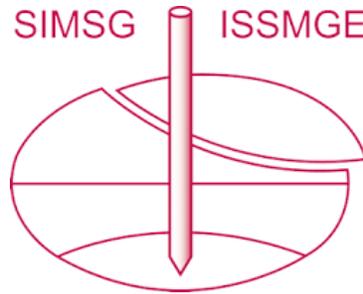


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Usage pratique de modèles couplés

Practical use of coupled models

M. DYSLI, Laboratoire de mécanique des sols, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Switzerland

SYNOPSIS

Dans les sols, les interactions entre la phase liquide et la phase solide induisent des efforts et des déformations importantes qu'il est difficile d'évaluer avec les modèles mathématiques classiques monophasiques. Grâce à l'accroissement des vitesses de nos ordinateurs et la diminution de leur coût, il est aujourd'hui possible de tenir compte de ces interactions dans des modèles mathématiques utilisables dans la pratique. On parle alors de modèles couplés. Il y a en effet, dans ces modèles, un couplage entre les contraintes ou les déformations et un champ de pressions régi par l'équation des écoulements souterrains. Quelques programmes sur ordinateur, basés sur de tels modèles couplés, existent déjà, mais il leur manque presque toujours les facilités des programmes d'éléments finis "industriels" qui traitent soit les problèmes de contrainte-déformation, soit les écoulements souterrains. Le couplage de ces deux types de programmes est cependant possible grâce à un interprocesseur, soit un programme qui, entre chaque pas de calcul - pas représentant un incrément de temps -, réalise la fonction de couplage et réactive les deux programmes, l'un après l'autre, avec de nouvelles conditions initiales. La communication présente les principes de cet interprocesseur ainsi qu'un exemple d'application réalisé par le couplage des programmes ADINA et ADINAT.

INTRODUCTION

Le sol est un matériau à deux voire trois phases : une phase liquide, une phase solide et souvent une phase gazeuse. Les interactions entre ces phases induisent des efforts importants, fonctions surtout de la phase liquide. En outre la phase liquide et la phase gazeuse peuvent s'écouler au travers de la phase solide et leur pression en un point donné varie ainsi en fonction du temps. Les interactions entre ces trois phases, fonctions des charges et du temps, ne peuvent qu'imparfaitement être simulées avec un modèle mathématique classique basé sur la mécanique du continu, soit en particulier avec des lois constitutives visco-élastiques ou visco-plastiques.

La méthode des éléments finis est devenue aujourd'hui un des principaux outils de l'ingénieur projeteur. En mécanique des sols, les modèles monophasiques utilisant cette méthode, avec des lois constitutives non linéaires, pour la résolution des équations d'équilibre des contraintes paraissent, pour certains, être la panacée. Cependant, avec de tels modèles, le praticien se heurte rapidement aux problèmes liés à la présence d'eau, voire d'air, dans le sol, problèmes parfaitement décrits, pour l'eau, par l'équation de Terzaghi :

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot u(t)$$

avec : σ'_{ij} = tenseur des contraintes effectives
 σ_{ij} = tenseur des contraintes totales
 u = pression interstitielle = f(temps)
 δ_{ij} = delta de Kronecker

mais cependant mal solubles par la méthode des éléments finis appliquée à la seule résolution des équations d'équilibre des contraintes.

Formellement, avec cette méthode, on ne devrait travailler qu'en contraintes totales; avec quelques artifices il est cependant possible de travailler en contraintes effectives, mais cela conduit souvent à des résultats erronés ou à de très grossières approximations.

A notre avis, un tel usage de la méthode des éléments finis n'a que peu d'avenir en mécanique des sols, si ce n'est pour des sols grossiers, très perméables, où l'eau interstitielle a un comportement plutôt statique. Avec de tels sols, il se heurte alors aux problèmes liés à la dilataance, mais cela n'est pas notre propos !

La méthode des éléments finis s'applique aussi, avec grand succès, aux analyses, en régime permanent ou transitoire, des problèmes de champs : diffusion thermique, écoulement souterrain, potentiel électrique, etc. Dans le domaine des écoulements souterrains, avec des lois constitutives non linéaires (relations entre la conductivité hydraulique et la pression interstitielle), il est même possible de

traiter sans trop de difficultés les sols non saturés soit donc aussi les problèmes de variation de la nappe phréatique.

Le géotechnicien praticien possède donc aujourd'hui, par la méthode des éléments finis, deux puissants outils pour la détermination des contraintes et des déformations dans un sol considéré comme un continu monophasique, et pour le calcul des pressions et des poussées d'écoulement en régime permanent comme transitoire et en milieu saturé ou non.

Le **couplage** de ces deux outils représente probablement le plus grand développement que la mécanique des sols ait connu depuis longtemps. Il exige cependant un effort extrêmement important en calcul numérique et n'a de ce fait pas pu, jusqu'à ces dernières années, être utilisé dans la pratique.

Grâce à l'accroissement des vitesses de nos ordinateurs et la diminution rapide de leur coût, ces modèles couplés commencent à pouvoir être utilisés dans le cadre d'un projet de construction.

Quelques programmes sur ordinateurs basés sur ce couplage existent déjà, mais il leur manque presque toujours les facilités des programmes d'éléments finis "industriels", utilisés dans la pratique, traitant soit des problèmes de contrainte-déformation, soit des écoulements souterrains : importante bibliothèque d'éléments à deux et trois dimensions, pré- et post-processeurs graphiques, analyse dynamique, lois constitutives non linéaires, etc. Le couplage de ces deux types de programmes industriels est cependant possible grâce à un **interprocesseur**.

LES MODELES COUPLES EAU-SOLIDE

Ce paragraphe est un bref rappel des principes du couplage permettant la prise en compte des interactions eau-solide dans un sol.

Un modèle couplé, fonction du temps, utilise les quatre relations principales de la mécanique des sols, soit :

- une équation d'équilibre des contraintes,
- une loi constitutive liant les déformations aux contraintes (équation d'état, relation contrainte-déformation),
- une équation liant les variations de contraintes ou de déformations aux pressions interstitielles,
- et une équation permettant de calculer la variation de la pression interstitielle en fonction du temps; c'est l'équation des écoulements souterrains qui est aussi l'équation de la consolidation.

La résolution numérique d'un tel système exige plusieurs boucles d'itération imbriquées que schématise la figure 1.

Dans un sol non saturé le rôle de l'air peut être introduit par le travers des équations 2 de la figure 1.

Avec ce couplage les contraintes résultantes sont des contraintes effectives.

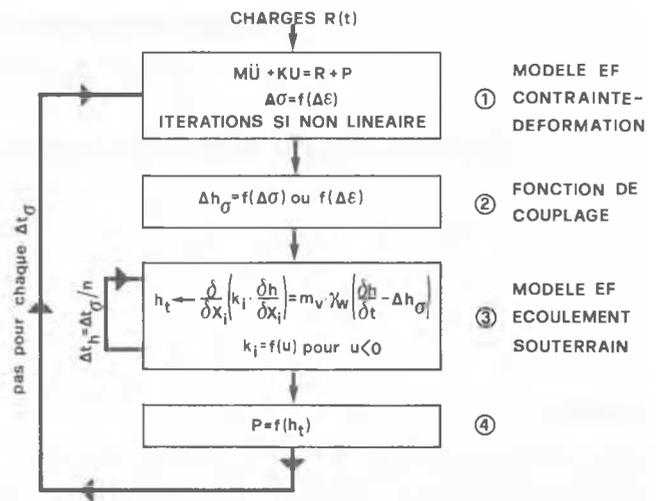


Fig. 1 Ordinogramme d'un modèle couplé

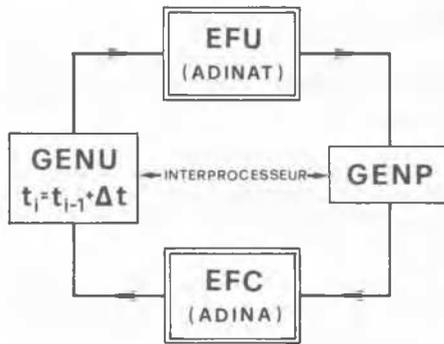
- M = tenseur des masses
 - U = vecteur des déplacements
 - K = matrice de rigidité
 - R = vecteur des charges extérieures
 - P = vecteur des forces dues à la pression interstitielle
 - x_i = axes du référentiel $i = 1, 2, 3$
- Autres symboles selon SIMSTF

PRINCIPE DE L'INTERPROCESSEUR

Un interprocesseur réalise le couplage entre un programme d'éléments finis résolvant les équations d'équilibre des contraintes et un programme d'éléments finis résolvant les équations de l'écoulement souterrain.

Entre chaque pas de calcul, pas représentant un incrément de temps, l'interprocesseur réalise la fonction de couplage, soit, par exemple une relation du type $\Delta u = f(\sigma_{ij})$, et active les deux programmes d'éléments finis, l'un après l'autre, avec de nouvelles conditions initiales. Ces deux programmes peuvent être linéaires comme non linéaires et, dans ce dernier cas, avoir leurs propres boucles d'itération internes. La figure 2 montre le principe d'un interprocesseur. On y constate que l'interprocesseur est en fait constitué de deux programmes :

- un programme GENU pour la génération des conditions initiales du programme d'éléments finis résolvant l'équation de l'écoulement souterrain (EFU) sur la base des contraintes ou des déformations calculées, au pas précédent, par le programme d'éléments finis résolvant l'équation d'équilibre des contraintes (EFC);
- un programme GENP qui génère les pressions sur les faces des éléments, ou des forces aux noeuds, pour le programme d'éléments finis résolvant l'équation d'équilibre des contraintes (EFC) sur la base des pressions interstitielles calculées par le programme EFU.



- EFC = programme d'éléments finis résolvant l'équation d'équilibre des contraintes
 EFU = programme d'éléments finis résolvant l'équation de l'écoulement souterrain
 GENU = programme générant les conditions initiales de EFU ($\Delta u = f(\sigma)$ ou $= f(\epsilon)$)
 GENP = programme générant les pressions sur les faces des éléments ($P = f(u)$)

Fig. 2 Principe d'un interprocesseur

Ces deux programmes, qui constituent l'interprocesseur, sont en général pilotés par un fichier de commande et ils utilisent divers fichiers temporaires pour le stockage de certaines informations nécessaires au pas de calcul suivant.

Ce couplage paraît très simple à réaliser. En pratique, différents problèmes sont à résoudre dont en particulier :

- La génération des conditions initiales avant le début du calcul couplé proprement dit. Le sol doit en effet avoir un certain degré de consolidation avant l'application des charges. Si la loi constitutive du modèle d'éléments finis "contrainte - déformation" EFC est non linéaire, il n'est pas possible d'introduire a priori des contraintes initiales (principe de superposition pas valable). L'histoire du sol doit donc être reconstituée avant l'application des charges autres que la gravité, ceci par des boucles de calcul préparatoires.
- Dans des modèles d'éléments finis non linéaires, les excavations sont simulées par la "mort" d'éléments à un instant donné et des remblais, par exemple, par la "naissance" d'éléments. Dans le programme d'éléments finis "écoulement souterrain" EFU, la naissance et la mort d'éléments peuvent présenter certaines difficultés que doit traiter le programme GENU de l'interprocesseur.
- Les variations de la nappe phréatique ($u = 0$) dans le programme d'éléments finis "écoulement souterrain" EFU peuvent conduire à de sérieux problèmes de convergence et le Δt interne doit être choisi assez petit.

L'interprocesseur qui fait l'objet de cette petite communication a été réalisé pour les programmes ADINA (1981) et ADINAT (1981) développés par K.J. Bathe à l'université de

Berkeley puis au MIT. Ces deux programmes permettent des analyses statiques et dynamiques (en régime permanent ou transitoire pour ADINAT) avec de nombreuses lois constitutives non linéaires et une bibliothèque importante d'éléments à une, deux et trois dimensions.

EXEMPLE D'APPLICATION

Cet exemple concerne le problème complexe de la détermination des tassements autour des grandes excavations dans les sols argileux. Le cas choisi a déjà été traité par Dysli, Fontana et Rybisar (1979) et par Dysli (1983), mais avec un modèle non couplé ou un couplage manuel très approximatif. Les deux communications citées plus haut donnent tous les détails sur la géométrie, les étapes de construction, les caractéristiques des sols et les résultats des nombreuses mesures réalisées pendant le déroulement du chantier.

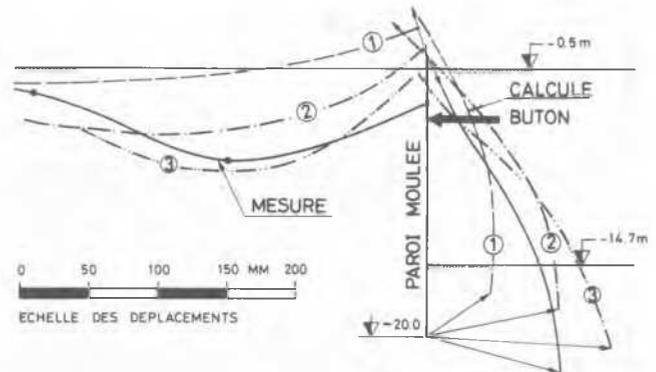


Fig. 3 Déformations autour d'une excavation

- ① analyse linéaire élastique
- ② analyse non couplée avec loi constitutive non linéaire (von Misès)
- ③ analyse couplée avec loi constitutive non linéaire (von Misès)

La figure 3 montre que seul un modèle couplé permet une estimation correcte des tassements autour de la fouille et de la déformation de la paroi moulée butonnée en tête, ceci pour les deux raisons principales suivantes :

- Derrière la paroi, le mouvement plastique du sol vers le fond de la fouille est associé à une forte variation des contraintes de cisaillement et donc aussi à une forte variation des pressions interstitielles (Fig. 4). Un puits s'y crée; il est transitoire, mais l'imperméabilité des sols de l'exemple a fait qu'il a agit pendant plus de cinq ans. Les poussées d'écoulement engendrées par ce puits sont la principale cause des tassements mesurés (Fig. 3). Pour cet exemple, c'est la loi de Skempton (1954) qui a été utilisée avec $B = 1$ et $A = 0.5$. L'interaction sol-eau a aussi une grande importance sur les déformations du fond de la fouille.
- L'excavation est réalisée par étapes. Si les modules de déformation sont tirés d'essais oedométriques, ils correspondent à la fin de la consolidation primaire. Cependant, comme l'entrepreneur n'est pas sensé attendre la

fin de la consolidation primaire après chaque étape d'excavation, une erreur importante est introduite, dans un calcul non couplé, par l'usage des modules oedométriques.

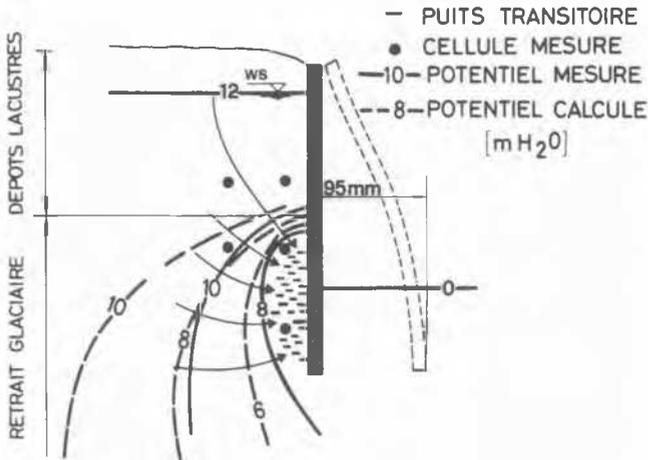


Fig. 4 Pressions interstitielles derrière paroi. Mesures et calcul couplé.

Le modèle d'éléments finis de l'exemple comprenait 321 noeuds à 2 degrés de liberté et 288 éléments. La loi constitutive était celle de von Misès et 12 couches de sol avaient des caractéristiques différentes. La simulation des différentes étapes d'excavation et de construction a nécessité 32 pas principaux de calcul avec un Δt de 7,5 jours entre chaque pas. Le calcul a été réalisé sur un ordinateur VAX11-780. Le coût de ce passage sur ordinateur a correspondu au prix de revient de quelque 50 heures d'ingénieur confirmé. Un tel calcul est donc aujourd'hui justifié sur le plan économique.

CONCLUSIONS

L'usage de modèles couplés contraintes-écoulement souterrain, associés à la méthode des éléments finis, est à encourager en mécanique des sols. C'est en effet le seul moyen d'évaluer les contraintes effectives et les pressions interstitielles en tout point d'un massif de sol, et ceci à n'importe quel moment de son histoire.

Un interprocesseur couplant un programme d'éléments finis "contrainte-déformation" avec un programme d'éléments finis "écoulement souterrain" est un moyen relativement simple et très souple.

Dans la pratique, l'usage de tels modèles est aujourd'hui économiquement possible, il exige cependant une connaissance précise des conductivités hydrauliques (coefficient de perméabilité) qui jouent un rôle déterminant dans la variation des pressions interstitielles en fonction du temps.

REFERENCES

- (1981). ADINA, A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis. ADINA Engineering, Watertown, Mass 02172 USA.
- (1981). ADINAT, A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis of Temperature. ADINA Engin. Watertown, Mass 02172 USA.
- Dysli M., Fontana A. et Rybisar J. (1979). Enceinte en paroi moulée dans les limons argileux. Compte rendu 7^e ECSMFE, Brighton, Vol 3 pp 197-205.
- Dysli M. (1983). Use of ADINA in soil mechanics with case studies for excavations. Computers and Structures, Vol 17 No 5-6, pp 635-642.
- Skempton A.W. (1954). The pore pressure coefficients A and B. Geotechnique Vol IV, pp. 143-147.