

UNIVERSITE DE NANCY

DOCUMENT



n° 6545

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE  
DE GÉOLOGIE APPLIQUÉE  
ET DE PROSPECTION MINIÈRE

FACULTÉ DES SCIENCES

DIPLOME D'ÉTUDES APPROFONDIES  
DE GÉOLOGIE APPLIQUÉE  
(Mécanique **des sols** et **des** roches)

ÉTUDE PONCTUELLE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES  
ET MÉCANIQUES DU KEUPER INFÉRIEUR

A. SCHWENZFEIER

Laboratoire de Mécanique des  
Sols et des Roches de

l'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE  
DE GÉOLOGIE

1969

# SOMMAIRE

Pages

Avant Propos

Chapitre 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

A) Généralités	1
B) Propriétés des argiles surconsolidées	1
C) Propriétés géotechniques de la "Keuper Marl"	6

Chapitre II : ETUDE GEOTECHNIQUE DE LA TRANCHEE A6

A) Etude géologique	13
B) Caractéristiques physico-chimiques	15
B-1 - Teneur en eau - densité	15
B-2 - Minéralogie et structuro	16
B-3 - Essais d'identification	17
C) Caractéristiques mécaniques	18
C-1 - Essais de consolidation	18
C-2 - Essais de Cisaillement	20
C-3 - Etude géophysique in situ	24
D) Etude du matériau compacté	24

Chapitre III : CONCLUSIONS SUR L'ETUDE DES MARNES DU KEUPER

A) Difficultés rencontrées	31
B) Programme d'étude	32

Conclusion Générale

Bibliographie

Hors texte

FIGURES

- 1 - Histoire géologique d'une argile surconsolidée
- 2 - Histoire géologique d'une argile surconsolidée
- 3 - Coupe géologique du sondage A6
- 4 - Coupe géologique du sondage A13
- 5 - Coupe d'exécution de la tranchée A6
- 6 - Coupe géologique de la tranchée A6
- 7 - lame mince A6 D1 (1,20 ml)
- 8 - lame mince A6 (12,50 ml)
- 9 - Déformation d'éprouvettes d'échantillons intacts Ø 35
- 10 - Déformation d'éprouvettes compactées Ø 35

TABLEAUX

- 1 - Essais oedométriques
- 2 - Essai triaxial A6 O1 (a)
- 3 - Essai triaxial A6 D1 (c)
- 4 - " " A6 O1 (b)
- 5 - " " A6 D2
- 6 - Essai de cisaillement A6 D1
- 7 - Essai triaxial A6 P1 [a]
- 8 - " " A6 P1 (b)
- 9 - " " A6 P2 (a)
- 10 - " " A6 P2 (b)
- 11 - " " A13 P (a)
- 12 - " " A13 P (b)
- 13 - Essai de cisaillement A6 P1

## AVANT PROPOS

Les études entreprises par le Laboratoire de Mécanique des Sols et des Roches de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de NANCY sur le projet de liaison fluviale Rhin-Rhône entre CHARMES et CORRE ont servi de cadre à mes travaux de laboratoire.

Ceux-ci s'étayant sur une série d'échantillons de même nature devaient me permettre de dégager quelques enseignements sur les techniques d'essais et les propriétés géotechniques de la couche superficielle des marnes du Keuper inférieur. Ils ne constituent donc qu'un élément de mémoire technique convenant à un chercheur ou à un praticien désireux d'étudier le comportement de cette couche altérée.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

A - GENERALITES

La partie bibliographique de cette étude de la frange d'altération de la marne Keuper m'a permis de consulter de nombreux documents tant français qu'étrangers portant sur le cadre géologique (4,5,8) et les caractéristiques physico-chimiques des sédiments (9) mais peu s'intéressaient au problème géotechnique de la marne et de l'incidence de son degré d'altération.

Ainsi quelques praticiens, les pétroliers en particulier, ont noté au cours de forages dans le Trias (1,11) l'existence de pressions anormales pour des argiles non compactées.

Deux articles anglais qui semblaient pouvoir apporter une réponse à mon problème m'ont paru assez nouveaux et intéressants pour figurer dans le rapport en traduction sommaire.

- le premier (6) traite des propriétés des argiles surconsolidées et du phénomène d'altération.
- le second (21) est le matériau de référence "Keuper Marl" qui guidera mes essais de laboratoire.

6 - PROPRIETES DES ARGILES SURCONSOLIDEES

Traduction sommaire et partielle de l'article de LAURITS BJERRUM "Properties of overconsolidated plastic clays and Clay shales" (61)

Cet article se propose d'étudier tous les facteurs pouvant influencer le comportement d'une argile depuis son dépôt jusqu'au stade de l'altération.

## B-1 - Propriétés des Argiles inaltérées

Les argiles de cet article sont des argiles marines—qui ont été déposées au ~~tertiaire~~ <sup>secondaire</sup> il y a des millions d'années.

Par la superposition des sédiments cette argile se consolide sous l'accroissement de charge jusqu'à ce que le maximum de pression de consolidation soit atteint.

La phase élastique de cette compression croît avec le pourcentage des particules argileuses et constitue la majeure partie de la compression totale des argiles du Trias. Ainsi dans un essai de consolidation d'une argile plastique remaniée (fig. 11 on observe la phase de compression primaire [courbe AAll, la diminution de teneur en eau durant la phase secondaire (courbe AIE] et la phase de déchargement [courbe EX].

Pour une déformation élastique (**les** particules tendent à reprendre leur forme originelle au cours du déchargement tant que l'on est sous la pression de consolidation) on définit une sollicitation élastique dépendant de la pression considérée et des propriétés intrinsèques de l'argile.

Après la consolidation a lieu la phase diagénétique pendant laquelle l'argile laissée au repos pendant une longue période subit l'altération des pressions des couches susjacentes, du temps et autres agents physico-chimiques.

En ce qui concerne les effets de la diagenèse, on peut postuler que dans les zones de contact entre les particules, les contraintes sont élevées et on voit apparaître une recristallisation ; les surfaces de contact physiques s'adaptent l'une à l'autre sous l'effet de liens d'attraction moléculaire. Ainsi sous de hautes pressions et pendant de longues **périodes** la structure du **sol** peut, sans variation supplémentaire de volume ,devenir plus dure et plus cassante. Dans **le cas** de liens très durs on a une argile indurée. Un effet de ces liens diagénétiques est d'augmenter la résistance d'une argile pour un décroissement de charge sans changement de volume.

La pression de préconsolidation  $P_c$  étant la somme de la résistance au changement de volume et de la résistance due aux liens **diagénétiques**, on ne pourra dans les essais de **consolidation** déterminer la pression préexistante que dans le cas des argiles n'ayant pas subi de diagenèse.

Après une période **géologique** plus importante l'argile se décharge par suite d'érosion des terrains sous-jacents et grâce à son énergie élastique l'argile a tendance à s'expandre et accroître sa teneur en eau (pourcentages d'eau les plus importants à la surface du sol).

Durant le dépôt à une variation de contrainte effective verticale correspondait une variation de contrainte effective horizontale, suivant la résistance au cisaillement du sol : c'est la phase de consolidation primaire (courbe AB : fig. 2). Au déchargement l'argile libre de s'expandre dans la direction verticale mais non horizontale présentait des changements de contrainte plus importants dans le sens vertical qu'horizontal (courbe AV figure 23).

Par contre dans une argile où des liens diagénétiques se sont développés, ceux-ci empêchent l'expansion de l'argile **et** maintiennent la contrainte horizontale. Ainsi on aura une argile plus élastique avec un grand coefficient de poisson et de faibles contraintes horizontales. (courbe **AC** figure 21).

A la même profondeur dans un dépôt d'argile il y a une limite supérieure pour la contrainte horizontale effective. Quand l'effort excédera la contrainte de cisaillement **il** y aura apparition de ligne de cisaillement.

## B-2 - Effet de l'altération

Le terme altération est employé pour décrire toutes les évolutions des **dépôts** superficiels d'argile en y incluant les changements physiques ne dépendant pas des conditions climatiques. Dans l'altération d'une argile surconsolidée avec liens diagénétiques on distingue une phase primaire de désintégration et une phase secondaire de changements chimiques et de décomposition des minéraux.

Pour une argile à grande contrainte de liaison la première phase a lieu rapidement dans l'échelle géologique et nous nous limitons aux variations des propriétés mécaniques.

L'effet majeur de cette désintégration est la destruction graduelle des liens qui maintiennent la structure originelle.

L'énergie élastique libérée causera l'expansion de l'argile, l'augmentation de la teneur en eau et la diminution de la contrainte de cisaillement. Cette expansion devant avoir lieu dans la direction perpendiculaire à la surface, il y aura augmentation de la contrainte horizontale à une vitesse identique à celle de désintégration et jusqu'à ce que toute l'énergie élastique soit libérée. L'importance de l'expansion dépendra de la quantité d'énergie de contrainte latente. Ainsi pour des forces de liaisons faibles, une partie de l'énergie sera dissipée durant le déchargement et l'effet de la désintégration sera faible. Pour forces de liaisons importantes il y aura une grande expansion.

La contrainte, agent principal de la désintégration, a des effets décroissants avec la profondeur où l'on peut ainsi distinguer différentes zones d'intervention.

Juste à la surface il existe une zone de désintégration complète. Cette zone a été sujette au gel, variations de température, séchages et trempages répétés et sera influencée par des processus chimiques tels que l'oxydation et la décomposition des constituants minéraux des sols. La teneur en eau et la contrainte de cette zone dépend donc essentiellement des conditions climatiques.

Nous avons ensuite une zone de désintégration avancée. La contrainte de cette zone semble provenir des variations cycliques des contraintes effectives causées par la variation de la pression interstitielle résultant des fluctuations de la nappe aquifère et du gel saisonnier du sol susjacent. Suivant la surface topographique la contrainte de cisaillement y joue un rôle important. En général, elle possède un système de fissures ouvertes et a subi des changements d'ordre chimique. Elle sera plus molle et aura une teneur en eau supérieure à la zone sous-jacente.



Enfin la zone de désintégration moyenne où les effets des conditions de surface ne se font pas ressentir. Ainsi la contrainte du sol à une profondeur donnée est plus importante sous un talus que sous un sol horizontal. Des études détaillées ont mis en évidence une grande dispersion des teneurs en eau d'un point à un autre (largement supérieure à celle d'une argile inaltérée) qui reflète la variation de composition minéralogique [variation correspondante de la limite de liquidité]. La valeur de l'énergie de contrainte emmagasinée dans l'argile dépend essentiellement du type des constituants minéraux. Ces variations dans la composition minéralogique entraînent des gonflements et des contraintes locales non uniformes causant la destruction des liaisons. Il est même vraisemblable que ces contraintes localisées conduisent à des lignes de cisaillement et à la formation de fissures et fractures.

Le système de fractures intensif et irrégulier qui est caractéristique des zones de désintégration de schistes argileux est donc dû à cette non uniformité de la destruction des forces de liaison et de la distribution de l'énergie de contrainte latente.

## CONCLUSION

Les propriétés des argiles surconsolidées dépendent de deux facteurs : énergie élastique et forces de liaison.

Malheureusement, leur valeur ne peut être mesurée mais seulement appréciée sur le terrain. Pour cela il faut classer les argiles en 3 groupes :

### 11 ~~Les argiles surconsolidées~~ [faibles forces de liaison]

- énergie élastique dissipée en grande partie au déchargement
- au cours de l'altération réduction de la contrainte de cisaillement (accroissement de la teneur en eau et fissuration).

### 21 ~~Les schistes argileux~~ (forces de liaison moyennes)

- énergie élastique stockée dans la structure plus rigide de l'argile
- contrainte de cisaillement plus forte et faible contrainte horizontale.

- au cours de l'altération destruction des forces de **liaison**, avec accroissement de la teneur en eau et **diminution** de la contrainte de cisaillement.

### 31 ~~Les-schistes~~ (forces de liaison très importantes]

- aucun gonflement et énergie élastique non **libérée**
- force horizontale faible et contrainte de cisaillement élevée
- au cours de l'altération fragmentation des schistes jusqu'à obtention d'une argile surconsolidée avec décroissance de la contrainte de cisaillement.

## C - PROPRIETES GEOTECHNIQUES DE LA "KEUPER MARL"

Traduction sommaire et partielle du rapport de recherche "ENGINEERING PROPERTIES OF KEUPER MARL" [2] mis gracieusement à la disposition du laboratoire de Mécanique des **Sols** et des Roches **par** A.G. DAVIS.

Nous verrons successivement **les** principales propriétés géotechniques de ce **sol** en relation avec **les** différents degrés d'altération et des essais de compaction pour des marnes dures et de faible teneur en eau. Les essais de chargement de pieu, de mesure de tassement et de stabilisation chimique des marnes altérées n'ayant pas trait directement à mon étude ne seront pas cités dans ce sommaire.

### C-1 - Minéralogie et structure

On appelle marne Keuper une série particulière de sédiments déposés dans l'Europe du Nord Ouest et les Iles Britanniques pendant la période du Trias supérieur. Cette série du "Keuper Marl" comprend :

- 1 - Evaporitss : minéraux de **sels** précipités (sel, gypse, anhydrite)
- 2 - **les** grès : en lits accidentels (**1 m** à quelques mètres)
- 3 - les "calcaréous mudstones"
- 4 - Les argiles stratifiées rouge-bruns, vertes et "mudstones" appelées communément marnes.

Ces dernières, quoiqu'il n'existe pas de limites nettes entre les différents types font l'objet de l'étude. C'est un sédiment fortament surconsolidé d'une épaisseur maximum de 600 m ayant subi des pressions de 1 200- à 2 000 m avant la période d'érosion prétertiaire (couverture des sédiments du Jurassique et Crétacé).

Elle se présente sous forme de lits massifs et fracturés intercalés de bancs tendres et de faible épaisseur.

#### C-1-a - Minéralogie et Structure

Les minéraux composants sont en grande partie: illite, coarsite, carbonates, quartz, hématites avec traces de chlorite; ils obéissent tous à la "règle des phases de Gibbs" qui suggère l'équilibre chimique et la présence d'évaporites suppose un milieu de dépôt hypersolins.

Le principe d'activité  $A_c$

$$A_c = \frac{1 - \text{plasticité}}{\% \text{ fraction argileuse}} \quad (0,25 < A_c < 1) \text{ nous conduit à des marnes}$$

généralement inactives, mais l'activité peut varier considérablement pour des échantillons prélevés à moins de 3 mètres et suivant leur traitement avant les essais standards.

#### C-1-b - Rapport d'aggrégation

Une analyse par rayons X détermine un pourcentage de particules argileuses plus important que par analyse granulométrique. Cette mauvaise corrélation entre les paramètres géotechniques (limites d'Atterberg et résistance au cisaillement) et l'analyse par rayon X peut être attribuée à un agent de cimentation causant l'aggrégation des fines particules d'argile en unités supérieures [silt).

Le rapport d'aggrégation  $A_r$  est déterminé par les essais d'analyse standards.

$$A_r = \frac{\% \text{ particules argileuses}}{\% \text{ particules } < 2 \mu}$$

Une relation  $A_r = f(A_c)$  permet de retenir des échantillons du même type d'argile minérale. D'autres essais ont aussi montré que l'accroissement du % des particules argileuses déterminées par essai standard ne correspond pas à un égal accroissement de plasticité : ce phénomène peut s'expliquer par le fait que dans un état d'aggrégation les particules argileuses sont capables d'absorber autant d'eau qu'en état de désaggrégation.

### C-1-c - Description

Pour une argile faiblement ou normalement surconsolidée il est aisé de considérer la structure des particules argileuses comme dispersée ou floculée. Dans le cas d'une marne fortement surconsolidée on fait appel à une description de la texture qui pour la "Keuper Marl" s'annonce comme suit :

- 1) "peds" particules originelles séparées de l'agrégat par des surfaces de faiblesses.
- 2) "primary peds" structures simples qui s'assemblent pour former l'agrégat.
- 3) "cutans" modification de la texture par concentration de constituants particuliers.  
De deux sortes : - ferreux  
- ferro argileux
- 4) structure secondaire : arrangement des "peds" et des vides.

### C-2 - Cisaillement

Dans l'étage normal des pressions, les changements de volume et de pressions interstitielles sont généralement typiques d'une argile altérée surconsolidée mais la marne Keuper par son comportement nous conduit à des recherches dans un étage de pression beaucoup plus forte.

#### C-2-a - Erreurs dans l'essai triaxial rapide non drainé (essai UU)

- La prédominance de particules "silt" de forte perméabilité et la présence de quelques fissures causera un séchage plus rapide de l'échantillon qui ne sera pas à saturation au moment de l'essai.

- Du fait de la forte compressibilité de l'air Interstitiel, l'échantillon se consolidera sous la pression isotrope et on enregistrera une contrainte supérieure.

- Les fissures horizontales n'ont aucun effet sur la contrainte mais si elles sont inclinées entre 45° et 60° la contrainte mesurée le long de ce plan préférentiel sera plus faible.

- Quand il y a une zone plus tendre dans l'échantillon la contrainte est accrue par la consolidation de la zone de faiblesse.

Nous avons donc pour de basses pressions le comportement d'un sol normalement consolidé [ $c' = 0,9$  bar,  $\phi' = 45,5^\circ$ ] pour arriver à l'état d'un sol ~~consolidé~~ ~~consolidé~~ dans le domaine des hautes pressions. [ $c' = 11$  bar ;  $\phi' = 20,9^\circ$ ].

- Les essais sur des échantillons courts et à extrémités libres donnent une compression plus grande mais des contraintes effectives compatibles.

#### C-2-b - Effort - Déformation

Pour fixer les idées les échantillons testés au laboratoire de l'université de BIRMINGHAM avaient les caractéristiques suivantes :

$L = 3$  pouces ;  $0 = 1,5$  pouces ; litage vertical ou horizontal :  $W = 35$  %  
 $W_p = 25$  % : % de particules argileuses = 7 %.

Pression de la cellule : 0,07 bar à 100 bar avec utilisation de contrepression pour assurer une saturation complète.

Le résultat principal des essais est le passage de l'état fragile à plastique au cours de l'augmentation de la pression isotrope.

Pour une forte pression isotrope les plans de cisaillement sont diagonaux. Si on applique une très faible pression dans la cellule, la marne est sujette à une grande dilatation et tend à se fissurer le long du plan de litage.

Les résultats des essais drainés et non drainés sont sensiblement identiques et mettent en évidence une forte pression interstitielle caractéristique du degré de saturation.

### C-2-c - Influence de la structure sur la contrainte

Les essais de cisaillement des échantillons saturés: intacts et remaniés ont montré une sensibilité de l'ordre de 4.

$$\text{sensibilité} = \frac{\text{résistance à la compression simple de l'échantillon intact}}{\text{résistance à la compression simple de l'échantillon remanié}}$$

Ce phénomène suggère que l'agrégat d'argile forma une structure très dense et entrecroisée qui est détruite lors du cisaillement. Le cheminement des contraintes dans le cas de rigidité structurale peut être comparé à celui des argiles sensibles à joints cohérents.

### C-3 - Compactage

#### C-3-a - Effort de compactage

Des essais de compactage à différents teneurs en eau initiales et pour des efforts de compactage croissants suggèrent que la marne a été soumise à de très lourdes charges.

#### C-3-b - Teneur en eau et contrainte de cisaillement

Pour étudier l'effet de la teneur en eau sur la contrainte de cisaillement il suffit d'exécuter un essai sur deux échantillons de même densité mais de teneurs en eau différentes situées de part et d'autre de la courbe de compactage. Pour les deux échantillons le déviateur maximum étant égal à 20 % de la contrainte axiale, la valeur de  $\phi'$  est légèrement supérieure dans le cas de l'échantillon humide mais la valeur de  $C'$  est très faible.

WL	= 32 %	Wp = 18 %	% argile = 32 %
W sec	= 11,3 %	$\phi' = 30^\circ$	$C' = 0,07$ bar
W humide	= 16 %	$\phi' = 33^\circ$	$C' = 0,07$ bar

La teneur en eau affectera donc la stabilité à long terme d'une marne quand la saturation est possible.

### C-3-c - Perméabilité

Les perméabilités sont mesurées dans les cellules triaxiales sous contrepression et après consolidation. On s'aperçoit que la présence de l'air interstitiel réduit considérablement la perméabilité d'un échantillon compacté à une teneur en eau inférieure à l'optimum Proctor. En augmentant la contrepression on assure la saturation complète et on obtient la perméabilité vraie de l'échantillon. Pour une teneur en eau voisine de la limite de plasticité  $w_p$  on détermine la perméabilité minimum.

### C-3-d - Compactage sur-chaetief

- le compactage des marnes altérées humides voisines de la limite de plasticité ne pose aucun problème.

Dans le cas des marnes dures la densité sèche a tendance à augmenter pour une décroissance de la teneur en eau naturelle. On peut donc penser que la marne est composée de morceaux durs de densité propre qui n'est pas affectée par le processus de compactage ;

Par contre ces morceaux durs peuvent se cisailer en unités secondaires le long des plans de fissures quand la marne est altérée.

### C-4 - Propriétés géophysiques

Les mesures in situ en sismique réfraction ont donné une vitesse  $v$   
900 m/s <  $v$  < 2 700 m/s

et des ~~points de datation~~ <sup>module mécanique</sup> }  $0,3 < \nu < 0,5$   
}  $21 \times 10^{-6} < E < 17,5 \times 10^{-6}$

$\nu$  = coefficient de poisson

E = module élastique (bar)

Valeurs 1 000 x supérieures à celles mesurées par des essais statiques.

Les mesures de résistivité pour la couche superficielle ont donné 17  $\Omega m$

\*  
On vérifie ainsi en laboratoire que les marnes peu compactes à haute porosité présentent un fort degré de Saturation des **pores** et ainsi de faibles valeurs de  $E$  et  $\nu$  ,

! Pour une marne partiellement saturée la résistivité  $\rho$  dépend fortement du degré de saturation et sur le terrain on préférera la méthode de résistivité pour l'examen des dépôts de surfaces.



ETUDE GEOTECHNIQUE DE LA TRANCHEE A6

INTRODUCTION

De l'examen de tous les sondages géotechniques exécutés dans le cadre de la liaison Rhin-Rhône, le forage A6 situé à Savigny entre Charmes et Mirecourt, caractéristique des marnes versicolores du Keuper Inférieur, fut choisi pour l'étude ponctuelle de la couche superficielle de la Marne Keuper. Une étude géotechnique des propriétés de cet horizon nécessitant des prélèvements de même nature et en grand nombre une tranchée A6 fut creusée au droit de ce forage.

A - ETUDE GEOLOGIQUE

A-1 - Rappel géologique sur la série du Trias dans la région de Charmes

(d'après M. Philippe DAGUE)

Nous rencontrons successivement :

- Le Keuper supérieur : ensemble marno dolomitique constitué de marnes versicolores supérieures et des argiles de Chanville.
- Le Keuper moyen :
  - Dolomie de Beaumont (9 m)
  - Marnes versicolores Intercalaires (0,5 à 5 m)
  - Grès à Roseaux (7 à 9 m)
- Le Keuper inférieur : qui présente un phénomène d'altération superficielle.

en profondeur dans les conditions naturelles de gisement on trouve des marnes versicolores avec nodules d'anhydrite. Des filonnets de gypse fibreux s'échappent des nodules d'anhydrite et dissèquent la roche en un puzzle qu'il est

facile de reconstituer par la pensée. La dissolution des évaporites [anhydrite, gypse et sel gemme] dans la zone des affleurements est donc une des causes principales de l'altération. On trouve ainsi le gypse dissous entre 0 et 10 mètres et l'anhydrite apparaît au-delà de 25 mètres.

On remarque de plus l'absence de sel dans les sédiments à l'affleurement mais la présence de pseudomorphoses du sel et l'abondance de sédiments marneux surconsolidés nous laissent présumer sa présence originelle et sa dissolution ultérieure. Ces sédiments marneux se débitent en plaquettes et forment des cubes argileux distribués au hasard dans une matrice homogène également argileuse.

## A-2 - Coupe géologique des sondages A6, A13 et de la Tranchée A6

1) Le sondage A6 de 0 à 130 mm est foré de la cote 300,5 à 274,5 m  
La nappe est rencontrée à la cote 294 [figure 31]

Le sondage géologique A 13 de 0 à 88 mm est foré de la cote 292 à 260,5 m avec une nappe à la cote 285 (figure 41).

### 21 La tranchée A6

- une coupe met en évidence l'exécution de la tranchée avec le site de prélèvement des échantillons verticaux (figure 51)

- par contre la coupe géologique diffère légèrement de celle du sondage A6 par la présence d'évaporites à l'affleurement [figure 6).

0,00 à 0,20 m : Terre végétale

0,20 à 0,60 m : composé terre végétale et argile brun-rouge avec fragments dolomitiques.

0,60 à 1,30 m : argiles bariolées avec petits nodules de gypse

1,30 à 1,35 m : niveau d'évaporites en plaques résistantes.

1,35 à 2,00 m : marne gris vert plus sableuse avec gypse et anhydrite  
disposés en lits de paillettes avec circulation d'eau.

2,00 à 2,05 m : grandes plaques de gypse constituant un niveau dur.

Pour les essais de laboratoire les échantillons les plus caractéristiques sont appelés :

46 01 (1.00 ml : argile brun-rouge assez homogène avec nodules de gypse.  
 A6 92 (1,80 ml : argile gris-vert sableuse avec lits de gypse en paillettes  
 visuellement plus altérée et hétérogène.

## B - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

### B-1 - Teneur en eau et densité in situ

La teneur en eau naturelle est une fonction croissante de la profondeur (graphique 1).

Le niveau dur de gypse présente une teneur en eau plus faible tandis que dans le lit des paillettes de gypse saturées on peut trouver jusqu'à 46 % d'eau. On définit aussi le degré de saturation  $S_r = \frac{W}{\gamma_d - \gamma_s}$

A6 D1 : w = 37 %	$\gamma_d = 1,31 \text{ g/cm}^3$	$\gamma_h = 1,81 \text{ g/cm}^3$	$S_r = 97 \%$
A6 02 : w = 43 %	$\gamma_d = 1,21 \text{ g/cm}^3$	$\gamma_h = 1,74 \text{ g/cm}^3$	$S_r = 98 \%$

### Problème de l'étuvage

Par définition la teneur en eau d'un sol est :

$$W = \frac{\text{Poids de l'eau dans le sol}}{\text{Poids du sol sec}}$$

L'eau contenue dans le sol [interstitielle et hygroscopique] joue un grand rôle dans la structure même du matériau et nécessite une température d'étuvage appropriée. Des essais en étuve et des essais de dessiccation à l'humidimètre effectués sur les échantillons A6 D1 et A6 D2 montrent que le matériau ne subit aucune altération au cours de l'étuvage [graphique 21]. On adoptera dans la suite des essais une température d'étuvage de 105°C pour la mesure des teneurs en eau.

## CHAPITRE III

### CONCLUSIONS SUR L'ETUDE DES MARNES DU KEUPER

L'enseignement retiré de cette étude en laboratoire de la tranchée A6 ne me permet pas **à** cette date de conclure **sur les** propriétés géotechniques des marnes du Keuper ; **les** analyses minéralogiques actuellement en cours et des essais mécaniques mieux adaptés devant nous fournir certaines explications **sur** le comportement de ce matériau. **Je** concluerai donc **sur les** difficultés rencontrées au cours de l'expérimentation et **sur** l'étude du phénomène de l'altération des marnes.

#### A - DIFFICULTES RENCONTREES

##### 1) Hétérogénéité :

Elle est mise en évidence par l'étude microscopique **des** sédiments de la marne Keuper et **se** concrétise à l'échelle des éprouvettes triaxiales par un comportement Mécanique différent.

##### 2) Etuvage et mesure des teneurs en eau :

L'étuvage préalable à un compactage PROCTOR doit être effectué à **65° C** pour éviter toute détérioration possible de la structure. Les teneurs en eau mesurées à **65° C** et **à 105° C** présentent un écart qui serait dû à la présence **des** sulfates ; **des** analyses chimiques devraient conclure en ce **sens**.

##### 3) Saturation :

Elle est pratiquement réalisée par **les** essais **sur** échantillons intacts mais partielle **sur les** éprouvettes compactées.

#### 41 Présence des évaporites : gypse - anhydrite

~~L'anhydrite~~ <sup>Le gypse</sup> se forme, rappelons-le, par hydratation <sup>de l'anhydrite</sup> ~~du gypse~~ avec une forte augmentation de volume (30 à 50 %) se traduisant par des dislocations. Cette altération par les eaux de circulation n'est effective que dans la couche superficielle où la pression des terrains susjacents est trop faible pour s'opposer à la transformation.

Il serait donc intéressant en laboratoire de recréer ce phénomène, d'étudier une possibilité de dissolution <sup>de l'anhydrite</sup> ~~du gypse~~ par des eaux chargées de Sulfates, de mesurer l'incidence des évaporites sur la teneur en eau de la marne, enfin d'apprécier leur influence sur le comportement mécanique.

### B - ETUDE DE L'ALTERATION

#### B-1 - ~~Points-acquis~~

L'altération est mise en évidence lors du prélèvement et des sondages sismiques. En faisant abstraction de la présence des évaporites elle a effet sur la fraction argileuse de la marne Keuper et se caractérise par :

- des courbes granulométriques présentant un fort pourcentage de fines.
- un diagramme de plasticité indiquant des argiles et silts très plastiques.

X Les remarques suivantes propres au sondage A6 semblent être confirmées par le dernier article de CHANDLER (121).

Elle influence surtout la contrainte de cisaillement (réduction de  $\sigma'$  et  $C'I$ ) et la courbe effort-déformation présente des contraintes faibles pour une allure stable.

La faible surconsolidation déterminée par l'essai oedométrique suggère qu'une grande partie de la consolidation présumée a disparu lors de l'altération.

## 0-2 - Projet-d'étude

### a) Essais de classification des Marnes du Keuperrnférieur

Le phénomène d'agrégation ne peut être mis en évidence par les essais standards.

On classifiera les sols d'après leur pourcentage de particules argileuses (déterminé par analyse minéralogique, sédimentation, rayons X et leurs limites de plasticité : on précisera ainsi l'agent de cimentation et son influence

### b) Zones d'altération

On définira dans la même couche différentes zones correspondant à un certain degré d'altération (nul, faible, moyen, fort) et on procédera sur chacune d'elles aux essais mécaniques appropriés.

-----

## CONCLUSION GENERALE

L'interprétation des propriétés mécaniques des marnes du Keuper Inférieur ne peut se concevoir qu'étayée d'une étude minutieuse de la structure et de la minéralogie.

Les phénomènes d'altération et de surconsolidation nécessitent des techniques d'essais particulières dont le mode opératoire a été esquissé dans ce rapport.

Le maître d'oeuvre se souciera donc de "connaître" avant tout son matériau afin d'en apprécier ses propriétés géotechniques.