

# Thermo-Plasticity of Fine-Grained Soils at Various Saturation States: Application to Nuclear Waste Disposal

THÈSE N° 4188 (2008)

PRÉSENTÉE LE 14 NOVEMBRE 2008

À LA FACULTE ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT  
LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DES SOLS  
PROGRAMME DOCTORAL EN MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**Bertrand FRANÇOIS**

ingénieur civil des constructions, Université de Liège, Belgique  
et de nationalité belge

acceptée sur proposition du jury:

Prof. J.-F. Molinari, président du jury  
Prof. L. Laloui, directeur de thèse  
Prof. R. Charlier, rapporteur  
Dr V. Labiouse, rapporteur  
Dr P. Marschall, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse  
2008

# Contents

CONTENTS.....	I
ABSTRACT.....	V
RESUME.....	VII
LIST OF SYMBOLS.....	IX
<b>CHAPTER 1 THERMO-PLASTICITY IN SOIL: AN INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 GENERAL INTRODUCTION.....	2
1.1.1 Thermal effect in soils and nuclear waste disposal.....	2
1.1.2 Objectives.....	3
1.1.3 Outline of the thesis.....	4
1.2 THM APPLICATIONS IN GEOTECHNICS.....	5
1.2.1 Temperature and environmental geomechanics.....	5
1.2.2 THM applications.....	5
<b>SECTION I THERMO-MECHANICAL CONSTITUTIVE BEHAVIOUR OF SATURATED FINE-GRAINED SOILS.....</b>	<b>13</b>
<b>CHAPTER 2 ACMEG, AN ISOTHERMAL CONSTITUTIVE MODEL.....</b>	<b>15</b>
2.1 INTRODUCTION.....	16
2.2 SOIL ELASTO-PLASTICITY.....	18
2.2.1 Some concepts of plasticity in soils.....	18
2.2.2 Cam-Clay family models.....	21
2.2.3 Family of advanced models.....	28
2.3 THE ACMEG MODEL.....	32
2.3.1 Introduction.....	32
2.3.2 The successive improvements.....	33
2.3.3 The constitutive relations.....	40
2.3.4 Numerical validation.....	45
2.4 CONCLUSIONS.....	49
<b>CHAPTER 3 ACMEG-T, A NON-ISOTHERMAL MECHANICAL CONSTITUTIVE MODEL.....</b>	<b>51</b>
3.1 INTRODUCTION.....	52
3.2 THERMAL EFFECT ON MICROSTRUCTURAL ASPECTS OF CLAYEY SOILS.....	52
3.2.1 Introduction.....	52
3.2.2 Interactions in clay-water system.....	53
3.2.3 Temperature effect on the clay-water system.....	58
3.3 EXPERIMENTAL EVIDENCE ON THERMO-MECHANICAL BEHAVIOUR OF CLAYEY SOILS.....	63
3.3.1 Soil response to heating-cooling cycles.....	63
3.3.2 Temperature effect on compression behaviour.....	66
3.3.3 Temperature effect under undrained conditions.....	70
3.3.4 Temperature effect on shearing behaviour.....	72
3.3.5 Conclusions.....	75
3.4 RELEVANT CONTRIBUTIONS TO THE THERMO-MECHANICAL CONSTITUTIVE MODELLING OF SOILS.....	75
3.5 THE ACMEG-T MODEL.....	76
3.5.1 Introduction.....	76
3.5.2 Thermo-mechanical constitutive equations.....	77

3.5.3	Some typical thermo-mechanical responses predicted by ACMEG-T.....	81
3.5.4	Thermo-plasticity: one notion, two approaches .....	83
3.5.5	Validation of the ACMEG-T constitutive model .....	87
3.6	CONCLUSIONS .....	92

**SECTION II THERMO-MECHANICAL CONSTITUTIVE BEHAVIOUR OF UNSATURATED FINE-GRAINED SOILS.....93**

**CHAPTER 4 THERMAL EFFECT ON THE MECHANICS OF UNSATURATED SOILS .....95**

4.1	INTRODUCTION .....	96
4.2	ISOTHERMAL BEHAVIOUR OF UNSATURATED SOILS .....	96
4.2.1	Partial saturation in soils.....	96
4.2.2	Stress frameworks.....	98
4.2.3	Mechanical behaviour .....	100
4.2.4	Water retention behaviour.....	107
4.2.5	Constitutive modelling of unsaturated soils .....	109
4.3	NON-ISOTHERMAL BEHAVIOUR OF UNSATURATED SOILS.....	111
4.3.1	Mechanical behaviour .....	111
4.3.2	Water retention behaviour.....	113
4.4	CONCLUSIONS .....	117

**CHAPTER 5 EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF THE THM BEHAVIOUR OF SOILS .....119**

5.1	INTRODUCTION .....	120
5.2	LITERATURE ANALYSIS ON THE THM EXPERIMENTAL DEVICES .....	120
5.2.1	Introduction .....	120
5.2.2	Overview of experimental methods .....	121
5.2.3	The developed THM oedometric cell .....	125
5.3	EXPERIMENTAL PROGRAM .....	136
5.3.1	Introduction .....	136
5.3.2	Preparation and characteristics of the material.....	136
5.3.3	Experimental layout.....	137
5.3.4	Experimental results .....	138
5.3.5	Analysis of the results .....	140
5.3.6	Comparison with other experimental results on Sion silt .....	142
5.4	CONCLUSIONS .....	145

**CHAPTER 6 ACMEG-TS, A CONSTITUTIVE MODEL FOR UNSATURATED SOILS UNDER NON-ISOTHERMAL CONDITIONS .....147**

6.1	INTRODUCTION .....	148
6.2	PREVIOUS CONSTITUTIVE CONTRIBUTIONS.....	148
6.2.1	The existing constitutive models.....	148
6.2.2	Discussion on the existing constitutive models .....	149
6.3	THE ACMEG-TS MODEL.....	150
6.3.1	Mechanical constitutive part .....	150
6.3.2	Water retention constitutive part.....	154
6.3.3	Some typical responses predicted by ACMEG-TS .....	157
6.3.4	Validation of the ACMEG-TS constitutive model .....	160
6.4	CONCLUSIONS .....	171

**SECTION III APPLICATION TO NUCLEAR WASTE DISPOSAL.....173**

**CHAPTER 7 THM GOVERNING EQUATIONS.....175**

7.1	INTRODUCTION .....	176
-----	--------------------	-----

7.2	GOVERNING EQUATIONS.....	176
7.2.1	Introduction .....	176
7.2.2	Equilibrium and balance equations.....	177
7.2.3	Constitutive relations .....	178
7.3	FINITE ELEMENT FORMULATION .....	181
7.4	VALIDATION OF IMPLEMENTATION OF THE ACMEG-TS MODEL .....	183
7.5	NON-ISOTHERMAL CONSOLIDATION.....	184
7.5.1	Introduction .....	184
7.5.2	Results.....	185
7.6	CONCLUSIONS .....	187
<b>CHAPTER 8 NUMERICAL SIMULATION OF PROCESSES RELATING TO NUCLEAR WASTE DISPOSAL ...</b>		<b>189</b>
8.1	INTRODUCTION .....	190
8.2	GOAL AND PRINCIPLE OF UNDERGROUND NUCLEAR WASTE DISPOSAL .....	190
8.2.1	Introduction .....	190
8.2.2	The multibarrier concept.....	191
8.2.3	Thermo-hydro-mechanical processes.....	193
8.2.4	Large scale in-situ simulation tests.....	194
8.2.5	Conclusions.....	195
8.3	MODELLING OF BOUNDARY VALUE PROBLEMS .....	195
8.3.1	Introduction .....	195
8.3.2	The Boom clay formation.....	196
8.3.3	TIMODAZ benchmark .....	201
8.3.4	ATLAS in-situ test.....	210
8.3.5	FEBEX in-situ test.....	222
8.4	CONCLUSIONS .....	242
<b>CHAPTER 9 CONCLUDING REMARKS .....</b>		<b>243</b>
9.1	CONCLUSIONS .....	244
9.1.1	Constitutive study.....	244
9.1.2	Experimental study.....	245
9.1.3	Numerical study.....	246
9.2	PERSPECTIVES.....	247
<b>REFERENCES.....</b>		<b>249</b>
<b>APPENDIX A STRESS-STRAIN CONVENTIONS.....</b>		<b>269</b>
A.1	STRESS TENSOR .....	269
A.2	STRAIN TENSOR .....	271
A.3	REFERENCES .....	272
<b>APPENDIX B SOLVER OF THE CONSTITUTIVE LAW.....</b>		<b>273</b>
B.1	INTRODUCTION .....	273
B.2	FORTRAN SUB-ROUTINES .....	275
B.3	REFERENCES .....	285
<b>APPENDIX C NUMERICAL APPLICATION OF TEMPERATURE EFFECT ON INTERACTION STRESS BETWEEN PARTICLES.....</b>		<b>287</b>
C.1	INTRODUCTION .....	287
C.2	ISOTHERMAL ASPECTS .....	287
C.3	TEMPERATURE EFFECT.....	289
C.4	REFERENCES .....	293
<b>APPENDIX D VALIDATION OF THE IMPLEMENTATION OF THE ACMEG-TS MODEL.....</b>		<b>295</b>

<b>APPENDIX E</b>	<b>MODELLING OF THERMO-ELASTO-PLASTIC WATER SATURATED MATERIALS .....</b>	<b>299</b>
<b>APPENDIX F</b>	<b>BENCHMARK EXERCISE ON CONSTITUTIVE MODELLING OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF OPALINUS CLAY .....</b>	<b>319</b>
F.1	INTRODUCTION .....	319
F.2	OPALINUS CLAY .....	319
F.3	COMPILATION OF THE MECHANICAL TESTS.....	320
F.4	INTERPRETATION OF RESULTS .....	325
F.5	BENCHMARK EXERCISE.....	328
F.6	CONCLUSIONS .....	330
F.7	REFERENCES .....	334

# Abstract

Soil is a particulate material that may undergo irreversible strain as the relative positions of the constituent particles change. That irreversible behaviour may be induced not only by an external stress variation but also by temperature or suction changes. The geomaterials that will be involved in the confinement of radioactive waste in deep geological formations will be submitted to strong thermal, hydraulic, and mechanical modifications. Those modifications may produce a significant change of the characteristics of the confinement barrier. A safety assessment of such facilities must be performed that considers the potential thermo-plasticity effects in the confining soil.

Following the need for understanding and quantifying such effects, a constitutive model that deals with the thermo-mechanical modelling of unsaturated soils is proposed. In light of elasto-plasticity, this model is based on the relevant temperature and suction effects on the mechanical behaviour of fine-grained soils, as observed in experiments. In addition, an experimental program has been undertaken in order to corroborate and to extend the existing results. Finally, the developed constitutive model has been properly implemented in a finite element code in order to study the behaviour of the soils that confine the nuclear waste. Therefore, this work addresses the issue from three different directions: a constitutive, experimental, and numerical point of view.

(i) *Constitutive study.* The elaboration of a thermo-plastic constitutive model for unsaturated soils is done in a systematic manner. Starting from a hardening plasticity model for isothermal and saturated conditions, the constitutive relations are progressively extended to non-isothermal conditions and then to unsaturated states. For the more advanced model, a generalized effective stress framework is adopted, which includes a number of intrinsic thermo-hydro-mechanical connections, to represent the stress state in the soil. Two coupled constitutive aspects are used to fully describe the soil behaviour. The mechanical constitutive part is built on concepts of bounding surface theory and multi-mechanism plasticity, while water retention characteristics are described using elasto-plasticity to reproduce the hysteretic response and the effect of temperature and dry density on the soil's water retention properties. The theoretical formulation is supported by comparisons with experimental results.

(ii) *Experimental study.* Aiming at a better understanding of the non-isothermal mechanical behaviour of unsaturated soils, a series of oedometric compression tests under controlled temperatures and suction conditions has been carried out on a silty material. The characteristics and the calibrations of the experimental apparatus are presented. The main results are interpreted in light of the proposed constitutive framework. The compressibility of the soil tested appears not to be affected by the temperature, but it decreases with a suction increase. As far as the preconsolidation stress is concerned, the results show a decrease of the yield limit with increasing temperature, while a suction increase tends to enhance this limit. Finally, an analytical expression is proposed to describe the evolution of the preconsolidation stress with respect to temperature and suction.

(iii) *Numerical study.* In the issue of nuclear waste disposal, the quantification of the temporal and spatial distributions of the thermo-hydro-mechanical phenomena that occur in the confining soils

requires that numerical simulations be carried out under imposed boundary conditions. To this end, the last part of this work presents finite element modelling results of several in-situ or laboratory simulation tests through using the developed constitutive model that was implemented in an advanced finite element code. The parameters of the different materials involved in the simulated experiments are determined by means of an extensive literature analysis on their thermal, hydraulic, and mechanical characteristics. The simulation results are interpreted in light of the elasto-thermoplasticity of saturated and unsaturated soils, which emphasizes the significant role of thermo-plastic processes in the global thermo-hydro-mechanical response of the confining materials.

In that sense, this work supplies, in a systematic and progressive manner, constitutive explanations that may help to provide a better understanding of *what the effects of thermo-plasticity in soils involved in the confinement of nuclear waste are*.

**Keywords:** Nuclear waste disposal, fine-grained soils, thermo-plasticity, temperature, constitutive modelling, hardening plasticity, unsaturated soils, generalized effective stress, thermo-hydro-mechanical processes, oedometric tests, numerical modelling, finite element simulation.

# Résumé

Le sol est un matériau qui peut subir des déformations irréversibles suite à un réarrangement des particules qui le constituent. Ce comportement irréversible peut être induit par une sollicitation mécanique extérieure mais également par une modification de la température et/ou de la succion du matériau. Les géomatériaux qui contribueront au confinement des déchets nucléaires en formations géologiques profondes seront soumis à de fortes modifications thermiques, hydrauliques et mécaniques. Ces sollicitations peuvent induire des changements importants des caractéristiques de la barrière de confinement. Une évaluation de la sécurité de tels ouvrages doit être effectuée en incluant les effets thermo-plastiques pouvant se produire dans le sol entourant les déchets nucléaires.

Face au besoin de comprendre et de quantifier de tels effets, ce travail propose un modèle constitutif avancé décrivant le comportement thermo-mécanique des sols non-saturés. Dans un cadre élasto-plastique, ce modèle se base sur des résultats expérimentaux qui mettent en évidence les effets de la température et de la succion sur le comportement mécanique des sols fins. De plus, une campagne expérimentale a été réalisée afin de corroborer et de compléter les résultats existant dans la littérature. Finalement, le modèle de comportement développé a été introduit dans un code aux éléments finis afin d'étudier le comportement des sols intervenant dans le confinement des déchets nucléaires. Ainsi, le sujet de ce travail est traité du triple point de vue constitutif, expérimental et numérique.

(i) *Etude constitutive.* Un modèle thermo-plastique pour les sols non-saturés est développé d'une manière systématique. Partant d'un modèle à écrouissage pour les sols en conditions saturées et isothermes, les relations constitutives sont progressivement étendues afin de considérer les conditions non-isothermes et ensuite non-saturées. Le modèle le plus avancé utilise un cadre de contrainte appelé contrainte effective généralisée qui inclut de façon intrinsèque une série de couplages thermo-hydro-mécaniques. Deux schémas constitutifs couplés sont utilisés pour décrire le comportement du sol. Le cadre mécanique est fondé sur les concepts de « bounding » surface et de plasticité à multi-mécanismes. Le cadre hydrique, quant à lui, est décrit en utilisant un concept élasto-plastique qui reproduit l'hystérèse hydrique et l'effet de la température et de la variation volumique du sol sur la courbe de rétention. La formulation théorique est validée par des comparaisons avec des résultats expérimentaux.

(ii) *Etude expérimentale.* Afin d'améliorer la compréhension du comportement mécanique non-isotherme des sols non-saturés, une série de compressions oedométriques à température et succion contrôlées a été réalisée sur un matériau limoneux. Les caractéristiques et les calibrations du dispositif expérimental sont présentées. Les résultats sont interprétés dans le cadre constitutif proposé. La compressibilité du sol semble indépendante de la température mais diminue lorsque la succion augmente. Concernant la contrainte de préconsolidation, les résultats montrent une décroissance de la limite d'élasticité avec la température et une augmentation avec la succion. Finalement, une expression analytique est proposée pour décrire cette évolution avec la température et la succion.

(iii) *Etude numérique.* Une quantification rigoureuse des distributions temporelle et spatiale des processus thermo-hydro-mécaniques se produisant autour des déchets nucléaires enfouis en

profondeur nécessite des simulations numériques avec des conditions de contour imposées. Dans ce cadre, la dernière partie du travail présente des résultats de modélisation par éléments finis de plusieurs essais in-situ ou de laboratoire, en utilisant le modèle de comportement développé. Ce modèle a été implémenté dans un code aux éléments finis performant. Les paramètres des différents matériaux considérés dans les expériences simulées ont été déterminés grâce à une analyse de la littérature sur leurs caractéristiques thermique, hydraulique et mécanique. Les résultats de simulation sont interprétés dans un cadre elasto-thermoplastique en conditions saturées ou non-saturées. Ces interprétations démontrent le rôle majeur des phénomènes thermo-plastiques dans la réponse globale des matériaux de confinement.

Ainsi, ce travail fournit, d'une façon systématique et progressive, une approche constitutive qui peut aider à une meilleure compréhension *des effets thermo-plastiques se produisant dans les sols et en particulier autour des déchets nucléaires enfouis en profondeur.*

**Mots clés :** Stockage de déchets nucléaires, sols fins, thermo-plasticité, température, modèle constitutif, écrouissage, sols non-saturés, contrainte effective généralisée, processus thermo-hydro-mécaniques, essai oedométrique, modélisation numérique, simulation par éléments finis.