

THESE
présentée
DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON
pour obtenir
LE GRADE DE DOCTEUR
SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL - SOLS, MATÉRIAUX, STRUCTURES, PHYSIQUE DU BÂTIMENT

PAR

DENIS MYRIAM , EPOUSE OLIVIER

Ingénieur des Travaux Publics de l'Etat

**LE MATERIAU TERRE,
compactage, comportement, application aux structures en blocs de terre**

Soutenue le 31 janvier 1994 devant la Commission d'Examen

Jury :	M. Laréal	Directeur de thèse
	M. Biarez	rapporteur
	M. Magnan	rapporteur
	M. Mariotti	
	M. Darve	
	M. Acker	
	M. di Benedetto	

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

Directeur : J.ROCHAT

Professeurs :

S.AUDISIO	PHYSICOCHEMIE INDUSTRIELLE
J.C.BABOUX	TRAIT. SIGNAL ULTRASONS
J.BAHUAUD	MECANIQUE DES SOLIDES
B.BALLAND	PHYSIQUE DE LA MATIERE
G.BAYADA	CENTRE DE MATHEMATIQUES
C.BERGER (Melle)	PHYSIQUE INDUSTRIELLE
M.BETEMPS	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
C.BOISSON	VIBRATIONS ACOUSTIQUES
M.BOIVIN	MECANIQUE DES SOLIDES
H.BOTTA	GENIE CIVIL ET URBANISME (METHODES)
G.BOULAYE	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
J.BRAU	EQUIPEMENT DE L'HABITAT
M.BRUNET	MECANIQUE DES SOLIDES
J.C.BUREAU	THERMOCHIMIE MINERALE
J.P.CHANTE	COMPOSANTS DE PUISSANCE ET APPLICATIONS
M.CHEVRETON	ETUDE DES MATERIAUX
B. CHOCAT	METHODES
B.CLAUDEL	CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRONNEMENT
L.CRONENBERGER	CHIMIE BIOLOGIQUE
M.DIOT	THERMOCHIMIE MINERALE
A.DOUTHEAU	CHIMIE ORGANIQUE
B.DUPERRAY	CHIMIE BIOLOGIQUE
H.EMPTOZ	MOD.SYST.ET REC.DES FORMES
C.ESNOUF	GEMPPM*
L.EYRAUD	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
G.FANTOZZI	GEMPPM*
J.FAUCHON	CONCEPTION ET ANALYSE SYSTEMES MECA.
J.FAVREL	INFORMATIQUE DES SYST. DE PROD. INDUS.
Y.FETIVEAU	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
L.FLAMAND	MECANIQUE DES CONTACTS
P.FLEISCHMANN	GEMPPM*
A.FLORY	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
R.FOUGERES	GEMPPM*
L.FRECON	DEVELOP. LANGAGES INFORMAT. AVANCES
R.GAUTHIER	PHYSIQUE DE LA MATIERE
M.GERY	GCU (EQUIPEMENT DE L'HABITAT)
G.GIMENEZ	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
P.GOBIN	GEMPPM*
P.GONNARD	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
R.GOUTTE	TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
G.GRANGE	GENIE ELECTRIQUE
G.GUENIN	GEMPPM*
G.GUILLOT	PHYSIQUE DE LA MATIERE
A.GUINET	INFORMATIQUE DES SYST.DE PROD.INDUS.
C.GUITTARD	DEVELOP.LANGAGES INFORMAT.AVANCES
J.L.GUYADER	VIBRATIONS-ACOUSTIQUE
J.JOUBERT	GENIE MECANIQUE
J.F.JULLIEN	BETONS ET STRUCTURES
A.JUTARD	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
R.KASTNER	GEOTECHNIQUE
H.KLEIMANN	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
J.KOULOUMDJIAN	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
M.LAGARDE	CHIMIE BIOLOGIQUE
M.LALANNE	MECANIQUE DES STRUCTURES
A.LALLEMAND	ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE
M.LALLEMAND (Mme)	ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE

P.LAREAL
A.LAUGIER
CH.LAUGIER
P.LEJEUNE
C.LESUEUR
Y.MARTINEZ
C.MARTY
J. MERLIN
H.MAZILLE
M.MIRAMOND
N.MONGEREAU
R.MOREL
P.NARDON
A.NAVARRO
M.OTTERBEIN
J.P.PASCAULT
J.PERA
G.PERACHON
M.PERDRIX
J.PEREZ
P.PINARD

D.PLAY
P.PREVOT
R.REYNAUD
J.M.REYNOUARD
M.RICHARD
E.RIEUTORD
J.ROBERT-BAUDOY (Mme)

J.ROBIN
D.ROUBY
J.F.SACADURA
H.SAUTEREAU
S.SCAVARDA
F.STOEBER
M.TROCCAZ
J.TUSET
R.UNTERREINER
P.VERMANDE
J.VERON
A.VINCENT
P.VUILLERMOZ

GENIE CIVIL ET URBANISME GEOTECHNIQUE)
PHYSIQUE DE LA MATIERE
PHYSIOLOGIE ET PHARMACODYNAMIE
GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES
VIBRATIONS-ACOUSTIQUE
INFORMATIQUE DES SYST. DE PROD. INDUST.
CONCEPTION ET ANALYSE SYSTEMES MECA.
GEMPPM*
PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
METHODES
GENIE CIVIL (GEOTECHNIQUE)
MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUES
BIOLOGIE
CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON.
CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON.
MATERIAUX MACROMOLECULAIRES
SOLIDES ET MATERIAUX MINERAUX
THERMOCHIMIE MINERALE
TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
GEMPPM*
PHYSIQUE DE LA MATIERE ET PHYSIQUE
INDUSTRIELLE
CONCEPTION ET ANALYSE SYSTEMES MECA.
INFORMATIQUE DES SYST. DE PROD. INDUST.
ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE
BETONS ET STRUCTURES
ENERGETIQUE ET AUTOMATIQUE
MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUE
GENETIQUE MOLECULAIRE DES
MICROORGANISMES
PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
GEMPPM*
MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUE
MATERIAUX MACROMOLECULAIRES
AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES
GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
SOLIDES ET MATERIAUX MINERAUX
TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASONS
CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON.
CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON.
GEMPPM*
PHYSIQUE DE LA MATIERE

Directeurs de recherche C.N.R.S. :

P.CLAUDY
M.MURAT
A.NOUILHAT
M.A.MANDRAND (Mme)

THERMOCHIMIE MINERALE
GEMPPM*
PHYSIQUE DE LA MATIERE
GENETIQUE MOLECULAIRE DES
MICROORGANISMES

Directeurs de recherche I.N.R.A. :

G.BONNOT
S.GRENIER
Y.MENEZO

BIOLOGIE
BIOLOGIE
BIOLOGIE

Directeurs de recherche I.N.S.E.R.M. :

A-F. PRIGENT (Mme)
N.SARDA (Mme)

CHIMIE BIOLOGIQUE
CHIMIE BIOLOGIQUE

* GROUPE D'ETUDE METALLURGIE PHYSIQUE ET PHYSIQUE DES MATERIAUX

1971

1971

1971

à Stéphane et Julie,
Sophie et Michel,
Jacqueline et Michel.

LE MATERIAU TERRE.
compactage.
comportement.
application aux structures en blocs de terre

RESUME

Le matériau Terre désigne les matériaux meubles argileux que l'on trouve en général sous la terre végétale. Il est utilisé en génie civil pour la construction de remblais ou de couches de chaussées. C'est également un matériau de construction utilisé depuis des millénaires et que l'on redécouvre aujourd'hui.

La première partie de cette étude a eu pour objet d'évaluer l'influence de la composition du matériau et des conditions de mise en oeuvre sur les caractéristiques géotechniques de la terre après compactage pour son utilisation en génie civil et en construction.

Ensuite, l'évolution des caractéristiques mécaniques et rhéologiques de ce matériau a été étudiée durant son séchage. Certaines modélisations développées pour les sols non saturés et pour les bétons ont été appliquées aux résultats expérimentaux. Une partie de cette étude a été faite sur les sols traités à la chaux et au ciment.

Une autre partie a été consacrée aux structures maçonnées en blocs et mortiers de terre. Un élément de maçonnerie plane, ainsi qu'un arc et une coupole ont été expérimentés. Les modélisations numériques réalisées en prenant en compte un comportement élastique des matériaux et l'ouverture des fissures ont donné des résultats proches des résultats d'essais.

EARTH, AS A MATERIAL
compaction,
behavior,
application to earth block structures

ABSTRACT

Earth means all type of loose soils which can be generally found under humus. It can be used in civil engineering for the building of embankments or for road layers. It is also a building material that has been used for thousands of years and is now being rediscovered.

The object of the first part of this study is to evaluate the influence of the composition of the material and of the conditions of its implementation on the geotechnical characteristics of earth, after compaction, for its use in civil engineering and construction.

Then, the evolution of the mechanical and rhéological characteristics of this material have been studied during its drying. Some models, developed for non saturated soils and for concrete, have been applied to the experimental results. A part of this study has been performed on lime and cement treated soils.

Another part concerns masonry structures made with earth blocks and earth mortars. An element of plane masonry, as well as an arch and a cupola have been tested. Numerical models using an elastic constitutive law and taking cracks into account have given results very close to experiments.

REMERCIEMENTS

Comme j'ai mis cent ans, ou presque, à développer, puis à écrire cette thèse, je souhaite bien plus de cent ans de bonheur en remerciement à tous ceux qui m'ont aidée.

Je voudrais tout d'abord saluer la mémoire de Monsieur Michel Prunier, qui m'a accordé sa confiance pour débiter cette étude, et m'a ensuite toujours soutenue et conseillée.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord bien sûr à Ali Mesbah pour son aide, sa participation et sa disponibilité tout au long de ces années de recherches.

Je n'oublierai pas tous les étudiants qui, dans le cadre de leurs Travaux de Fin d'Etudes ou de leur Diplôme d'Etudes Approfondies, ont apporté une pierre (ou plusieurs) à cet édifice. Je pense les avoir tous cités dans la bibliographie.

Tous ces travaux n'auraient pu voir le jour sans l'aide des techniciens du Laboratoire Géomatériaux, et notamment de Claude Barbasange, ni l'intervention du Service Intérieur que j'ai sollicitée de nombreuses fois. Qu'ils trouvent ici les remerciements que je n'ai pas toujours exprimés.

Et il en est de même pour le document écrit. Ma gratitude va de tout coeur à Corinne Bénito pour la frappe, à Marc Charrier et au service reprographie pour le tirage et à Serge Leroueil qui a accepté d'en relire en détail une grande partie.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous ceux et celles qui ont joué le rôle de poil à gratter pour me pousser à la rédaction de ce document. Je pense à Daniel Sené et Jean-Claude Ruyschaert, mais aussi à Monsieur Hiriart, qui ont finalement réussi à me persuader de finaliser mes recherches par un texte écrit.

Enfin, un grand, un immense merci à ma famille et mes ami(e)s, qui ont, malgré tout, continué à croire à l'apparition du monstre du Loch Ness que constituait cette thèse.

LE MATERIAU TERRE compactage, comportement, application aux structures

SOMMAIRE

RESUME	
français	6
anglais	7
REMERCIEMENTS	9
SOMMAIRE	11
LISTE DES ANNEXES	19
AVANT-PROPOS	21
INTRODUCTION	23
I - UTILISATION DE LA TERRE EN CONSTRUCTION ET EN GENIE CIVIL	25
I - 1 Composition de la terre	25
I - 2 Les différents modes d'utilisation du matériau Terre en construction	27
I - 2 . 1 Contexte des recherches sur la construction en terre	27
I - 2 . 2 Mise en oeuvre de la terre à l'état sec, soit pour $6% < w < 20%$	28
I - 2 . 2 -1 Le pisé	28
a) Le pisé traditionnel	
b) Le pisé moderne	
c) Intérêts et inconvénients du pisé	
I - 2 . 2 -2 Le bloc de terre	33
a) Les presses	
b) Fonctionnement des presses	
c) Chaîne de production de blocs	
d) Maçonnerie de terre	
I - 2 . 3 Utilisation de la terre à l'état humide	36
I-2-3.1 Construction en masse de murs	36
a) Matériau porteur	
b) Matériau non porteur	
I-2-3.2 Blocs d'adobe	37
I-2-3.3 Mortiers et enduits à base de terre	37
I - 2 . 4 Conclusion	38
I - 3 La terre en géotechnique	39
I - 3 . 1 La terre en Mécanique des Sols	39
I-3 .1 -1 Les méthodes courantes en Mécanique des Sols	39
a) l'essai oedométrique	
b) l'essai triaxial de révolution	
I-3 .1 -2 Présentation de certains éléments de recherche en cours en mécanique des sols	44
a) Les matériels d'essais	
b) Comportement des matériaux non saturés	
I - 3 . 2 La terre en Géotechnique routière	45
I - 4 Conclusion sur les théories appliquées au sols	47

II - COMPACTAGE ET CARACTERISTIQUES MECANIKES	49
II - 1 Le compactage de la terre non stabilisée	49
II - 1 . 1 Les objectifs du compactage	49
II - 1 . 2 Théories sur le compactage des matériaux non saturés	50
II -1 .2 -1 Phénomènes observés	50
a) Approche volumétrique	
b) Perméabilité à l'eau et à l'air	
c) Modélisations possibles de ces phénomènes	
II -1 .2 -2 Analyse en contrainte, du comportement d'un sol lors du compactage	59
a) Extension de la notion de contraintes effectives	
b) La succion, paramètre indépendant	
c) Conclusions relatives aux différents modes de prise en compte des contraintes	
II - 1 .3 Représentation expérimentale du compactage	79
II - 1 .3-1 Les essais de compactage	79
a) Essai Proctor Normal et Modifié	
b) Essai CBR, associé à l'essai Proctor	
c) Vibrocompression	
d) Presse de compactage à cisaillement giratoire	
e) Essai de Compactage Statique	
II - 1 .3-2 Relation entre essai Proctor et essai de Compactage Statique	88
a) Calage de l'essai de compactage statique	
b) Compactage et chemin oedométrique	
c) Comparaison réalisée entre essais Proctor et de compactage statique	
d) Conséquences sur la reconstitution des éprouvettes	
e) Comparaison énergétique entre Proctor et compactage statique	
II - 1 .3-3 Conclusions sur les mécanismes de compactage	104
II - 1 .4 Caractéristiques géotechniques obtenues par le compactage	107
II - 1 .4 -1 Influence du compactage et de la teneur en eau sur la densité sèche	107
a) Influence de la granulométrie	
b) Degré de saturation à l'optimum	
c) Influence de la force de compactage et de l'hypercompression	
II - 1 .4 -2 Variation de la densité sèche en fonction du type d'argile	115
II - 1 .4 -3 Influence de la stabilisation sur la densité sèche	118
a) Intérêt des liants	
b) Influence des liants hydrauliques sur la densité sèche	
c) Influence des liants hydrauliques sur la teneur en eau optimale de compactage	
II - 1 .4 -4 Proposition de modélisation des caractéristiques géotechniques obtenues par le compactage	125
a) Signification et intérêt de la valeur de la densité sèche	
b) Modélisation suivant la ligne des optima de densité sèche	
c) Evaluation de la densité sèche, à teneur en eau constante	
d) Comparaison entre les deux modélisations	
II - 1 .4 -5 Conclusions sur la densité sèche	137
II - 1.5 Conclusion sur le compactage des sols	137
II - 2 Séchage (et cure) de la terre compactée	139
II - 2 .1 Dessiccation enregistrée pendant le séchage	139
II - 2 .1 -1 Les deux phases du dessèchement [42]	139
a) Présentation de la théorie de Hillel	
b) Etude de la phase 2	
c) Etude de la phase 1	
d) Remarque concernant les systèmes non isothermes	
II - 2 .1 -2 Mesures de pertes d'eau réalisées au laboratoire	143
a) Mesures à conditions hygrothermiques constantes	
b) Comparaison entre différentes conditions de séchage	
c) Influence du temps de séchage	
II - 2 .2 Evolution de la succion en fonction du séchage	145

II - 2.2 -1 Etudes réalisées sur le limon de Jossigny	146
II - 2.2 -2 Etudes réalisées, au LGM, sur les sols Diémoz et Malet3	147
a) Valeur de la succion, juste après le compactage	
b) Variation de succion pendant le séchage des matériaux	
II - 2.2.3 Thermique et humidité de la terre	154
II - 2.2.4 Conclusion	154
II - 3 - Résistance en compression simple des matériaux compactés puis séchés	155
II - 3.1 Système d'essai	155
II - 3.2 Résistance en compression simple des sols compactés, non traités	156
II - 3.2 - 1 Influence du degré de séchage du matériau	156
II - 3.2 - 2 Influence de la teneur en eau et de la contrainte de compactage	158
II - 3.2 - 3 Influence du type et de la quantité relative d'argile	159
a) Matériau à base de Kaolin	
b) Matériaux à base de Montmorillonite	
II - 3.2 - 4 Influence du paramètre succion	162
II - 3.2 - 5 Retrait dans les sols séchés	163
II - 3.2 - 6 Comportement des sols, immédiatement après compactage	163
a) Essai CBR et succion	
b) Résistance immédiate et teneur en eau	
II - 3.2 - 7 Influence de la contrainte de compactage	165
II - 3.2 - 8 Résistance en compression et construction en terre	166
II - 3.3 Traitement des sols aux liants hydrauliques	167
II - 3.3 - 1 Intérêt du traitement des sols	167
II - 3.3 - 2 Traitement au ciment	170
a) Teneur en eau résiduelle et conditions de cure	
b) Influence de la granulométrie	
c) Influence de la teneur en eau de compactage	
d) Influence du traitement sur la densité sèche	
e) Influence du type d'argile	
f) Influence du type de ciment	
g) Conclusions sur le traitement au ciment	
II - 3.3 - 3 Traitement mixte chaux-ciment	179
a) Réactions observées lors du traitement mixte en terrassements routiers	
b) Influence du dosage relatif chaux-ciment	
b-1) Traitement mixte des limons	
b-2) Traitement mixte des sols fins très argileux	
c) Influence de la teneur en eau et de la densité sèche	
d) Résistance en fonction du temps	
e) Influence du compactage et du type d'argile lors d'un traitement mixte	
f) Conclusion sur les traitements mixtes	
II - 3.3 - 4 Traitement à la chaux	184
a) Influence du délai entre traitement et compactage	
b) Influence des conditions de cure sur la réaction chaux-argile	
c) Processus de prise et cinétique de la réaction	
d) Influence de la granulométrie	
e) Influence du type d'argiles	
II - 3.3 - 5 Traitement aux liants pouzzolaniques	192
II - 3.3 - 6 Influence des matières organiques et de certains autres produits	193
II - 3.4 Traitement des sols avec des produits de synthèse	194
II - 3.4 - 1 Les hydrophobants de synthèse	194
II - 3.4 - 2 Les hydrophobants naturels	195
II - 3.5 Mortier de terre et adobe	196
II - 3.5 -1 Mortier de terre et adobe sans fibres	196
a) Fabrication de briques stabilisées extrudées	
b) Etudes réalisées sur les mortiers de terre	
II - 3.5 -2 Adobes avec fibres	200
II - 3.5 -3 Conclusions sur les mortiers de terre et adobes	201

II - 4 Application à la construction en terre	202
II - 4.1 Evaluation et identification des matériaux disponibles	202
II - 4.2 Technologies adaptées aux matériaux	202
a) Capacité de la presse à compacter le matériau	
b) Niveau de qualité et de rendement requis	
c) Introduction de liants	
II - 4.3 Le problème du malaxage	204
II - 4.4 Influence du type de presses	206
a) Les différents types de presses à blocs de terre	
b) Presses travaillant à force imposée	
c) Presses travaillant à déplacement imposé	
II - 4.5 Conclusion sur le choix de la technologie adaptée	210
a) Choix de la technique	
b) Choix de la technologie	
c) Evaluation du coût total d'une opération de construction en terre	
d) Conclusion	
III - RHEOLOGIE DE LA TERRE COMPACTEE	217
III - 1 Les modélisations existantes, applicables pour caractériser le comportement de la terre	217
III - 1.1 Théories développées en Géotechnique - Courbe intrinsèque du matériau obtenue par le compactage et le séchage éventuel	219
III - 1.1 - 1 Variation de C, fonction de la succion	219
a) Equation théorique de la cohésion C - Théorie de Arquié	
b) Variation théorique de C d'un sol foisonné, avant compactage, en fonction de la teneur en eau du sol	
c) Variation de C, à teneur en eau constante, en fonction de l'effort de compactage	
d) Variation théorique de C, à contrainte de compactage donnée, en fonction de la teneur en eau du sol	
III - 1.1 - 2 Variation de φ , par le compactage	231
a) Variation de φ , en fonction de la teneur en eau de compactage	
b) Valeurs de φ , en fonction du compactage	
c) Valeurs possibles de φ , juste après compactage	
III - 1.1 - 3 Courbe intrinsèque des matériaux non saturés, après compactage	233
III - 1.1 - 4 Valeurs de C et φ , après séchage du matériau	234
III - 1.1 - 5 Conclusions	236
III - 1.2 Courbe intrinsèque des sols, d'après la théorie de la Mécanique des sols	237
III - 1.2 - 1 Variation de φ , par le "compactage", dans les sols saturés	237
a) Sols pulvérulents	
b) Matériaux argileux saturés	
c) Chemin de consolidation et compactage	
III - 1.2 - 2 Correspondance avec les sols compactés	243
III - 1.2 - 3 Extension de la théorie de Terzaghy	244
a) Angles φ' et φ^b	
b) Valeur de C	
III - 1.2 - 4 Conclusion	248
III - 1.3 Modélisation du comportement élastique des matériaux saturés	249
III - 1.3 - 1 Définition expérimentale du domaine élastique pour matériaux saturés	249
a) Domaine élastique après consolidation isotrope	
b) Evolution de la surface critique	
c) Consolidation anisotrope	
d) Conclusion	
III - 1.3 - 2 Modèle de Cam clay (1963, 1968)	255
a) Définitions	
b) Matériaux faiblement sur-consolidés ou normalement consolidés	
c) Matériaux fortement sur-consolidés	
d) Autres remarques	

III - 1.4 Modélisation du comportement de matériaux non saturés	260
III - 1.4 - 1 Hypothèses de base du modèle	260
III - 1.4 - 2 Modélisation numérique des courbes LC et SI pour un essai de consolidation	264
a) Modélisation de la courbe Lc	
b) Modélisation de la courbe Si	
c) Lois d'écroûissage - modélisation des déformations	
d) Conclusion sur les chemins isotropes ou oedométriques	
III - 1.4 - 3 Modèle d'Alonso étendu aux chemins en cisaillement	267
III - 1.4 - 4 Conclusion sur le modèle d'Alonso	269
III - 1.5 Utilisations actuelles et limites des modèles présentés	270
III - 1.5 - 1 Les effets du compactage	270
a) Structure interne obtenue par le compactage	
b) Comportement oedométrique des sols non saturés	
c) Compression statique et énergie de compactage	
d) Modélisation du compactage	
III - 1.5 - 2 Compactage et résistance en compression simple ou triaxiale	275
a) Sollicitations en contrainte de chargement, à partir de l'état initial	
b) Humidification à partir de l'état initial suivi d'une sollicitation en chargement	
c) Drainage (ou séchage) à partir de l'état initial, suivi d'une sollicitation en chargement	
d) Comportements observés dans les essais à la rupture, en cisaillement	
e) Limite du comportement élastique	
III - 1.5 - 3 Conclusion	287
III - 1.6 Modèles élaborés pour les bétons, ENS Cachan	288
III - 1.7 Comportement élastique de quelques matériaux	291
III - 1.7 - 1 Sables et argiles saturés	291
III - 1.7 - 2 Sols argileux non saturés	293
III - 1.7 - 3 Sols traités à la chaux et/ou au ciment	294
III - 1.7 - 4 Sables et graves traitées	295
III - 1.7 - 5 Bétons bitumineux et graves bitumes	295
III - 1.7 - 6 Bétons et bétons spéciaux	296
a) Les bétons courants	
b) Les bétons spéciaux	
III - 1.8 Conclusions	298
III - 2 Matériels et modes opératoires des essais utilisés	299
III - 2.1 Compactage	299
III - 2.2 Mesures de succion	301
III - 2.2 - 1 Essai au papier filtre	301
III - 2.2 - 2 Méthode de dessicateur	301
III - 2.2 - 3 Suivi de la succion pendant le compactage	302
III - 2.3 Essais de compression simple et triaxial	302
III - 2.3 - 1 Dispositifs mécaniques	302
III - 2.3 - 2 Système de mesure des déformations	304
III - 2.4 Essai de traction	307
III - 2.4 - 1 Essai brésilien	307
a) Modélisation numérique de l'essai brésilien	
a-1) Modélisation élastique sous force concentrée	
a-2) Modélisation élastique tridimensionnelle	
b) Modes opératoires de l'essai Brésilien	
III - 2.4 - 2 Essai de traction directe	315
III - 2.4 - 3 Essai de traction, par compression annulaire	316
III - 2.5 Essais de tenue à l'eau	317
III - 2.5 - 1 Principes généraux	317
III - 2.5 - 2 Essai d'érosion	318
III - 2.5 - 3 Essai de remontées capillaires	318
a) Mode opératoire	
b) Equations régissant les remontées capillaires	
c) Influence des conditions hygrothermiques de l'atmosphère d'essai	

III - 2.6 Conclusion	322
III - 3 Etude expérimentale et modélisation du comportement de la terre compactée	323
III - 3.1 Caractéristiques géotechniques et mécaniques des matériaux testés	323
III - 3.1 - 1 Identification des matériaux	323
III - 3.1 - 2 Compactage	323
a) Sol Diémoz	
b) Sol Malet	
III - 3.1 - 3 Courbes de succion en drainage	326
III - 3.2 Comportement élastique en compression simple	326
III - 3.2 - 1 Compression quasi-statique	326
a) Remarques générales	
b) Résultats expérimentaux obtenus sur le sol Diémoz non traité	
c) Résultats expérimentaux obtenus sur le sol Malet 3	
d) Résultats expérimentaux obtenus sur le sol Diémoz traité à 4 % de ciment	
III - 3.2 - 2 Compression en cycles, à fréquence élevée	334
III - 3.2 - 3 Relations entre E et les caractéristiques des matériaux	334
III - 3.3 Comportement en traction	336
III - 3.4 Essais triaxiaux	337
III - 3.4 - 1 Déroulement des essais	337
III - 3.4 - 2 Matériau Malet 3 humide	338
a) Résultats expérimentaux	
b) Application au modèle CCM/Alonso	
c) Application au modèle type béton - ENS Cachan	
III - 3.4 - 3 Matériau Malet 3 sec	344
a) Résultats expérimentaux	
b) Modélisation élyptique (ENS Cachan)	
III - 3.4 - 4 Evolution des surfaces limites avec la succion	346
III - 3.4 - 5 Conclusion	347
III - 3.5 Essais d'absorption capillaires	348
III - 3.5 - 1 Sols non traités	348
a) Influence du matériau	
b) Influence de compactage	
III - 3.5 - 2 Sols traités	349
a) Sol Brons	
b) Sol Malet 3	
III - 3.6 Conclusion	350
IV - APPLICATION AUX STRUCTURES MACONNEES EN BLOCS EN TERRE	351
IV - 1 Conception générale des structures en terre	352
IV - 1 - 1 La maçonnerie de terre	352
IV - 1 - 1 - 1 Montage de la maçonnerie	352
a) Les matériaux	
b) La mise en oeuvre	
IV - 1 - 1 - 2 Conception des structures et détails architecturaux	354
a) Conception de la structure	
b) Détails architecturaux	
c) Conclusions	
IV - 2 - Comportement mécanique de la maçonnerie en terre	359
IV - 2 - 1 Comportement de l'interface bloc-mortier	359
IV - 2 - 1 - 1 Revue bibliographique des comportements d'interface blocs-mortier	359
a) Essais de cisaillement-compression	
b) Essai de compression	
c) Conclusion	
IV - 2 - 1 - 2 Conditions de réalisation de l'étude expérimentale réalisée sur l'interface des blocs de terre compressée	363
a) Description du matériel d'essai	

b) Paramètres testés	
IV - 2 - 1 - 3 Principaux résultats	365
a) Observation générales	
b) Influence des différents paramètres testés	
c) Caractéristiques prises en compte dans les calculs aux éléments finis	
IV - 2 - 2 - 3 Conclusion	370
IV - 2 - 2 Etude bibliographique sur le comportement de murets en blocs rigides	371
IV - 2 - 2 - 1 Etude bibliographique sur les murets sollicités en contraintes uniaxiales et biaxiales	371
a) Modes de rupture observés lorsque $\theta = 0$	
b) Critère de rupture en compression	
IV - 2 - 2 - 2 Etude bibliographique sur les murets sollicités en cisaillement	373
a) Compression biaxiale, $\theta \neq 0$	
b) Essai biaxiaux en traction-compression	
c) Cisaillement de murets	
d) Comportement élastique des murets	
e) Influence du mortier	
IV - 2 - 2 - 3 Autres essais sur murets	379
IV - 2 - 2 - 4 Conclusion	379
IV - 2 - 3 Etude expérimentale sur le comportement de murets en blocs de terre	380
IV - 2 - 3 - 1 Dispositif expérimental utilisé	380
IV - 2 - 3 - 2 Caractéristiques des matériaux utilisés	381
a) Les blocs	
b) Le mortier de terre	
IV - 2 - 3 - 3 Résultats expérimentaux	382
a) Compression monotone à la rupture	
b) Essais cycliques	
IV - 2 - 4 Modélisation numérique du comportement de murets en blocs de terre	386
IV - 2 - 4 - 1 Modélisations réalisées	386
IV - 2 - 4 - 2 Calcul du comportement avant fissuration	387
a) Calculs préliminaires	
b) Comparaison avec les résultats expérimentaux	
IV - 2 - 4 - 3 Calcul du comportement après fissuration	388
a) Modélisation de l'apparition de la première fissure	
b) Comportement en phase fissuré	
c) Rupture du panneau	
IV - 2 - 4 - 4 Conclusion	394
IV - 3 Application aux structures courbes	395
IV - 3 - 1 Arc en maçonnerie	395
IV - 3 - 1 - 1 Expérimentation d'un arc en maçonnerie	395
a) Dispositif expérimental	
b) Caractéristiques des matériaux utilisés	
c) Résultats expérimentaux	
c-1 - Essais réalisés	
c-2 - Fissuration de l'arc	
c-3 - Comportement en déplacement de la structure	
IV - 3 - 1 - 2 Modélisation du comportement d'un arc en terre par les éléments finis-logiciel ELFIM	399
a) Modélisation réalisée	
b) Résultats en déplacements	
c) Résultats en contraintes	
d) Conclusions	
IV - 3 - 1 - 3 Modélisation à la rupture du comportement d'un arc en terre	402
a) Méthode de MERY	
b) Le programme VOUTE	
c) Application du Programme VOUTE à l'arc	
IV - 3 - 1 - 4 Conclusions	403

IV - 3 - 2 Comportement et calcul d'une coupole nubienne en terre	404
IV - 3 - 2 - 1 Expérimentation d'une coupole nubienne en briques de terre	404
a) Dispositif expérimental	
b) Matériaux utilisés	
c) Comportement de la structure	
IV - 3 - 2 - 2 Modélisation numérique simple du comportement de la coupole	408
a) Fonctionnement mécanique d'une coupole	
b) Calcul à la rupture	
c) Calcul sur le dôme seul	
IV - 3 - 2 - 3 Modélisation numérique tri-dimensionnelle du comportement de la coupole- programme CESAR du LCPC, version 3.0	412
a) Modélisation de la structure et maillage	
b) Conditions aux limites	
c) Calcul sous poids-propre	
d) Calcul sous 4,5 t d'eau	
e) Calcul sous 9,5 t d'eau	
f) Calcul sous la charge de rupture (force concentrée de 9,5 t)	
g) Conclusion sur les calculs effectués avec le logiciel CESAR	
IV - 3 - 2 - 4 Conclusion sur le comportement de cette coupole	418
IV - 3 - 3 Conclusion	419
IV - 4 Conclusions sur les structures en blocs de terre	420
V - CONCLUSION	422
BIBLIOGRAPHIE	425

Liste des annexes

ANNEXE 1

Outils adaptés pour le pisé

ANNEXE 2

Relation entre E_{Young} , $E_{oedométrique}$, $E_{volumétrique}$ / isotrope, G , K

ANNEXE 3

Identification des matériaux

ALP 1à6, K, M, CD300, Bron S, Diémoz, Malet 3 ...

ANNEXE 4

Etude volumétrique des surpressions d'air pendant le compactage

ANNEXE 5

Origine de la succion dans les sols

Angle θ , entre gaz-solide-liquide

ANNEXE 6

Notations utilisées par AURIAULT [49]

ANNEXE 7

Essais sur les matériaux

Courbes de compactage ($F - \Delta I$) - Matériau BronS

ANNEXE 8

Essais sur les matériaux

Calage de la courbe $\chi_d = f(F_c)$, en fonction de la granulométrie et du type d'argile

ANNEXE 9

Essais sur les matériaux

Courbes de compactage du matériau BronS : $e = f(\log s)$, à teneur en eau constante ($w = 6\%$, $8,3\%$, 10%)

ANNEXE 10

Essais sur les matériaux

Courbe de séchage des matériaux - BronS / CD 300

ANNEXE 11

Essais sur les matériaux

Cycles de remontées capillaires / séchage - matériau BronS, traité à 4 et 8% de ciment CPA et CPJ

ANNEXE 12

Essais sur les matériaux

Modélisation de l'essai Brésilien avec le logiciel CESAR

ANNEXE 13

Essais sur le Matériau DIEMOZ

Essais de compression simple et triaxiale

ANNEXE 14

Essais sur le Matériau MALET3

Essais de compression simple et triaxiale - Essais de remontées capillaires

Cycles de remontées capillaires et séchage (matériau traité)

ANNEXE 15

Courbes d'interface bloc-mortier de terre

ANNEXE 16

Murets en blocs de terre

Essais de compression simple sur murets maçonnés en blocs de terre

ANNEXE 17

Murets en blocs de terre

Modélisation du comportement de murets en blocs de terre - Calculs aux éléments finis (logiciel ELFIM)

ANNEXE 18

Murets en blocs de terre

Modélisation du comportement de murets en blocs de terre - Calculs aux éléments finis (logiciel CESAR)

ANNEXE 19

Arc en blocs de terre

Relevé des déplacements expérimentaux et de la fissuration

Modélisation du comportement d'un arc en blocs de terre - Calculs aux éléments finis (logiciel ELFIM)

ANNEXE 20

Arc en blocs de terre

Modélisation du comportement d'un arc en blocs de terre - Calcul à la rupture (logiciel VOUTE)

ANNEXE 21

Coupole en blocs de terre

Plan de la coupole réalisée - Relevé des déplacements expérimentaux et de la fissuration

Modélisation du comportement d'une coupole en blocs de terre - Calculs aux éléments finis (logiciel ELFIM)

ANNEXE 22

Coupole en blocs de terre

Modélisation du comportement d'une coupole en blocs de terre - Calculs aux éléments finis (logiciel CESAR)

AVANT - PROPOS

Le matériau terre est à la fois l'un des plus anciens, mais aussi des plus modernes des matériaux de construction. Grâce à une connaissance qui n'est qu'empirique, donc difficilement transmissible, on construit en terre depuis des millénaires. Pourtant il n'existe aucune méthode de calcul capable de dimensionner ou de vérifier l'une des nombreuses coupes actuellement construites dans le monde.

La terre est aussi un matériau constamment rencontré en Génie civil, puisque c'est celui que l'on trouve naturellement dans les travaux de terrassement en terrains meubles.

L'objet des études menées depuis 1982 au Laboratoire Géomatériaux de l'ENTPE, est de développer la connaissance du matériau terre, afin de mieux cerner sa mise en oeuvre en génie civil et son comportement dans les structures.

Que ce soit sous forme d'adobe (brique de terre modelée à la main à l'état plastique puis séchée), de pisé (damage de la terre entre deux banches) ou de briques de terre compressée (à l'aide de presses), les techniques de construction en terre dans les Pays en Développement (PED) présentent une alternative intéressante aux matériaux onéreux comme le béton et l'acier, sous réserve que celles-ci aient les bases scientifiques suffisantes pour garantir l'homogénéité et la fiabilité des briques et des structures en terre.

Dans le cas des terrassements en Génie Civil, les conditions économiques actuelles tendent à pousser les entrepreneurs à réutiliser le matériau naturel trouvé sur le site, même s'il ne rentre pas dans les normes de matériaux de qualité, plutôt que de l'extraire, le transporter jusqu'au lieu de dépôt où il sera malgré tout nécessaire de le mettre convenablement en place. D'où l'intérêt de développer les connaissances sur ces matériaux, peu étudiés jusqu'à maintenant, afin d'en permettre l'utilisation en remblai ou en couche de fondation de chaussées, voire en couche de roulement pour les chaussées en terre.

INTRODUCTION

La première question que l'on peut se poser est : "Qu'est ce que la Terre? De quoi est composé ce matériau ?"

C'est, avant tout, un matériau naturel, meuble, extrait sur le site ou à proximité du site de construction. Il est constitué d'un mélange de graviers et de sables, enrobés dans une matrice fine, plus ou moins argileuse.

Pour le maçon local, la terre est la couche de sol meuble, située sous la terre végétale, dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs mètres, mais dont la qualité peut varier suivant cette épaisseur.

Pour le géologue, il s'agit de dépôts morainiques, alluviaux ou éoliens dont l'origine est la décomposition des roches au cours des âges.

Pour le géotechnicien, la terre sera, d'après la classification de la Recommandation pour les Terrassements Routiers (RTR) [4], l'ensemble des matériaux fins de la classe A, auxquels s'ajoutent les matériaux B5 et B6, et les matériaux C qui, après criblage, entrent dans ces classes.

Pour le maître d'oeuvre ou l'entrepreneur de Travaux Publics, ce sont ces sols meubles, difficiles sinon impossibles à mettre en place par temps humide.

Dans le milieu de la recherche sur les géomatériaux, il est intéressant de remarquer que ces sols sont considérés comme "sables" par les mécaniciens des sols et comme "argiles" par les géotechniciens.

On voit donc que, contrairement aux autres matériaux de construction, tels que le béton, l'acier, le bois et leurs dérivés, la terre est un matériau difficile à définir, car elle n'a pas de composition précise normalisable.

Pour utiliser ce matériau, dans les conditions économiques actuelles, il faut pouvoir, a priori, connaître les conditions optimales d'emploi du matériau à utiliser, et a posteriori, vérifier que le matériau et les structures fabriquées correspondent bien aux normes de qualité et de résistance requises par les bâtiments.

Ces conditions sont très différentes de celles qui avaient cours, il y a seulement 100 ans dans les pays occidentaux, ou il y a 50 ans dans les PED. A cette époque, une construction en terre était réalisée le mieux possible et pour durer le plus longtemps possible. Cette durée de vie allant de 8 ou 10 ans à ... plusieurs siècles. La ruine de la maison était perçue comme "normale".

Actuellement, le béton donne une telle impression de solidité et de pérennité que l'on ne peut plus proposer de construire en terre, un édifice dont on ne peut garantir la qualité pour 20 ou 30 ans... même si certaines structures en béton n'atteignent pas cette durée de vie ! Il faut donc mettre au point des méthodes de construction et de vérification de structures qui permettent de donner une assurance sur la pérennité des constructions en terre.

La grande diversité des matériaux et des modes de mise en oeuvre rendent nécessaires la mise en évidence et l'étude des paramètres de base qui influencent les caractéristiques mécaniques (c'est-à-dire caractéristiques géotechniques de compactage et résistance) et rhéologiques (comportement et relations entre

contraintes et déformations) de la terre ainsi que le comportement des structures en terre. En raison du grand nombre de ces paramètres, il n'a pas été possible de les étudier tous, en détail, dans le cadre de la présente étude. Certains, jugés plus importants que d'autres, ont été très développés ; d'autres ont été à peine abordés. Pour des raisons exposées plus loin, l'accent a été mis sur une méthode particulière d'utilisation de la terre : la construction en blocs de terre crue compressée.

Trois thèmes principaux ont été développés : l'influence du matériau et des conditions de fabrication et de mise en oeuvre sur les caractéristiques géotechniques (densité, compactage, résistance à sec et humide), le comportement rhéologique (déformabilité, fluage, caractéristiques de l'interface mortier-briques), et les conséquences sur les structures en terre (mur, arcs et coupoles).

Dans la mesure du possible, on a essayé de relier ces caractéristiques techniques d'une part, à des notions plus technologiques telles que la conception ou l'efficacité des matériels utilisés et d'autre part, à des considérations plus économiques pour effectuer le transfert des connaissances de laboratoire aux nécessités des chantiers. L'objectif final est, dans tous les cas, de comprendre les phénomènes, afin d'aboutir à un matériau homogène, fiable et résistant, et à des structures en terre modélisables et pérennes.

Les études sur le béton, débutées il y a 100 ans environ, sont loin d'être terminées... De même, cette étude ne relate l'exploration que de quelques zones dans une région quasiment vierge de toute étude d'ensemble.

Ce document est découpé en quatre chapitres principaux :

- I - Utilisation de la terre en construction et en géotechnique

Il s'agit d'une présentation du matériau lui-même et des ses possibilités d'utilisation pour les terrassements et les chaussées ou pour la construction de bâtiments.

- II - Compactage et caractéristiques mécaniques

Dans cette partie, on étudiera d'abord les mécanismes de la mise en oeuvre des sols compactés, suivant un mode statique qui sera comparé au mode dynamique de l'essai Proctor. Ensuite, seront présentées les variations des caractéristiques géotechniques et de résistance après séchage des sols compactés en fonction des compositions des sols, de leur compactage et de leurs traitements éventuels. Enfin, ces études ont été appliquées à l'élaboration des blocs de terre compressés pour la construction.

- III - Rhéologie de la terre comprimée

Dans cette partie seront présentées, dans un premier temps, diverses théories utilisées en géotechnique routière, en mécanique des sols et sur les bétons pour caractériser les relations entre les sollicitations appliquées aux matériaux et l'état dans lequel il se trouve ou leur réponses en déformations et contraintes. Ces théories ont ensuite été comparées aux résultats d'essais triaxiaux réalisés sur un sol compacté.

- IV - Structures maçonnées en blocs de terre

Les études précédentes sont utilisées pour étudier le comportement de structures en blocs de terre, maçonnées avec un mortier de terre. Après une étude bibliographique relative au comportement des maçonneries en blocs de béton et de terre cuite, on présentera les études réalisées pour caractériser successivement le comportement de l'interface entre blocs et mortier de terre, celui d'un élément de maçonnerie de 1m²environ, et enfin celui de deux structures courbes, un arc surbaissé et une coupole nubienne. Dans chacun des cas, une modélisation numérique a été réalisée et comparée aux résultats expérimentaux.