



T H È S E

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE NANCY I

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE SPÉCIALITÉ
(mécanique des sols)

par

Jean Paul TISOT

Ingénieur E.N.S.G.

Compactage et propriétés des matériaux compactés,
application aux marnes du Keuper de Lorraine

Soutenue publiquement le 25 Janvier 1974 devant la Commission d'Examen

| | | |
|-----|------------|------------|
| MM. | J. HILLY | Président |
| | P. BLAZY | Examineur |
| | R. HOUPERT | Rapporteur |

TABLE DES MATIERES

| | Page |
|---|--------|
| INTRODUCTION | I - 1 |
| Chapitre 1 - LE MATERIAU | - 1 - |
| INTRODUCTION | 1 - 1 |
| 1.1 - DESCRIPTION GEOLOGIQUE | 1 - 1 |
| 1.1a) Généralités | 1 - 1 |
| 1.1b) Lithologie | 1 - 3 |
| 1.1c) Composition chimique et minéralogique | 1 - 4 |
| 1.1d) Conclusion | 1 - 6 |
| 1.2 - DESCRIPTION GEOTECHNIQUE | 1 - 6 |
| 1.2a) Essais effectués - Résultats | 1 - 6 |
| 1.2b) Discussion des résultats | 1 - 8 |
| 1.2c) Conclusion | 1 - 12 |
| 1.2d) Caractéristiques d'identification après le compactage | 1 - 13 |
| FIGURES 1-1 à 1-13 | 1 - 14 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 1 - 24 |
| Chapitre 2 - LE COMPACTAGE | - 2 - |
| INTRODUCTION | 2 - 1 |
| 2.1 - THEORIES DU COMPACTAGE | 2 - 3 |
| 2.2 - ESSAIS DE COMPACTAGE AU LABORATOIRE | 2 - 6 |
| 2.3 - ESSAIS EFFECTUES ET RESULTATS OBTENUS | 2 - 10 |
| 2.4 - RELATIONS EMPIRIQUES ENTRE LES CARACTERISTIQUES D'IDENTIFICATION ET L'OPTIMUM PROCTOR | 2 - 12 |
| 2.4a) Limites d'Atterberg | 2 - 12 |
| 2.4b) Caractéristiques dimensionnelles | 2 - 15 |
| 2.4c) Le cas du Keuper | 2 - 17 |
| 2.5 - CONCLUSION | 2 - 19 |
| FIGURES 2-1 à 2-18 | 2 - 21 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 2 - 34 |

| | Page |
|---|--------|
| Chapitre 3 - PROPRIETES MECANQUES A LA TENEUR EN EAU DE COMPACTAGE | - 3 - |
| INTRODUCTION | 3 - 1 |
| 3.1 - MESURES EFFECTUEES - RESULTATS | 3 - 1 |
| 3.1a) <i>Essais de poinçonnement C.B.R.</i> | 3 - 1 |
| 3.1b) <i>Essais de compression simple</i> | 3 - 2 |
| 3.1c) <i>Essais de résistance à la pénétration</i> | 3 - 3 |
| 3.1d) <i>Conclusion</i> | 3 - 5 |
| 3.2 - EXPLOITATION STATISTIQUE DES RESULTATS | 3 - 5 |
| 3.2a) <i>Introduction</i> | 3 - 5 |
| 3.2b) <i>Régression linéaire</i> | 3 - 6 |
| 3.2c) <i>Régression multiple linéaire</i> | 3 - 8 |
| 3.2d) <i>Conclusion</i> | 3 - 13 |
| 3.3 - ESSAIS D'UTILISATION DE RELATIONS THEORIQUES | 3 - 14 |
| 3.3a) <i>Introduction</i> | 3 - 14 |
| 3.3b) <i>Calcul de Q</i> | 3 - 14 |
| 3.3c) <i>Calcul de RP</i> | 3 - 19 |
| 3.3d) <i>Propriétés mécaniques sur la branche humide</i> | 3 - 20 |
| 3.3e) <i>Conclusion</i> | 3 - 21 |
| 3.4 - CONCLUSION | 3 - 21 |
| FIGURES 3-1 à 3-17 | 3 - 23 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 3 - 35 |
| Chapitre 4 - PROPRIETES MECANQUES APRES SATURATION | - 4 - |
| INTRODUCTION | 4 - 1 |
| 4.1 - LE GONFLEMENT PENDANT LA SATURATION | 4 - 1 |
| 4.1a) <i>Expériences et résultats</i> | 4 - 1 |
| 4.1b) <i>Discussion des résultats - Prévission des gonflements</i> | 4 - 2 |
| 4.2 - COMPRESSION - REBOND | 4 - 4 |
| 4.2a) <i>Expériences réalisées - Résultats obtenus</i> | 4 - 4 |
| 4.2b) <i>Compactage et consolidation</i> | 4 - 8 |
| 4.3 - PERMEABILITE | 4 - 8 |
| 4.3a) <i>Expériences réalisées - Résultats obtenus</i> | 4 - 8 |
| 4.3b) <i>Discussion des résultats</i> | 4 - 12 |
| 4.3c) <i>Application</i> | 4 - 13 |

| | Page |
|--|--------|
| 4.4 - RESISTANCE AU CISAILLEMENT | 4 - 14 |
| 4.5 - CONCLUSION | 4 - 18 |
| FIGURES 4-1 à 4-19 | 4 - 19 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 4 - 35 |
| CONCLUSION | C - 1 |

INTRODUCTION

Les sols sont des *matériaux naturels* utilisés dans les constructions humaines, soit comme *support*, soit comme *matériau constitutif*. La principale différence qui existe entre les éléments qui constituent la superstructure d'un ouvrage et le sol porteur, est que, s'il est possible de choisir le bois, le béton ou l'acier utilisés dans le premier cas, il faut, par contre, se contenter du sol dont on dispose dans le second cas. Ce sol a ses propres caractéristiques qui constituent *les données du problème*.

Cependant, ces difficultés ont orienté les ingénieurs vers la recherche de moyens susceptibles d'améliorer les caractéristiques du sol que l'on *doit* utiliser. Cette amélioration est généralement recherchée par une *densification* que l'on peut obtenir en place en utilisant divers moyens de *consolidation* du sol lorsque celui-ci est utilisé comme support.

Dans le cas où le sol est utilisé pour édifier un ouvrage, on est amené à *fabriquer un nouveau matériau*, constitué des mêmes éléments que le sol naturel mais avec un nouvel assemblage. Ce réarrangement des grains est appelé *compactage*. Le compactage a donc pour but premier de constituer à partir des éléments d'un sol naturel, auxquels on peut éventuellement ajouter quelques *adjuvants*, un matériau susceptible d'être utilisé pour édifier un ouvrage dont la stabilité devra être assurée. Pour aboutir à ce résultat, il est nécessaire de définir les conditions de fabrication du nouveau matériau, ainsi que son comportement sous diverses sollicitations.

Au cours de cette étude, nous avons utilisé comme exemple de matériau, des marnes du Keuper inférieur de Lorraine. Ces marnes ont été rencontrées à l'occasion de travaux et de recherches effectués par le Centre de Géomécanique de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et de Prospection Minière, et les problèmes qui sont liés à leur nature sont notables. Remarquons aussi qu'elles affleurent sur des surfaces assez importantes et donc que dans certains cas, elles peuvent constituer un matériau dont l'emploi est rendu presque obligatoire, sous peine de transporter un autre matériau de caractéristiques peut-être meilleures, mais dont le prix de revient sera plus élevé.

Dans le présent mémoire, nous présentons un certain nombre de résultats concernant le compactage et les propriétés mécaniques du matériau Keuper compacté. Divers essais de laboratoire ont été utilisés pour cette étude et on s'est toujours attaché à définir la manière dont ils sont réalisés et à évaluer la valeur qu'on doit leur accorder. Le schéma de ce travail s'établit donc de la façon suivante :

1 - *Le matériau.* Il s'agit d'une description du sol utilisé dans l'étude. Cette description est géologique et géotechnique ; cependant, la partie géologique est assez succincte et s'attache plutôt à mettre en évidence quelques particularités. Dans la partie géotechnique, les résultats des essais d'identification classiques sont donnés et discutés.

2 - *Le compactage.* On présente tout d'abord les théories du compactage, puis les résultats obtenus sur notre sol en montrant les difficultés rencontrées dans la réalisation pratique des essais et en donnant des indications sur le mode opératoire à utiliser. Ensuite, on a cherché dans la littérature des relations empiriques destinées à la prévision des conditions de mise en place optimales.

3 - *Les propriétés mécaniques à la teneur en eau de compactage* sont étudiées au moyen d'essais simples et rapides qui aboutissent à la définition d'un certain nombre de paramètres. On a essayé de trouver des relations entre les paramètres mesurés, soit empiriques au moyen d'une analyse statistique, soit logiques en essayant d'utiliser des relations théoriques.

4 - *Les propriétés mécaniques après saturation* sont observées du double point de vue des déformations et de la résistance au cisaillement. Pour les déformations, on a étudié l'amplitude et le déroulement dans le temps des phénomènes. Les résultats obtenus pour la résistance au cisaillement mettent en évidence l'homogénéité du matériau.

CONCLUSION

La détermination en laboratoire des propriétés des sols est faite au moyen d'essais en général *normalisés*. La réalisation pratique de ces essais nécessite donc l'application d'un mode opératoire bien défini qui permet d'assurer leur reproductibilité et leur fidélité. D'autre part, on classe, en général, les propriétés des sols en deux catégories de paramètres, les paramètres *d'identification* et les paramètres *mécaniques*.

Le but principal des paramètres d'identification est de comparer les divers sols entre eux et, éventuellement, de les ranger dans des familles dont le comportement est particulier. Il est donc *évidemment* indispensable de définir et de respecter un mode opératoire très précis ; c'est à ce prix-là seulement que les comparaisons que l'on réalisera auront une signification et un intérêt.

Les paramètres mécaniques sont destinés à entrer dans un calcul numérique qui permet d'évaluer le comportement d'un ouvrage. Ils devraient être, *a priori*, plus indépendants des conditions expérimentales. En fait, ce n'est pas toujours le cas ; par exemple, lorsque l'on réalise un essai oedométrique classique, le chargement se fait en doublant pour chaque intervalle les charges appliquées. En changeant ce rythme, on constate que, si l'amplitude des tassements n'est pas trop affectée, par contre leur évolution dans le temps change d'une manière très importante. Il est alors délicat d'appliquer dans un calcul les résultats obtenus.

Nous pensons, en résumé, que si pour les paramètres d'identification il est primordial de suivre *à la lettre* et dans les moindres détails la procédure d'essai, par contre, pour les paramètres mécaniques, on peut essayer de réaliser des essais tenant compte des facteurs extérieurs et modifiés en conséquence.

Ainsi, il sera possible, pour les paramètres déterminés d'une manière empirique, d'utiliser des relations établies statistiquement, du type de celles qui permettent d'évaluer les valeurs de l'optimum Proctor à partir des limites d'Atterberg. La validité de l'application *in situ* des résultats expérimentaux ne pourra être vérifiée que par l'expérience ; cependant, on peut penser

améliorer la valeur des résultats grâce à une plus grande rigueur dans l'expérimentation.

En matière de sols compactés et en particulier lorsqu'il s'agit de sols argileux, on s'attache à rechercher l'influence des conditions de mise en place (poids spécifique sec et surtout teneur en eau) sur les propriétés mécaniques. En effet, il est très important de connaître cette influence pour évaluer correctement les possibilités d'*utilisation* d'un sol argileux, car la modification de la teneur en eau naturelle d'une argile n'est pas chose facile. En considérant les propriétés mécaniques à la teneur en eau de compactage, on a mis en évidence que la principale différence qui existe entre les échantillons situés du côté sec et ceux situés du côté humide est la *déformabilité* beaucoup plus grande des seconds. Lorsque le matériau compacté est saturé, on constate une *uniformisation* de la plupart des propriétés, mais le sol a malgré tout une certaine *mémoire* qui se traduit dans sa structure.

Enfin, au sujet des résultats obtenus sur le Keuper, il semble *possible d'utiliser ce matériau* pour édifier des remblais de hauteur moyenne et en employant des engins de compactage classiques tant que la teneur en eau naturelle n'est pas supérieure de plus de 3 % à la teneur en eau optimale. On pourra évaluer rapidement et avec une bonne approximation cette teneur en eau optimale à partir de la relation trouvée entre w_{opt} et la limite de liquidité. Par ailleurs, dans la tranche superficielle, il sera difficile de trouver des zones d'emprunt où la teneur en eau naturelle soit très inférieure à la teneur en eau optimale. Si l'on arrive à mettre en place le matériau, les caractéristiques à long terme seront satisfaisantes tant du point de vue de la stabilité que du point de vue des tassements ; de plus, comme les teneurs en eau sont assez élevées, on ne craindra pas de gonflements importants. La question des matériaux provenant de zones plus profondes où existe encore du gypse est plus délicate, car ce gypse est susceptible de se dissoudre.