenir compte de la non-linéarité du sol.
- Considérer une variation plus générale du module de réaction latéral K_s .

BIBLIOGRAPHIE

— Joseph E. Bowles :

"Foundation Engineering and design" (1984)

"Analytical and computer methods in foundation engineering"
(1974)

— Leonards :

"Fondations"

— G. Costet :

"Cours pratique de mécanique des sols", tome II (1983)

— Philipponat :

"Mécanique des sols et des fondations"

— F. Bonnechère :

"Fondations indirectes" (1984)

— Teng :

"Fondations"

— M. Cassan :

"Les essais *in situ* en mécanique des sols", tomes I et II

— R. Frank :

"Etudes théoriques des fondations profondes et d'essais en place par
autoforage"

Rapport n° 128 (1984)

"Etude des pieux soumis à des poussées latérales par la méthode du module
de réaction"

Rapport n° 107 (1981)

"Etude théorique du comportement des pieux sous charge verticale"

Rapport n° 46 (1975)

"Déplacement axial des pieux dans les sols mous"

Symposium franco-soviétique, Moscou (Avril 1989)

— M. Bustamente et Al. :

"Essai statique de pieux isolés sous charge axiale"
Méthode d'essai n° 31 (1989)

"Evaluation de quelques méthodes de calcul des pieux forés"
Revue française géotechnique n° 54 (1991)

"Le dimensionnement des fondations profondes"
Bulletin de liaison LCPC n° 149 (1987)

"Prévision de la courbe de chargement des fondations
profondes isolées"

Congrès international de mécanique des sols, Rio-de-Janeiro .

— S. Christoulas :

"Déplacement des pieux sous charge horizontale"
Bulletin de liaison spécial, Paris (Mai 1971)

— H. Gallagher :

"Introduction aux éléments finis" (1976).

