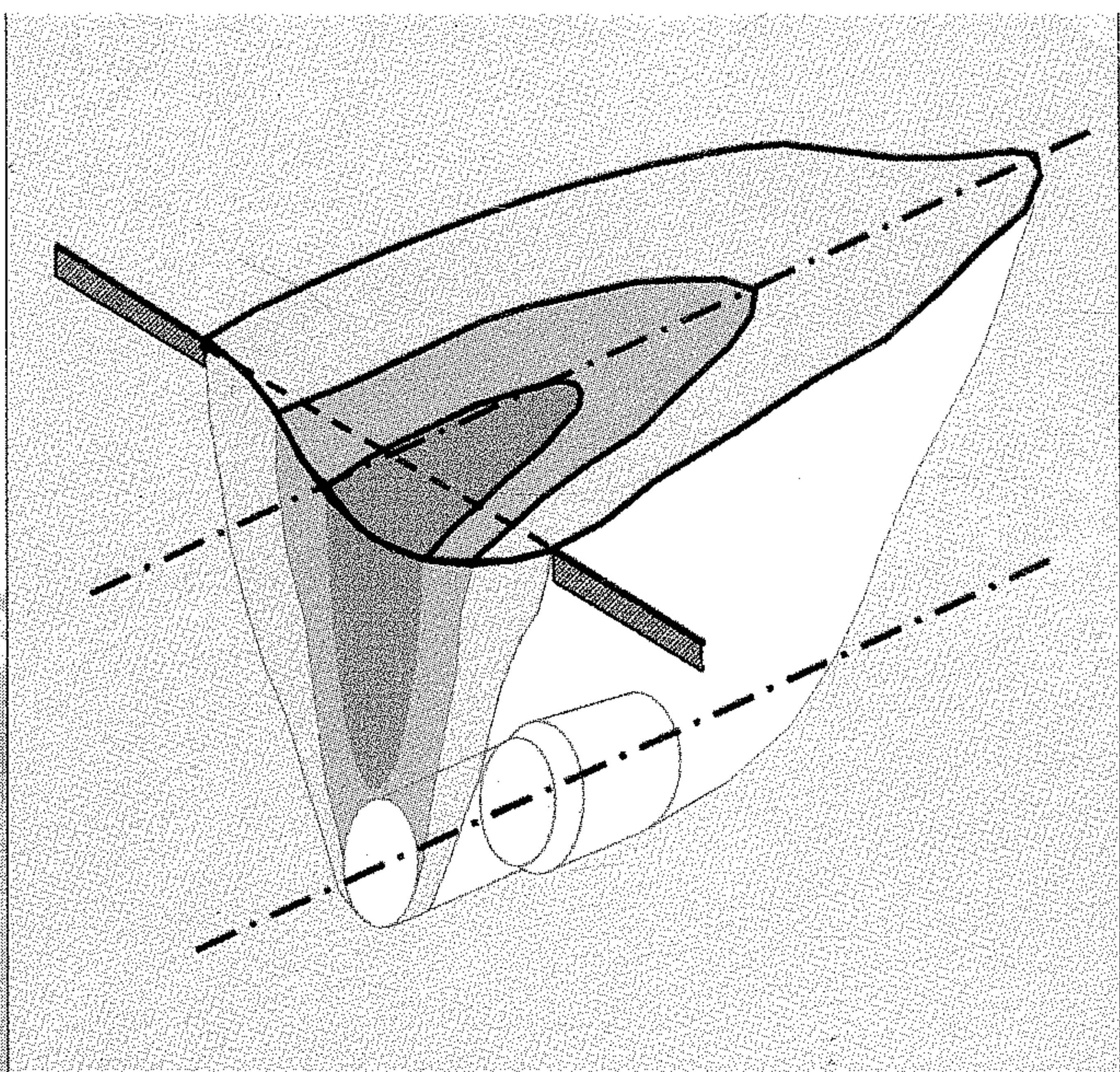


LCPC



Laboratoire
Central
des Ponts
et Chaussées



ISSN 1157

Géotechnique GT 69

Mohamed Atwa, Eric Leca, Jean-Pierre Magnan

Analyse de la consolidation des sols autour des tunnels creusés dans l'argile

ÉTUDES ET RECHERCHES
DES LABORATOIRES
DES PONTS ET CHAUSSÉES

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

2-624-271-1



2-624-271-1



Analyse de la consolidation des sols autour des tunnels creusés dans l'argile

**Mohamed ATWA
Jean-Pierre MAGNAN
Eric LECA**

Octobre 2000



**Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15**

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	7
---------------	----------

INTRODUCTION GÉNÉRALE	13
------------------------------	-----------

CHAPITRE I

CONSOLIDATION DES SOLS AUTOUR DES TUNNELS - COMPORTEMENT *I N S I T U* ET MODÉLISATION - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction	17
-------------------------	-----------

I.2 Phénoménologie de la consolidation des sols	18
--	-----------

I.3 Consolidation du sol autour des tunnels - Observations de chantiers	19
--	-----------

I.3.1 Réponse d'un massif de sol au creusement d'un tunnel	19
--	----

I.3.2 Rôle de la consolidation dans les tassements observés autour des tunnels	24
--	----

I.4 Modélisation de la réponse des massifs au creusement de tunnels par la méthode des éléments finis	27
--	-----------

I.4.1 Généralités	27
-------------------	----

I.4.2 Modélisation du creusement de tunnels par la méthode des éléments finis	27
---	----

I.4.3 Techniques développées pour modéliser les phases de réalisation d'un tunnel	34
--	----

I.4.3.1 Simulation du creusement	35
----------------------------------	----

I.4.3.2 Simulation d'une éventuelle pression interne au tunnel	38
--	----

I.4.3.3 Simulation du remplissage du vide annulaire	38
---	----

I.5 Modélisation de la consolidation des sols autour des tunnels - Travaux antérieurs	41
--	-----------

I.5.1. Traitement courant de la présence d'eau dans la modélisation des tunnels	41
---	----

I.5.2 Travaux consacrés à la modélisation du creusement de tunnels dans l'argile en conditions non drainées	41
--	----

I.5.3 Analyse couplée par consolidation du creusement de tunnels	46
--	----

I.5.3.1 Approches semi-empiriques	46
-----------------------------------	----

I.5.3.2 Approches par couplage hydromécanique en consolidation	50
--	----

I.6 Conclusions	55
------------------------	-----------

CHAPITRE II

MODÉLISATION HYDRO-MÉCANIQUE COUPLÉE DU CREUSEMENT D'UN TUNNEL COMPARAISON DES CALCULS COUPLÉS, DRAINÉS ET NON DRAINÉS

II.1 Introduction	57
--------------------------	-----------

II.2 Modélisation du creusement de tunnels selon les hypothèses drainées et non drainées - Critiques	58
---	-----------

II.2.1 Principes de calcul - Hypothèses de sol non drainé - drainé	58
II.2.2 Analyse des résultats - Limites	62
II.3 Comparaison dans un cas simple des résultats des calculs couplés, drainés et non drainés	65
II.3.1 Description du modèle	65
II.3.2 Analyse des déformations du massif	67
II.3.3 Analyse de l'évolution des pressions interstitielles	72
II.3.4 Chargement appliqué sur le revêtement	74
II.4 Conclusions	77

CHAPITRE III

MODÉLISATION DE LA CONSOLIDATION DES SOLS ARGILEUX SATURÉS ET EN PRÉSENCE D'UNE SURFACE LIBRE - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

III.1 Introduction	79
III.2 Modélisation théorique et numérique de la consolidation des sols saturés	80
III.2.1 Bases théoriques de la consolidation des sols	80
III.2.2 Évolution récente du traitement des problèmes géotechniques en consolidation	85
III.2.3 Résolution du problème de consolidation des sols par la méthode des éléments finis	89
III.3 Modélisation de la consolidation des sols en présence de surface libre	91
III.3.1 Généralités	91
III.3.2 Problèmes posés par la présence d'une surface libre	92
III.3.3 Traitement de la consolidation avec surface libre dans CESAR-LCPC	96
III.3.3.1 Généralités	96
III.3.3.2 Description de l'approche suivie dans CESAR-LCPC	96
III.3.3.3 Analyse et commentaires	99
III.3.4 Traitement de la consolidation avec surface libre - Synthèse bibliographique	100
III.3.4.1 Généralités	100
III.3.4.2 Description des travaux	100
III.3.4.3 Commentaire et comparaison	109
III.3.5 Comportement des sols argileux dans le domaine des pressions négatives	111
III.3.6 Approche retenue pour le traitement de la consolidation avec surface libre	114
III.4 Conclusions	117

CHAPITRE IV

CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE MELANIE DANS LE PROGICIEL CESAR-LCPC

IV.1 Introduction	119
IV.2 Description du modèle MELANIE	120
IV.3 Nouveau traitement numérique du modèle	123

IV.3.1 Nouvelle approche	124
IV.3.2 Programmation	128
IV.4 Application du modèle à des cas pratiques	130
IV.4.1 Modélisation du chargement d'une fondation superficielle	132
IV.4.2 Modélisation du creusement d'un tunnel	137
IV.5 Conclusions	141

CHAPITRE V

CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT DE LA MODÉLISATION DE LA CONSOLIDATION AVEC SURFACE LIBRE DANS CESAR-LCPC

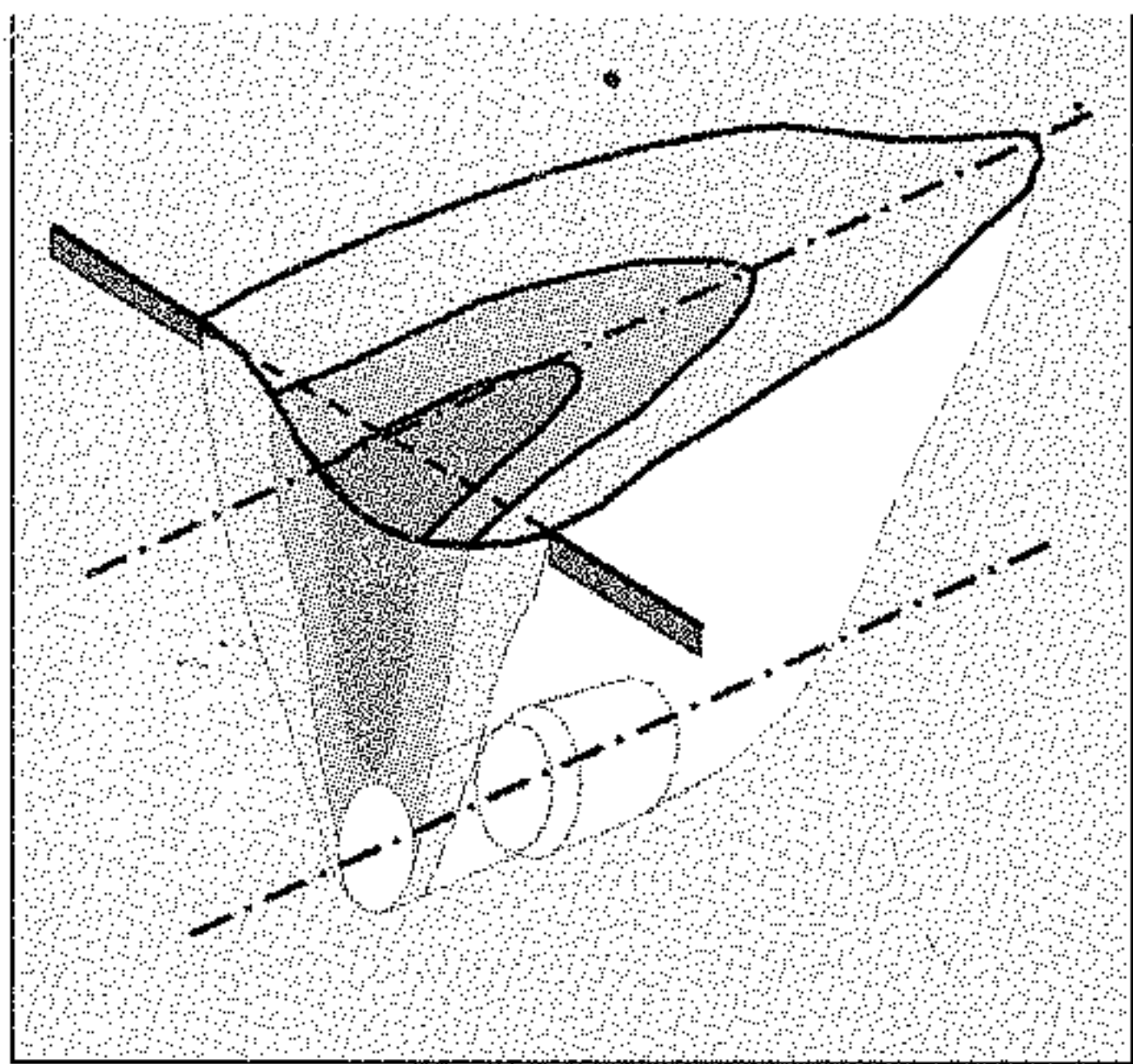
V.1 Introduction	143
V.2 Développement d'une nouvelle approche pour le traitement de la consolidation avec surface libre	144
V.2.1 Équation de conservation de la masse d'eau	145
V.2.2 Notion de contrainte effective modifiée selon les principes de Bishop	151
V.3 Formulation du modèle pour une résolution numérique	154
V.3.1 Formulation variationnelle	154
V.3.2 Prise en compte d'un comportement de sol non-linéaire	158
V.3.3 Transcription du problème en équations matricielles	160
V.3.4 Intégration du problème dans le temps	162
V.4 Description du module de calcul programmé	164
V.4.1 Programmation	164
V.4.2. Algorithme adopté pour gérer l'aspect non-linéaire du problème	165
V.4.3 Organigramme fonctionnel du module développé	167
V.4.4 Calculs et vérifications	171
V.5 Application du programme à quelques cas pratiques	176
V.5.1 Modélisation du chargement d'une fondation superficielle	176
V.5.2 Modélisation du creusement d'un tunnel	181
V.6 Développements futurs	187
V.7 Conclusions	192

CHAPITRE VI

MODÉLISATION COUPLÉE D'UN OUVRAGE RÉEL INSTRUMENTÉ - LE TUNNEL DE GRIMSBY

VI.1 Introduction	195
VI.2 Présentation du projet	196
VI.3 Synthèse des mesures réalisées	199

VI.4 Caractéristiques géotechniques du massif	202
VI.5 Modélisation numérique du tunnel de Grimsby	205
VI.5.1 Section de l'ouvrage considérée et modèle d'éléments finis correspondant	205
VI.5.2 Détermination des paramètres de calcul	205
VI.5.3 Description des calculs réalisés	216
VI.5.4 Phasages des calculs	217
VI.5.5 Interprétation des résultats	220
VI.5.5.1 Confrontation des résultats aux mesures de tassements	220
VI.5.5.2 Analyse des résultats complémentaires	232
VI.6 Limites des modélisations réalisées	253
VI.7 Conclusions	255
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	257
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES (en 2 parties)	261
Première partie : Comportement des sols - Résultats expérimentaux et modélisation	261
Deuxième partie : Modélisation du comportement des sols autour des tunnels	270
ANNEXES	275



Mohamed Atwa, Eric Leca, Jean-Pierre Magnan

Analyse de la consolidation des sols autour des tunnels creusés dans l'argile

Le rapport comporte plusieurs synthèses bibliographiques portant sur la réponse hydromécanique des massifs de sols au creusement de tunnels (observations de chantiers), sur les travaux antérieurs consacrés à la modélisation de ce phénomène et sur les approches de calcul développées dans la littérature pour le traitement de la consolidation d'un massif avec niveau piézométrique variable.

La réponse d'un massif de sols compressibles au creusement d'un tunnel a, également, été analysée par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel CÉSAR-LCPC. Cette analyse a été basée sur des calculs hydromécaniques couplés et sur un modèle de comportement élastoplastique adapté aux sols anisotropes MÉLANIE. Les résultats de calcul ont été comparés aux résultats des analyses drainée et non drainée.

Ce travail présente, de plus, une contribution au développement du code de calcul CÉSAR-LCPC.

La programmation du modèle MÉLANIE dans CÉSAR-LCPC a été adaptée pour traiter la variation de la contrainte de préconsolidation et des modules d'élasticité avec la profondeur, et pour actualiser le coefficient de perméabilité du sol en fonction de la variation de l'indice des vides.

Une approche a aussi été proposée pour le traitement de la consolidation en cas de variation du toit de la nappe en utilisant les généralisations de Richards (1931) et de Bishop (1960) pour le traitement de l'écoulement et du couplage au-dessus de la surface libre. Cette approche a été programmée dans un nouveau module s'intégrant dans le code CÉSAR-LCPC et a été appliquée à l'étude de la consolidation d'un massif sous une fondation et autour d'un tunnel.

Ce travail s'achève par la modélisation d'un ouvrage instrumenté : le tunnel de Grimsby, creusé dans un massif argileux compressible. Les calculs ont été réalisés avec différentes lois de comportement (MÉLANIE, élasticité isotrope et anisotrope et élastoplasticité isotrope), et avec différentes hypothèses pour le traitement du couplage au-dessus de la nappe ; les résultats ont été comparés aux tassements de surface mesurés sur une période de onze ans après la construction.