

~~TH-IA 19~~  
LC2

# THESE

présentée à

L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE  
PARIS VI

pour obtenir le grade de  
Docteur en Pédologie et Aménagement  
des Sols (3e cycle)  
par

Lahcen DEMDAMI

## Essai de caractérisation géotechnique des formations superficielles et des sols du Sundgau

Application aux problèmes de  
l'aménagement régional

INRA  
STATION DE SCIENCE DU SOL  
- 5. JUIL. 1991  
Domaine St-Paul - B.P. 91  
1140 MONTFAVET

Soutenue le ..... devant la Commission d'examen composée de :

MM. J. BOULAINÉ  
A. COMBEAU  
A. FAURE  
M. JAMAGNE  
P. ROGNON

- A V A N T - P R O P O S -

=====

Cette étude constitue le résultat de deux ans de travail. Ce but n'aurait pas été atteint sans tous ceux qui m'ont fait bénéficier de leur expérience de chercheur et d'enseignant, et n'ont cessé de me soutenir par leurs encouragements.

Que Monsieur le Professeur ROGNON soit remercié de l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de ma thèse. Ses encouragements et ses conseils m'ont été des plus utiles pour l'orientation de ce travail.

C'est à Monsieur le Professeur BOULAINÉ que je dois principalement ma formation de pédologue et une initiation à la recherche. Je le remercie vivement de son aide particulièrement efficace pour un bon départ.

En acceptant de faire partie du jury, Monsieur le Professeur COMBEAU nous fait bénéficier de sa longue expérience de pédologue, et je l'en remercie sincèrement.

C'est sous la direction amicale de Monsieur JAMAGNE, Directeur du Service d'Etudes et de Cartographie des Sols de France, que cette recherche a été réalisée. Son goût du travail bien fait, et ses observations pertinentes m'ont été d'un grand secours. Je voudrais, en toute simplicité, lui témoigner ma profonde reconnaissance.

Monsieur BEGON m'a prodigué, par ailleurs, assistance, conseils précieux et critiques constructives. Je le remercie pour son enseignement.

Je remercie Monsieur MONNIER et toute son équipe de l'excellent accueil qu'ils m'ont toujours réservé en Avignon.

Monsieur FAURE, en particulier, a bien voulu mettre ses moyens et sa compétence à ma disposition pour réaliser ce travail. Il m'a consacré de longues heures de son temps et a suivi de très près le développement de cette étude. Il m'est agréable de le remercier et de lui exprimer ma profonde gratitude.

J'exprime ma reconnaissance à toute l'équipe de pédologues du SESCOF et du Laboratoire des Sols de l'I.N.R.A. pour leur accueil amical et leur soutien. Monsieur MORI et Monsieur ROQUE, en particulier, m'ont beaucoup apporté au cours de nombreux échanges que nous avons eu, notamment sur le terrain.

Je remercie enfin Mesdames LEVOIR, DELRIEUX et NOUGAREDE ; Mesdemoiselles FOUCHE et LALLIER, Monsieur CIROTTEAU pour l'aide qu'ils m'ont apportée dans la réalisation technique de cette thèse.

A Marie-Christine pour son aide et sa patience,

# S O M M A I R E

---

## INTRODUCTION

## PREMIERE PARTIE : LES SOLS DANS LE PAYSAGE

CHAPITRE I	: Présentation du domaine d'études .....	4
CHAPITRE II	: Evolution pédologique .....	15

## DEUXIEME PARTIE : L'ETUDE GEOTECHNIQUE

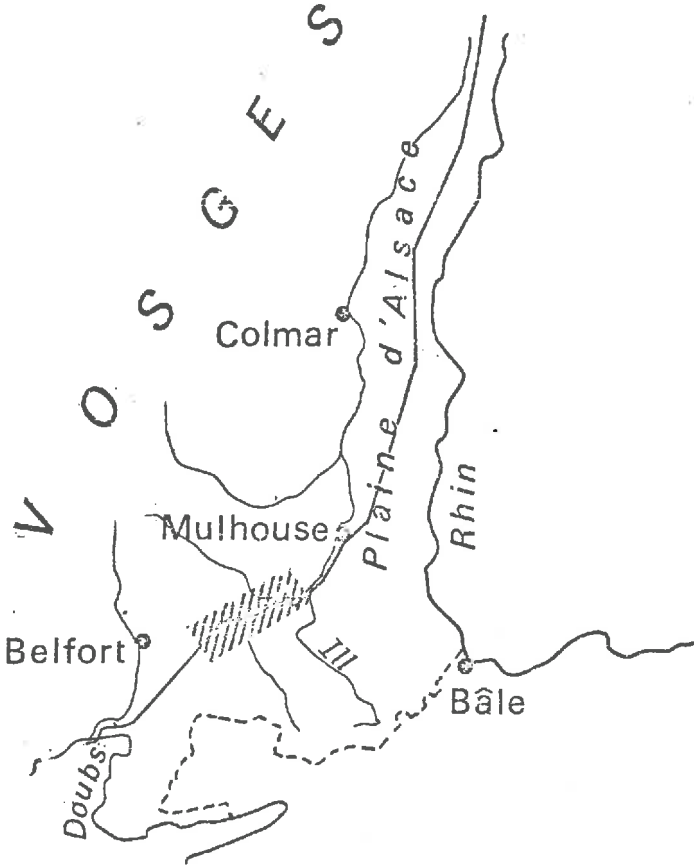
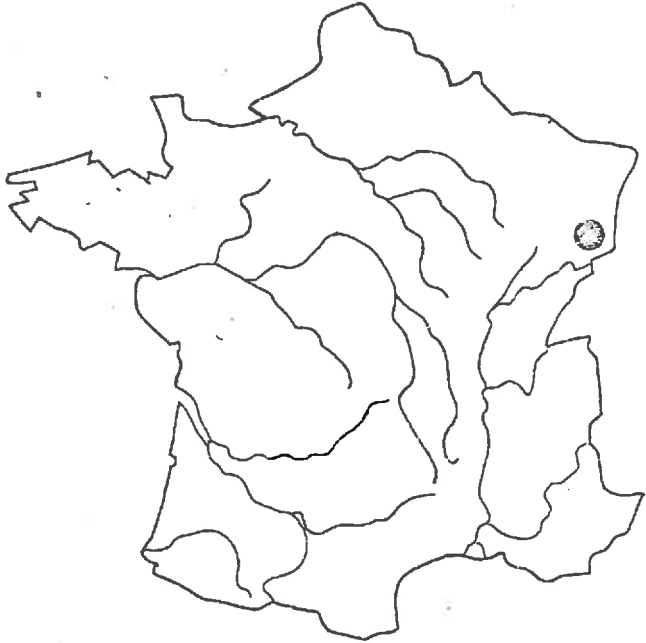
CHAPITRE III	: Techniques utilisées aux laboratoires .....	41
CHAPITRE IV	: Caractéristiques géotechniques des formations superficielles du Sundgau .....	59
CHAPITRE V	: Etude particulière : Le compactage .....	87

## TROISIEME PARTIE : DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES

CHAPITRE VI	: Documents cartographiques .....	127
-------------	-----------------------------------	-----

CONCLUSION GÉNÉRALE .....	157
---------------------------	-----

Situation générale



## INTRODUCTION

Dans toute action d'aménagement de l'espace, il faut tenir compte des aptitudes actuelles et potentielles des terrains à supporter les fonctions que l'homme leur affecte, à la fois dans une optique d'utilisation optimale et de protection du milieu. Un aspect particulièrement important est celui de la constructibilité et de la viabilité des terrains, dont l'étude relève du domaine de la géotechnique.

Très généralement, le géotechnicien fait abstraction des couches superficielles, son optique étant essentiellement celle d'aménagements lourds. Il s'intéresse essentiellement au lieu même d'implantation de l'ouvrage projeté et s'exprime le plus souvent en termes de risques.

Sa démarche comporte un double aspect, qualitatif et quantitatif :

- Qualitatif : Dans la description des matériaux géologiques, il note la présence d'éventuelles failles, l'alternance de couches de nature différentes, la topographie du site... toutes hétérogénéités ou conditions limites susceptibles d'entraîner des mouvements ou des affaissements de terrain.

- Quantitatif : Des mesures de laboratoire, réalisées sur des carottes prélevées à l'endroit d'implantation de l'ouvrage, permettent de chiffrer la tolérance des matériaux à différents types de contraintes.

Dans une optique prévisionnelle, les cartes géologiques et topographiques autorisent une vision spatiale des phénomènes. La carte géologique, en particulier, constitue la base d'extrapolation des résultats obtenus par mesure, en même temps qu'elle permet au technicien d'établir des modèles de prévision. Il sait, en effet, qu'intervenir sur des composantes du sol peut provoquer des modifications de ses propriétés géotechniques : il s'attend, par exemple, à un tassement du sol contraint par suite d'un abaissement de la nappe phréatique. Il peut ainsi établir, éventuellement, des cartes de risques géotechniques.

En fait, le développement récent des schémas d'aménagement conduit à couvrir un champ beaucoup plus large. Le sol est ici l'objet de plusieurs affectations possibles, et l'on parlera autant d'aptitudes que de risques. La démarche suivie ici est nécessairement plus complexe. Pratiquement, nous prenons en compte les trois aspects suivants qui intéressent différentes "couches" du manteau géologique :

- Le domaine agricole : nous envisageons non seulement les risques (géotechniques) de tassement par des engins lourds de chantier, mais aussi les risques de tassement par des interventions culturales (avec leurs conséquences sur le développement des plantes et les actions érosives).
- Les constructions légères, ou autres ouvrages, n'exerçant sur le sol que des pressions "moyennes".
- Les constructions lourdes, principalement le bâti à fondations profondes.

Dès lors, on devait se poser la question d'une contribution possible des études de sols à l'approche géotechnique. L'approche géotechnique traditionnelle peut-elle être transposée dans un domaine où les contraintes mécaniques sont plus faibles, où les "mailles" qui servent à décrire le matériau (les organisations pédologiques) sont notoirement plus petites, où le régime hydrique est souvent plus complexe que celui d'une simple nappe phréatique ? Quelle est la validité et la signification de détermination de laboratoire traditionnelles quand on les applique aux couches les plus superficielles du sol ? Quelle peut être, enfin, l'utilité d'une carte de sols ? Une limite de sol peut-elle avoir une signification géotechnique ?

Nous avons été ainsi conduits à "tester" une approche géotechnique dans un secteur géographique ayant fait l'objet de levés pédologiques, secteur choisi pour la diversité des natures et des modes de mise en place des matériaux superficiels : la région du Sundgau, en Basse-Alsace.

Au niveau de l'inventaire des sols, nous nous sommes appuyés sur les recherches de spécialistes qui montrent que le comportement du matériau sol est largement conditionné par son histoire (mécanique et hydrique).

Il a donc été fait une typologie des sols du Sundgau en les regroupant : suivant une histoire commune au niveau sédimentogénèse et altérogenèse, suivant une histoire proprement pédologique, suivant la succession des différentes couches de sols (horizons pédologiques vrais ou non assimilés, en première approximation, à des matériaux différents.

Dans une seconde étape, ces "matériaux" ont été caractérisés au plan géotechnique pour en déterminer les caractéristiques mécaniques. Les paramètres déterminés sont à la base des calculs de tassement et de capacité portante des sols (charge limite). L'une des techniques utilisées, le procédé Proctor, a été particulièrement étudiée pour en connaître les limites de signification, et juger de la variabilité des mesures au sein d'unités pédologiques. Nous avons travaillé à trois "niveaux" :

- Au niveau des matériaux originels : les résultats sont comparés à ceux obtenus, dans des conditions énergétiques identiques sur des échantillons de référence : échantillons-modèles ou sols naturels.
- Au niveau des horizons pédologiques profonds (le "sous-sol") deux populations d'horizons argileux ont été soumises au procédé Proctor.
- Au niveau des couches superficielles (la terre végétale), une vingtaine d'échantillons limoneux appartenant à des unités pédologiques différentes ont été étudiés.

Enfin, dans une dernière étape, nous avons tenté de représenter cartographiquement les divers thèmes explorés, et d'en proposer une synthèse qui soit plus directement exploitable par des aménageurs.

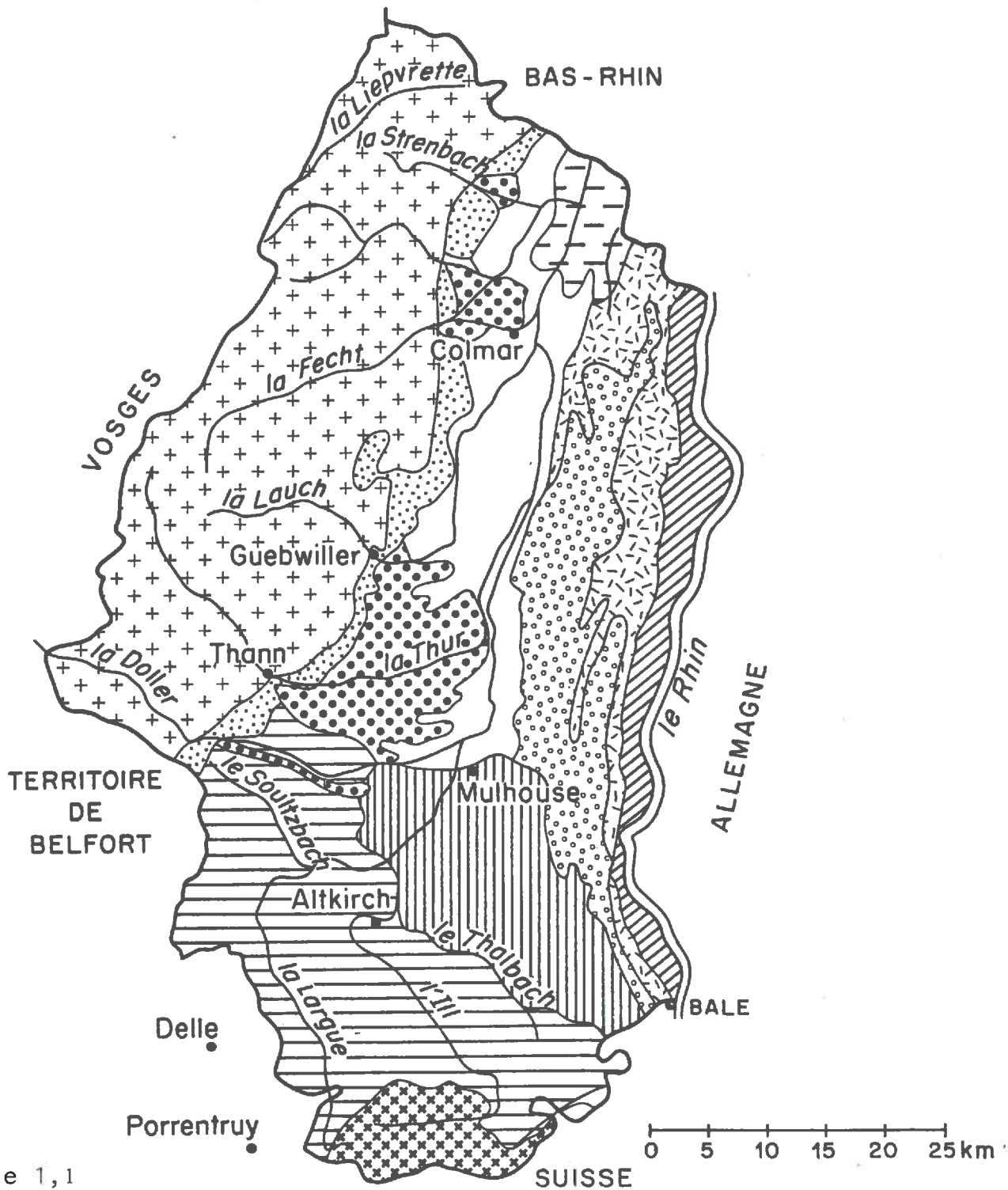


- P R E M I È R E P A R T I E -  
=====

LES SOLS DANS LE PAYSAGE

CHAPITRE I : Présentation du domaine d'étude.

CHAPITRE II : Evolution pédologique et caractéristiques  
des sols du Sundgau.



Carte 1,1

**Legende**

- |                                                                                    |                             |                                                                                     |                           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|  | Bas Sundgau                 |  | Plaine limoneuse de l'Ill |
|  | Haut et Moyen Sundgau       |  | Hart Rouge                |
|  | Montagnes Jurassiennes      |  | Hart grise                |
|  | Montagnes Vosgiennes        |  | Rieds                     |
|  | Collines sous-vosgiennes    |  | Basse plaine du Rhin      |
|  | Basses terrasses vosgiennes |                                                                                     |                           |

## I - PRESENTATION DU DOMAINE D'ETUDES

### 1. - LE CADRE GEOGRAPHIQUE

Le Sundgau, ou "territoire du Sud" de l'Alsace est constitué par trois petites régions naturelles (carte 1) :

- les montagnes jurassiennes au sud,
- le haut et moyen Sundgau à l'ouest et au nord-ouest,
- le bas Sundgau au nord-est.

Le Sundgau est délimité au sud par le Jura, à l'ouest et au nord-ouest respectivement par le territoire de Belfort et les Vosges, au nord et à l'est par la ligne joignant les villes de Thann, Mulhouse, Bâle.

Les feuilles topographiques au 1/25 000<sup>e</sup> de l'I.G.N. qui lui correspondent sont celles de Dell, Ferrette, Belfort, Altkirch-Huningue, Thann et Mulhouse-Mulheim.

D'un point de vue topographique, le Sundgau se présente globalement comme un plateau disséqué par le réseau hydrographique. Le Sud et Sud-Ouest du Sundgau est davantage marqué par un relief vallonné.

L'altitude, voisine de 250 m aux alentours de Mulhouse, s'élève progressivement à la fois à l'Ouest, vers les Vosges, et, au sud vers les montagnes jurassiennes pour y atteindre une altitude de 527 m.

Le périmètre, dont nous proposons l'étude, recoupe le haut et le moyen ainsi que le bas Sundgau. Il longe le canal Rhin-Rhône, de Valdieu à près de Illfurth. La surface de ce périmètre s'élève à environ 6300 ha de terres cultivées.

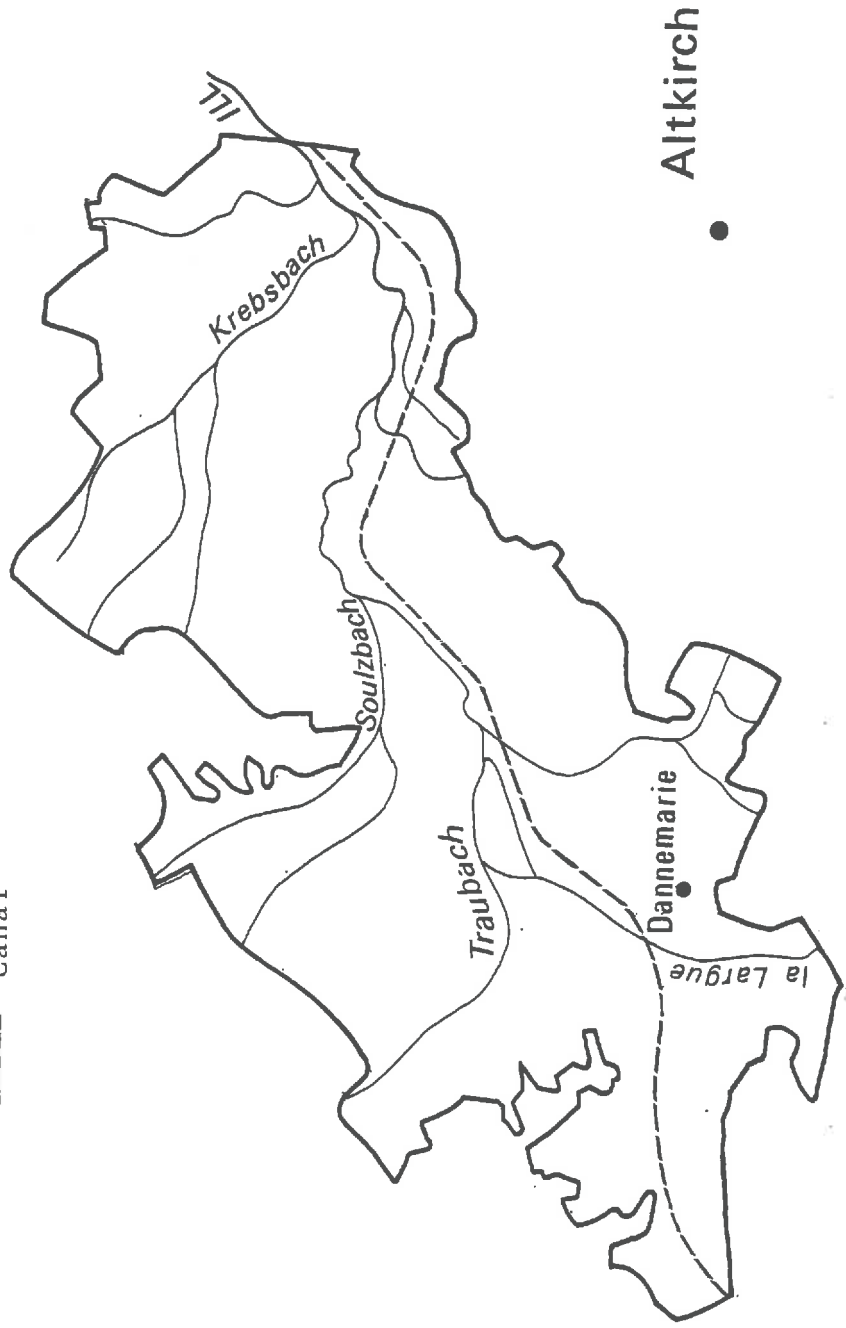
Les principaux cours d'eau qui coulent dans le périmètre d'étude sont l'Ill et la Largue. Celle-ci est grossie par des cours d'eau secondaires tels le Traubach, le Soultzbach et le Spechbach. Plus à l'est, l'Ill est grossi principalement par le Thalbach.

# Mulhouse



Carte I, 2

----- Canal



## 2. - LE CLIMAT

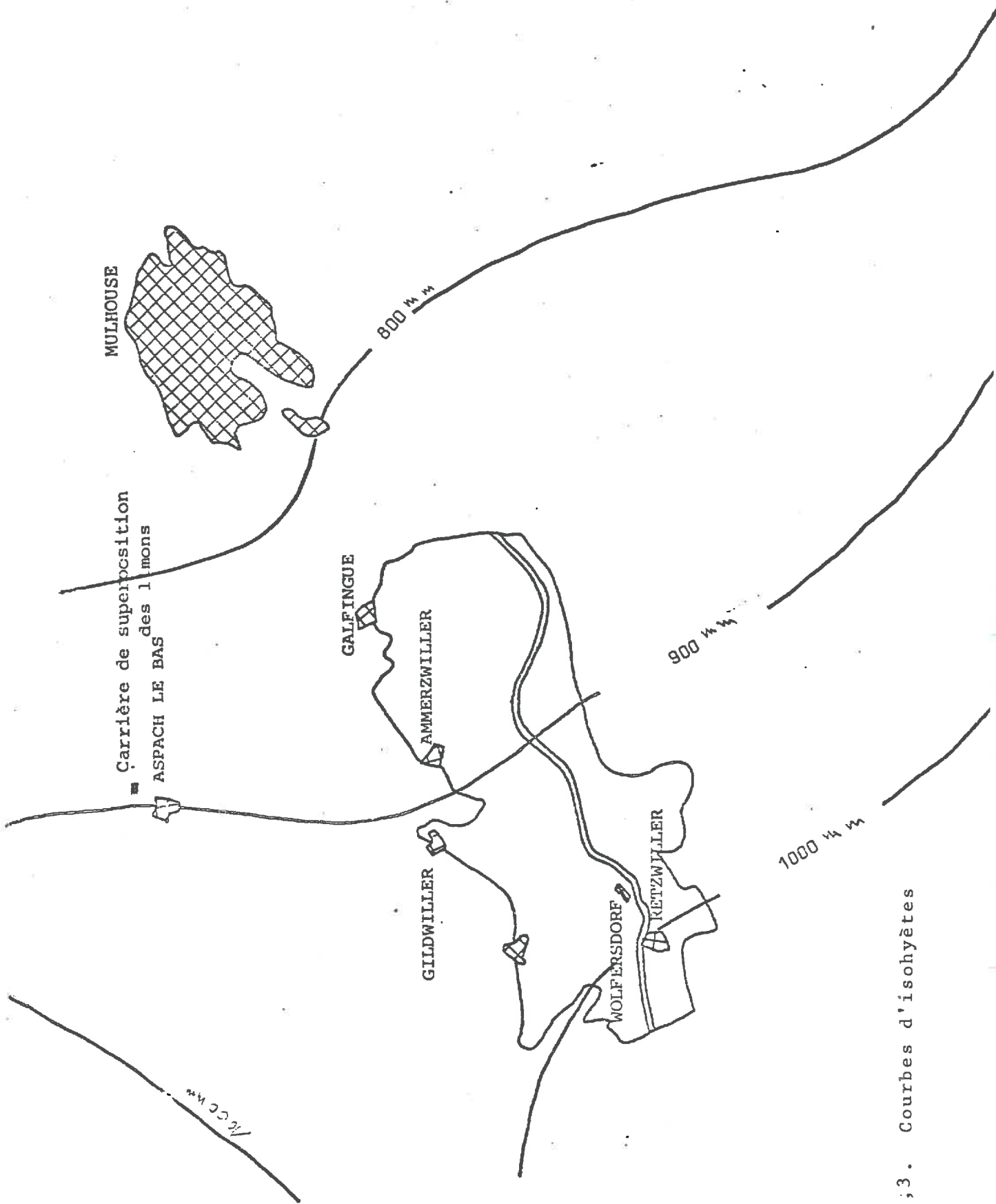
Afin de préciser les caractéristiques du climat du Sundgau, nous donnerons les moyennes obtenues à Mulhouse, limite nord-est, Belfort, situé à l'ouest, et Wolfersdorf, à l'intérieur même du périmètre d'étude.

Les valeurs moyennes ont été obtenues durant 30 ans pour Mulhouse et Belfort. Celles de Wolfersdorf concerne une période de 41 ans.

Mois	MULHOUSE			BELFORT			WOLFERSDORF
	P (mm)	θ°C	ET P TURC (mm)	P (mm)	θ°C	ET P TURC (mm)	
Janvier	55	0,40	1,37	102	0,10	0,36	73,6
Février	40	1,70	7,28	82	1,20	5,38	63
Mars	45	5,90	34,64	78	5,90	35,83	70,6
Avril	50	9,50	59,50	69	0,20	59,71	72,2
Mai	65	13,50	92,78	77	13,20	92,12	76
Juin	80	17	106,57	100	16,50	109,7	81,6
Juillet	70	18,90	116,28	90	18,40	117,88	83,6
Août	75	18,50	98,93	93	18	103,07	84,9
Septembre	70	15,60	70,64	97	15,10	70,93	86,3
Octobre	50	10,20	40,36	78	9,90	39,35	83
Novembre	55	5,30	14,72	95	4,80	14,22	83
Décembre	45	1,40	3,97	80	1,20	3,63	78,5
Total (mm)	700			1041			936,3

### 2.1. - Précipitations

L'examen du tableau montre que le périmètre reçoit une précipitation moyenne annuelle de 700 mm au nord-est et 1041 mm au sud-ouest. A Wolfersdorf, les précipitations tombant de Mai à Octobre représentent 83 % du total annuel. La différence entre la hauteur de pluie maximale et la minimale n'y est que de 24 mm.



Carte 1;3. Courbes d'isohyètes

La hauteur d'eau pluviale moyenne est, certes, un facteur des plus importants caractérisant le milieu physique. Toutefois, il nous semble intéressant de préciser l'intensité et la fréquence des averses. De même, une pluie d'intensité donnée n'aura pas le même effet selon le type de pente, la nature des sols (minéralogie, discontinuité lithologique, état des couches de surface) et l'occupation des sols.

## 2.2. - Températures

Les températures moyennes sont légèrement plus basses à Belfort (9,4°C) qu'à Mulhouse (9,8°C). Le mois le plus froid est Janvier, avec des températures de 0,4°C à Mulhouse et 0,1°C à Belfort. Le mois le plus chaud est Juillet dont les températures moyennes sont 18,9°C à Mulhouse et 18,4°C à Belfort.

## 2.3. - Vents

Nolin (1963) rapporte que, dans 73 cas sur 360 observations, la force du vent dépasse 3 dans l'échelle de Beaufort. Pour les 73 cas, la répartition est la suivante :

N.E.	S.	S.W.	W.	N.W.
5,5 %	5,5 %	61,6 %	26,0 %	1,4 %

D'une manière générale, la direction du vent est S.W. dans le sud du Sundgau. Plus au nord, vers Mulhouse, l'auteur note que les vents du N. et N.E. ont une fréquence plus grande et plus particulièrement en été. La durée d'ensoleillement moyenne annuelle (1951-1970) est de 1592 heures à Mulhouse-Bâle avec un minimum en Février 50 h et un maximum en Juillet 240 heures.

En conclusion, nous retiendrons trois principaux traits, susceptibles d'être pris en compte pour les aménagements de l'espace rural :

- L'existence dans le Sundgau d'un gradient pluviométrique N.E. - S.W. (carte 1,3).

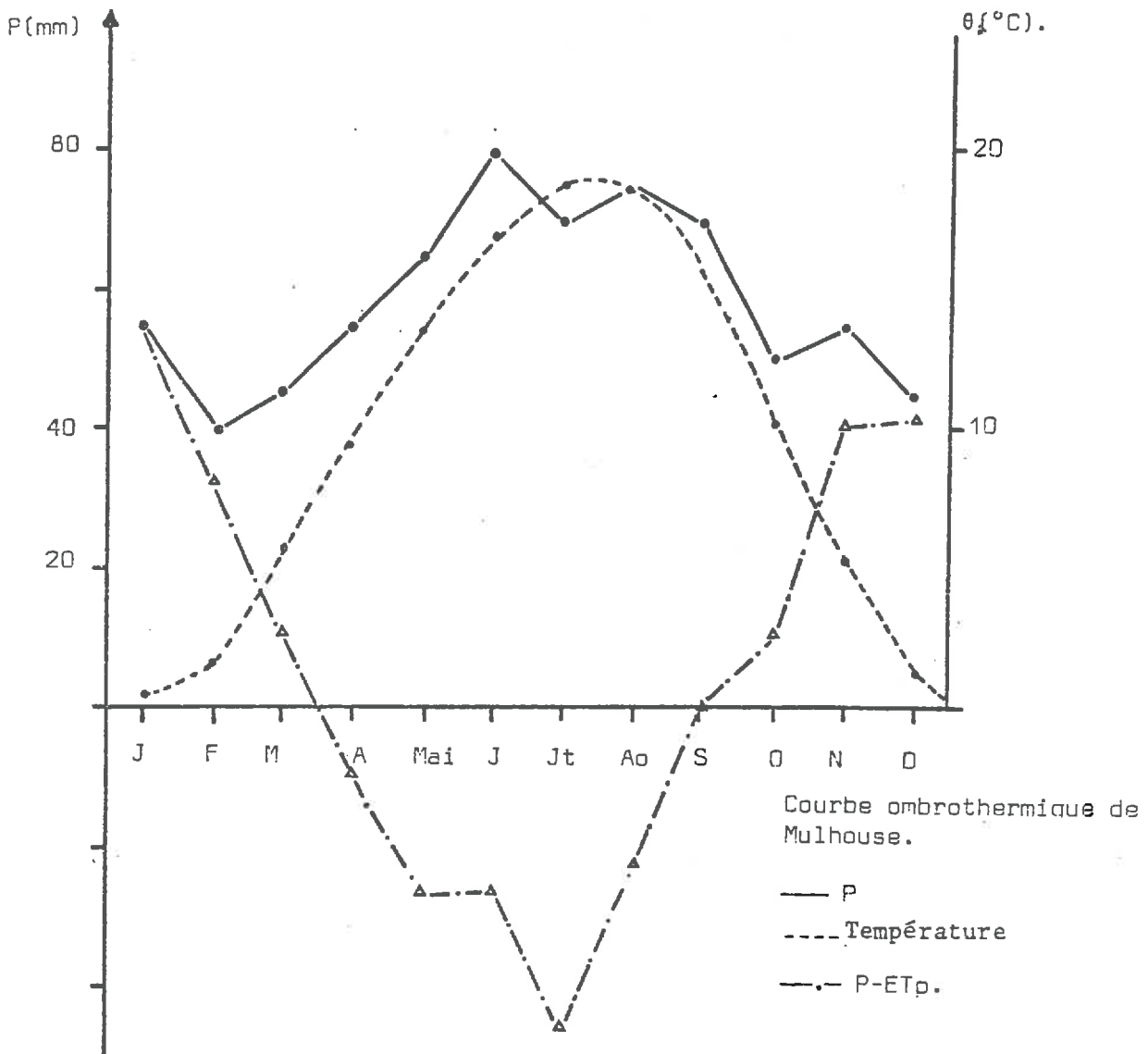


Fig. 1,1



- Le climat du Sundgau est mi-océanique mi-continentale, océanique par la répartition assez régulière des pluies pendant toute l'année (Wolforsdorf), et continentale par un maximum pendant l'été (fig. 1,1).
- La direction du vent est S.W. et N.E.

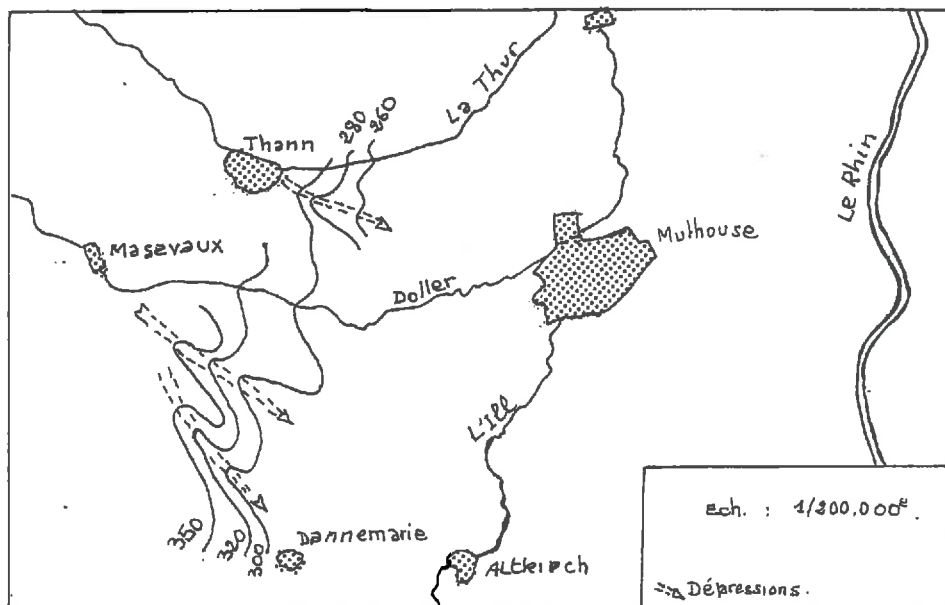
### 3. - LES MATERIAUX PARENTAUX

Avant d'étudier quelques sols du Sundgau, il nous semble indispensable de préciser la nature des matériaux à partir desquels ces sols se sont développés.

#### 3.1. - Formations tertiaires

Les marnes de l'Oligocène constituent le substrat du Sundgau. Bien que n'affleurant qu'en position de pente forte, cette formation est omniprésente à plus ou moins grande profondeur et joue un rôle primordial sur le fonctionnement des sols et le comportement géotechnique des assises d'ouvrages.

Des études menées par SIMLER et MILLOT (1972) montrent que ces marnes de l'Oligocène ont subi une érosion fluviale ancienne, matérialisée par des dépressions entaillées par la Thur et la Doller :



Elles se caractérisent par des bancs calcaires ou sablo-gréseux intercalés, dont la fréquence et l'épaisseur permettent de distinguer un certain nombre de faciès. Elles présentent, en outre, une couleur caractéristique : bleu-clair à gris foncé (5Y5/1-2 de la Charte Munsell).

### 3.2. - Formations quaternaires

Ces formations sont constituées par des limons. Ces matériaux ne reposent pas toujours sur les argiles marneuses. Un dépôt villafranchien, dont l'épaisseur peut atteindre 25 m, s'intercale irrégulièrement entre les deux formations et constitue un terme de transition entre le Tertiaire et le Quaternaire. Ce dépôt, formé de cailloutis dits du Sundgau, ou Deckenschotter, aurait deux origines géographiques différentes :

- une partie proviendrait des Alpes, apportée par le Rhin,
- une autre aurait été arrachée puis déposée par les torrents venant des Vosges.

Dans les deux cas, il s'agit de galets arrondis de dimensions variables pouvant atteindre 10 cm de diamètre. Ils sont emballés dans un matériau limoneux de couleur jaune à brunâtre. Bien qu'ils aient gardé leur forme initiale, ces galets sont géochimiquement très altérés et mécaniquement très fragiles.

Ces alluvions fluviatiles sont recouvertes de limons considérés comme éoliens, déposés durant les périodes froides du Quaternaire (Reymond, 1974). Les divers limons que nous avons distingués sur la base des caractéristiques visibles (couleur, structure...), palpables (consistance, texture...) et analytiques, sont les lehms, les loess et les produits de vallées. Pour la clarté de l'exposé, nous avons été conduits à préciser cette terminologie en fonction des critères suivants :

- Nous réservons le terme de limons aux matériaux caractérisés par une distribution granulométrique où domine la fraction 2 à 50  $\mu\text{m}$  (> 45 %), sans que la teneur en argile excède 30 %.

- Si ces matériaux renferment encore des carbonates de calcium, nous les appèlerons : Loess.
  
- Si, au contraire, ils sont décarbonatés, nous les appèlerons : Lehms. Ceux-ci peuvent être classés en deux types : les lehms sus-jacents aux loess dont ils dérivent (dans ce cas, nous parlerons de lehms récents). Ceux dont la formation limoneuse est entièrement dépourvue de carbonates de calcium sur toute son épaisseur (dans ce cas, nous parlerons de lehms anciens).

a) Les lehms

Il n'est question ici que des Lehms anciens. Caractérisés par une décarbonatation totale de l'ensemble du matériau, ils recouvrent généralement les cailloutis du Sundgau sur des épaisseurs pouvant atteindre les 15 m. Ils affleurent au sud et à l'ouest du périmètre d'étude. Ces lehms sont généralement associés à un paysage moyennement vallonné et humide.

Très fréquemment, nous observons à la base de cette formation un dépôt épais de fer qui témoignerait d'une redistribution de cet élément dans les lehms anciens.

b) Les loess

Nous distinguons deux types de loess :

- Le loess récent, matériau qui constitue une couverture limoneuse très importante au nord-est du périmètre d'étude. Son épaisseur peut atteindre les 10 m. Il renferme environ 25 % de  $\text{CaCO}_3$ . Il est généralement associé à un paysage plat à faiblement ondulé.
  
- Le vieux loess, matériau encore carbonaté, est localisé dans la partie centrale du périmètre. Son extension géographique est discontinue : on la retrouve ici et là sous forme de taches, généralement sur pente orientée au Nord. Son épaisseur, d'après nos observations, n'excède pas 2 m.

Nous retiendrons quatre hypothèses quant à l'origine des vieux loess :

- Le loess serait, en fait, le même que le loess récent. La décarbonatation partielle et l'argilification de ce matériau seraient une conséquence du gradient pluviométrique existant entre le Nord-Est, zone des loess récents et le centre du périmètre, domaine des vieux loess.
- Ces loess pourraient avoir des origines différentes, les loess dits anciens étant plus riches en argile et moins pourvus en carbonates.
- Les vieux loess seraient effectivement plus anciens.
- Ils résulteraient d'un mélange de lehms anciens et de loess récents par des phénomènes de solifluxion par exemple.

c) Dépôts de vallées

Il s'agit d'alluvions-colluvions pouvant atteindre une épaisseur de 6 m, dépôts recouvrant les galets du Sundgau et les marnes plus ou moins sablo-gréseuses.

En conclusion, le substrat oligocène, généralement coiffé par les cailloutis du Sundgau, est recouvert par un manteau limoneux épais loessique au nord-est et au centre du périmètre, lehmique à l'ouest et au sud de celui-ci. Nous allons voir précisément les principaux sols qui se sont développés à partir de ces matériaux.

## II - EVOLUTION PEDOLOGIQUE ET CARACTERISTIQUES

---

### DES SOLS DU SUNDGAU

---

#### INTRODUCTION

Les matériaux originels subissent dans leur partie supérieure une évolution pédologique dont l'importance est à la fois fonction du temps, de la nature de la roche-mère, des conditions climatiques, de la topographie ainsi que de l'action des êtres vivants. Dans le contexte naturel du périmètre d'étude, l'ensemble des facteurs pédogénétiques agit activement sur les matériaux en place. Toutefois, l'action du climat et de la topographie paraît prédominante.

La méthode cartographique adoptée est celle exposée par M. JAMAGNE (1967) dans "Bases et techniques d'une cartographie des sols". La description morphologique des profils du Sundgau a été effectuée en se référant à l'ouvrage cité et à la CPCS (1967).

De cette façon ont été réalisées une carte pédologique (réalisée au sein du SESCOFF, par ROQUE J., à paraître) à l'échelle du 1/25000<sup>e</sup> et des cartes sectorielles au 1/5000<sup>e</sup>.

Bien que l'objectif de ce chapitre soit l'étude des sols développés sur les formations limoneuses, il convient de préciser brièvement la nature des sols développés sur les autres formations :

#### - Les marnes

Les sols développés sur les marnes sont du type de sols bruns calcaires ou encore bruns calciques. La surface recouverte par de tels sols est limitée aux pentes fortes, généralement > 5 %.

- Les dépôts de vallées

Les sols des formations alluvio-colluviales, qu'il s'agisse des vallons ou des fonds de vallées, sont du type sols peu évolués d'apport, plus ou moins hydromorphes.

- Les limons

Le développement pédologique des sols évoluant sur les matériaux limoneux situés en dehors des zones d'influence des cours d'eau, est fonction du type du limon et des facteurs agissants sur les matériaux en place. Les sols dérivés de ces matériaux constituent le groupe le plus important du périmètre d'étude.

Nous proposons de présenter, dans ce qui suit, deux séquences de sols développés sur les limons, l'une sur loess récent, l'autre sur lehms anciens. Pour chacune d'elles, nous proposons un schéma d'évolution des sols, une description des profils correspondant aux stades caractéristiques de cette évolution.

L'évolution pédologique des limons

De nombreux chercheurs ont étudié l'évolution pédologique des matériaux limoneux. Aussi, a-t-on présenté des séquences théoriques et mis en évidence les processus de l'évolution pédologique sur formations loessiques (JAMAGNE 1973). Ainsi, partant du loess calcaire les processus de la pédogenèse l'amèneront successivement à des stades de plus en plus évolués : sol brun calcaire, calcique, sol brun lessivé, sol lessivé, sol lessivé dégradé à tendance planosolique. Les mécanismes mis en jeu lors de cette évolution séquentielle sont : la décarbonatation, la désaturation, le lessivage en milieu mésotrophe et oligotrophe, une certaine altération ou transformation des constituants minéraux ; l'hydromorphie, ainsi qu'une illuviation dite secondaire, liée aux deux derniers mécanismes.

## 1. - LES SOLS DEVELOPPES SUR LES LOESS RECENTS

La lehmification des loess, caractérisée par une transformation physico-chimique (décarbonatation - argilification) et par le processus mécanique d'éluviation/illuviation, aboutit à la différenciation des horizons et l'individualisation des sols. L'intensité de ces mécanismes détermine le degré d'évolution des sols.

Divers types de sols ont été observés sur loess récent du Sundgau: sol peu évolué ; sol brun ; sol brun lessivé ; sol lessivé. Le schéma II.1. situe quelques uns de ces sols dans la position topographique où ils ont été observés le plus souvent.

### 1.1. - Sols peu évolués (schéma II.1.)

Le loess calcaire apparaît dès la surface. Le développement du profil est du type A/C.

#### Profil 43<sup>(°)</sup>

Date 3 Octobre 1979 - lieu est de SPEGHBACH le haut

Carte Altkirch 1-2 ; coordonnées : x = 368,3 ; y = 5282,4

Altitude 280 m

Position géomorphologique : sommet d'un dôme ; pente convexe modérée

Classification : sol peu évolué d'érosion.

Ce type de sol qui constitue très probablement le point de départ de la pédogénèse sur loess récent a été observé en position géomorphologique exposée à l'action de l'érosion qui tend constamment à le rajeunir.

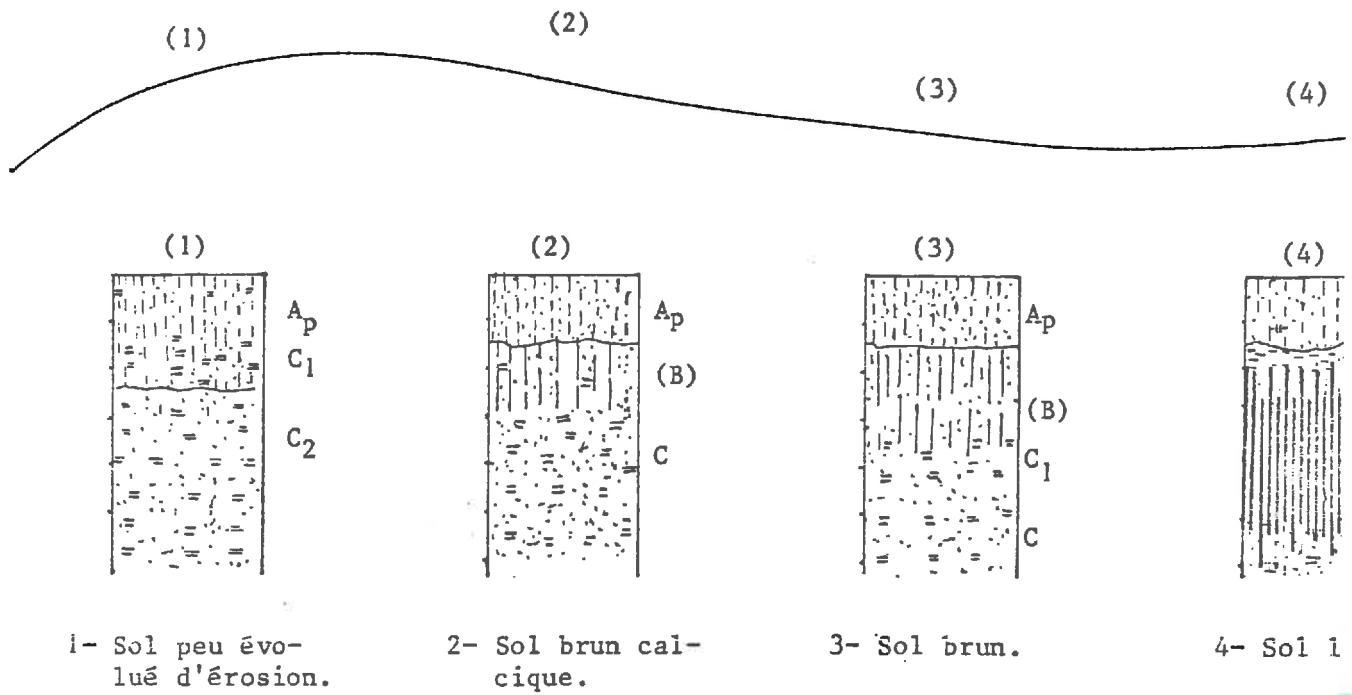
#### Description morphologique

A<sub>p</sub> 0-30 cm : couleur gris-brun, texture: limon moyen\* ; moyennement calcaire. Structure continue à éclats anguleux. Peu compact ; doux au toucher, très friable. Moyennement organique.


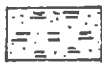
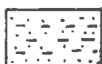

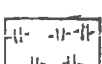

(°) Les analyses concernant les profils décrits sont présentées en annexe II.

\* voir Fig. II.1.

Schéma II.1.



Séquence topographique sur loess récents.

-  Infiltration organique.
-  Limon calcaire.
-  Appauvrissement en argile et en fer.
-  Accumulation d'argile.
-  Taches et concrétions d'hydromorphie.
-  Développement de la structure.



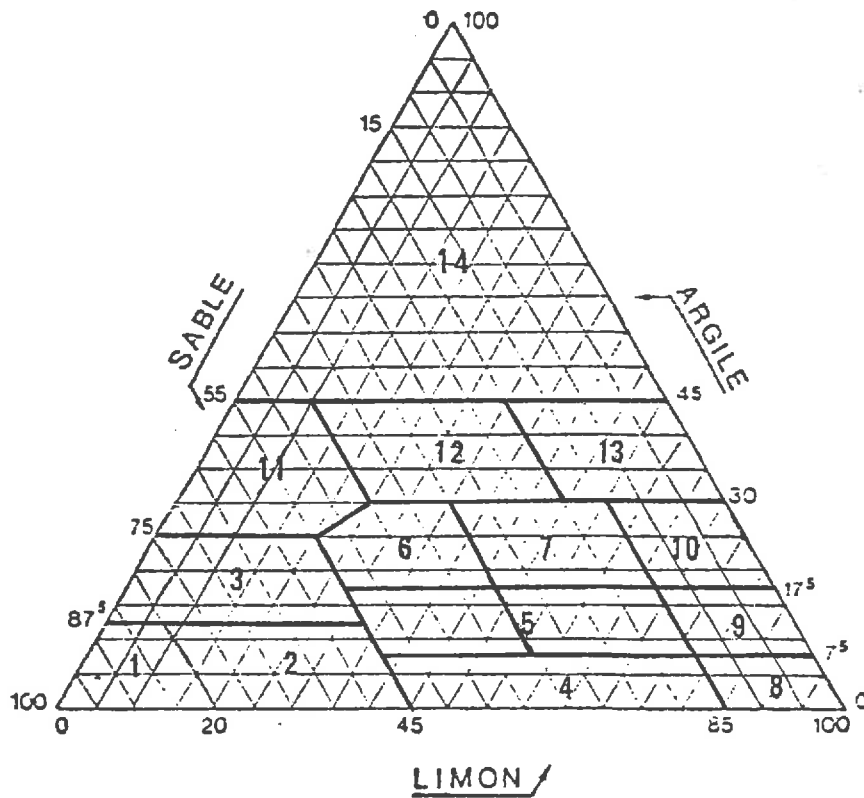


Fig. II.1.

1 - S	8 - LL
2 - SL	9 - LM
3 - SA	10 - LA
4 - LLS	11 - AS
5 - LMS	12 - A
6 - LSA	13 - AL
7 - LAS	14 - ALO

*Diagramme de classification détaillé des textures*

S : Sable	LL : Limon léger
SL : Sable limoneux	LM : Limon moyen
SA : Sable argileux	LA : Limon argileux
LLS : Limon léger sableux	AS : Argile sableuse
LMS : Limon moyen sableux	A : Argile
LSA : Limon sableux argileux	AL : Argile limoneuse
LAS : Limon argileux sableux	ALO : Argile lourde

C<sub>1</sub> 30-55 cm : couleur brun jaunâtre à gris jaunâtre ; texture : limon moyen ; fortement calcaire ; structure continue à éclats anguleux ; peu compact ; doux au toucher ; très friable ; très faiblement organique ; activité biologique moyenne.

C<sub>2</sub> 55-120 cm : couleur jaunâtre : texture : limon moyen très calcaire ; structure continue à éclats anguleux ; moyennement compact, mais reste très poreux ; friable ; très faiblement organique ; activité biologique moyenne à faible.

### 1.2. - Sols bruns calcaires

Ce type de sol est caractérisé par un début d'argilification des matériaux loessiques, une décarbonatation discrète et partielle de l'horizon superficiel et par une amorce du processus de lessivage de l'argile.

Un profil représentatif de ce type de sol (P. 14) a été observé puis analysé :

#### Profil 14

Carte Altkirch 1-2 ; échelle 1/25 000 ; x = 368,5 ; y = 5283,4

Altitude 285 m

Position géomorphologique : sur pente faible et rectiligne d'un petit plateau étroit. Ecoulement superficiel très lent. Drainage interne favorable.

Géologie : Quaternaire

Matériau : loess récent

Classification : sol brun calcaire.

#### Description morphologique

A<sub>p</sub> 0-30 cm : couleur gris-clair ; texture: limon argileux ; faiblement calcaire ; structure grumeleuse à polyédrique ; peu compact ; très friable ; bonne activité biologique ; moyennement organique.

(B) 30-55 cm : couleur brun rougeâtre ; texture : limon argileux ; moyennement calcaire ; structure polyédrique ; peu compact ; friable ; bonne activité biologique ; moyennement organique.

C 55-120 cm : couleur gris jaunâtre ; texture : limon moyen ; fortement calcaire ; structure continue à éclats anguleux ; doux au toucher ; compact ; fragile à dur ; frais à sec ; moyenne à faible activité biologique ; faiblement à très faiblement organique.

### 1.3. - Sols bruns calciques

A ce stade d'évolution, la décarbonatation de l'horizon superficiel est très nette. Le lessivage des particules colloïdales de la surface vers la profondeur du profil y est amorcé. De ce fait, l'horizon d'accumulation d'argile est observable, sa structure est marquée.

#### Profil 482

Date : 26 Avril 1979

Coordonnées : x = 362,2 ; y = 5279,2

Altitude : 295 m

Position géomorphologique : sur pente convexe au bord d'un dôme étroit.  
L'écoulement superficiel y est modéré. Le drainage interne y est favorable.

Géologie : Quaternaire

Matériau : loess récent

Classification : sol brun calcique.

#### Description morphologique

A<sub>p1</sub> 0-7 cm : couleur gris-clair ; texture : limon argileux ; non carbonaté ; structure polyédrique angulaire très fine et fine ; non compact ; très friable ; bonne activité biologique ; taux moyen de matière organique.

- A<sub>p2</sub> 7-25 cm : couleur brune ; texture : limon argileux ; très faiblement carbonaté ; structure continue à sous structure lamellaire ; peu compact ; très friable ; faible colonisation de vers de terre. Taux moyen de matière organique. Limite inférieure régulière et abrupte.
- (B) 25-44 cm : couleur brun rougeâtre ; texture : limon argileux  
Traces de carbonate de calcium ; structure subanguleuse à tendance lamellaire nette ; assez compact ; très friable ; assez bonne activité biologique ; matière organique faible ; revêtements argilo-organiques visibles dans les chenaux de lombrics et sur quelques faces structurales. Rares accumulations de Fe et Mn ; limite inférieure ondulée et abrupte.
- C<sub>1</sub> 44-100 cm : brun jaunâtre ; texture : limon moyen ; moyennement à fortement calcaire ; nombreux fragments de petite dimension ; structure continue à éclats émoussés ; frais ; assez compact ; très friable ; quelques lombrics ; quelques taches de Fe et Mn en marbrures ; accumulation de Ca CO<sub>3</sub> ; très faiblement organique ; limite inférieure régulière et distincte.
- C<sub>2</sub> 100-110 cm : couleur gris-jaunâtre ; texture : limon moyen ; moyennement calcaire ; nombreux fragments de coquilles de petite dimension ; structure continue à éclats émoussés, sous-structure lamellaire ; humide ; assez compact ; plastique et non collant ; activité biologique très réduite à absente. Quelques taches de Fe et Mn en marbrures.

#### 1.4. - Sols bruns lessivés

Le processus d'éluviation/illuviation (et de transformation des éléments primaires en argile) contribuent dans le cas présent à la différenciation de l'horizon d'accumulation d'argile, B<sub>t</sub>, et des horizons A éluviés.

Profil\_437

Date de description : 19 Avril 1979

Carte de Belfort 3-4 : échelle 1/25 000

Coordonnées : x = 361,9 ; y = 5280,3

Altitude 285 m

Position géomorphologique : sur replat en bordure de vallée ; pente  
faible < 1 % ; écoulement superficiel lent ;  
drainage interne modéré

Végétation : prairie retournée

Géologie : Quaternaire

Matériau : loess récent

Classification : sol brun lessivé.

Description morphologique

A<sub>p</sub> 0-30/32 cm : couleur brune ; texture : limon moyen ; structure polyédrique grossière ; frais ; assez compact ; très friable ; très bonne activité biologique ; moyennement à faiblement organique ; quelques noyaux de l'horizon sous-jacent remontés par le labour dans cet horizon ; limite régulière, très abrupte.

B<sub>21</sub><sup>t</sup> 30/32-48 cm : couleur brune ; texture : limon argileux ; structure polyédrique angulaire grossière au sommet à très grossière à la base ; frais ; moyennement compact ; friable ; très bonne activité lombricienne ; très faiblement organique ; nombreux revêtements argileux sur faces verticales de polyèdres structuraux ; limite graduelle et très ondulée.

B<sub>22</sub><sup>t</sup> 48-74 cm : couleur brun rougeâtre ; texture limono-argileuse ; structure polyédrique grossière à surstructure prismatique moyenne ; localement structure à tendance lamellaire ; frais ; assez compact ; friable à ferme ; chenaux lombriciens assez nombreux ; très faiblement organique ; présence de revêtements argilo-humiques tapissant les surfaces des chenaux lombriciens et les faces structurales ; limite graduelle faiblement ondulée.

B<sub>31</sub>t(g) 74-96 cm : couleur brune ; texture limono-argileuse ; structure peu nette, marquée par la présence de grandes faces verticales assez étroites ; frais ; assez compact ; ferme ; bonne colonisation lombricienne ; très faiblement organique ; rares petites taches rouille très diffuses. Limite distincte, faiblement ondulée.

B<sub>32</sub>t(g) 96-135cm : couleur brun jaunâtre, texture limono-argileuse ; structure continue à éclats anguleux avec présence de grandes faces ; frais ; compact ; consistance ferme à très ferme ; chenaux de lombrics peu nombreux ; très faiblement organique ; assez nombreuses taches jaune rouille de fer oxydé. Des revêtements argileux rougeâtres épais recouvrent les grandes faces structurales; limite très abrupte.

C 135-170 cm : matériau originel loessique de couleur jaune-gris à liserés gris ; texture : limon moyen ; moyennement à fortement calcaire avec coquilles ; structure continue à éclats anguleux ; humide ; compact ; peu plastique ; activité biologique très limitée ; très faiblement organique ; très nombreuses taches rouille et plages grises humides.

#### 1.5. - Sols lessivés

Excepté en position de dépression, ce type de sol constitue le stade le plus évolué des sols développés sur loess récent. Morphologiquement, il présente les caractères du sol brun lessivé, mais de manière plus affirmée. Aussi, les phénomènes de lessivage paraissent-ils ici plus intenses et le profil est généralement plus profond.

Profil 187

Date : 19 Avril 1979

Carte Altkirch 1-2 : échelle 1/25 000

Coordonnées : x = 365,9 ; y = 5282,2

Altitude 280 m

Position géomorphologique : sur pente faible (< 1 %) d'un plateau  
étroit à pente convexe

Hydrologie : l'écoulement superficiel est lent et le drainage interne  
favorable

Géologie : Quaternaire

Matériau : loess récent

Classification : sol lessivé.

Description morphologique

A<sub>p1</sub> 0-25 cm : couleur brun gris ; texture : limon moyen ; structure  
polyédrique moyenne, mal développée ; frais ; peu  
compact ; très friable ; lombrics assez abondants ;  
faiblement à moyennement organique ; limite inférieure  
abrupte et régulière.

A<sub>p2</sub> 25-40 cm : couleur gris brun ; texture : limon argileux ; structure  
continue à éclats anguleux, avec une tendance lamellaire  
localement ; frais ; compact ; très friable ; lombrics  
assez abondants ; faiblement organique ; limite infé-  
rieure très abrupte et régulière.

B<sub>1</sub> 40-50 cm : couleur brun grisâtre ; texture limono-argileuse ;  
structure continue à tendance lamellaire ; frais ; com-  
pact ; très friable ; lombrics assez abondants ; faible-  
ment organique ; localement quelques accumulations orga-  
nique sur éléments structuraux ; limite abrupte et  
régulière.

B<sub>2t</sub> 50-70 cm : horizon d'accumulation couleur brun rougeâtre ; texture limono-argileuse ; structure polyédrique grossière à très grossière moyennement développée ; tendance lamellaire ; frais ; assez compact : très friable ; très grande activité lombricienne ; très faiblement organique ; des revêtements argilo-organiques sur les faces des polyèdres structuraux et chenaux de lombrics ; limite distincte à graduelle.

B<sub>31</sub> 70-90 cm : horizon de transition ; couleur brun jaunâtre ; texture limono-argileuse ; structure prismatique très grossière moyennement développée, localement polyédrique grossière frais ; assez compact ; friable ; activité biologique moyenne ; très faible taux de matière organique ; des revêtements argilo-organiques sur les faces des prismes.

B<sub>32</sub> 90-120 cm : horizon de transition ; couleur brun jaune ; texture limono-argileuse ; structure continue à éclats angulaires ; frais ; assez compact ; très friable ; lombrics moyennement nombreux ; matière organique très réduite ; des revêtements argileux sur les grandes faces verticales.

C 135-150 cm : loess récent ; couleur gris-jaune ; structure continue ; frais ; moyennement à fortement calcaire ; peu compact ; friable ; quelques taches rouilles, localement verdâtres.

L'examen macromorphologique des profils décrits et analysés dans leur contexte régional, ainsi que les résultats de laboratoire ont permis de relever les principaux caractères des sols développés sur ce type de matériau.

#### 1.6. - Conclusion et discussion sur la séquence de sols présentés

D'un point de vue pédologique, nous retrouvons ici les sols constituant les étapes du schéma évolutif proposé par JAMAGNE (1973 ; 1978) en étudiant les limons du Nord de la France. En fait, le développement



pédologique maximal atteint sur loess, du moins en condition de mise en culture, est le sol lessivé. Ce type de sol a très probablement dû passer par les stades en amont de la séquence théorique. En fonction de la topographie et de l'intensité de l'érosion on aura un stade intermédiaire entre les sols peu évolués et les sols lessivés.

Du point de vue du comportement physico-chimique, il convient de préciser les principales caractéristiques de ces sols. Le rapport limons/argiles est particulièrement élevé dans les horizons de surface, où il peut atteindre 5. La station agronomique de Laon considère qu'il y a risque de battance pour les sols dont la fraction argileuse est inférieure à 17 % si ce rapport est de 1,5 à 2. (chapitre III.1.4, limites d'Atterberg). La structure de tels horizons pourrait être caractérisée d'instable à très instable ( $1,5 < \log I_{0I} < 2$ ). Leur limite de plasticité est atteinte pour des teneurs en eau allant de 24 à 26 %. L'indice de plasticité est très bas ( $4 < I_p < 5,5$ ). L'humidité équivalente varie entre 19 et 27 %. L'instabilité structurale et la sensibilité à l'eau traduite par les limites d'ATTERBERG sont probablement une conséquence des faibles taux de l'argile et de la matière organique. Compte tenu de la composition organo-minérale et des résultats énoncés, nous pouvons craindre pour les horizons superficiels une nette sensibilité :

- au phénomène de battance,
- à une érosion active sur pente  $> 2$  % et en l'absence d'un couvert végétal (photo 1), annexe II,
- à l'enlèvement d'engins et à la formation d'ornières pour des teneurs en eau supérieures à 25 %.

Les calculs de K, à partir de la formule de DARCY (méthode Porchet ; charge variable), font apparaître que la perméabilité moyenne des loess est de  $4,8 \cdot 10^{-6}$  m/s (7 valeurs) ; les valeurs extrêmes étant  $1,1 \cdot 10^{-6}$  et  $6,9 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Exceptés les bordures des cours d'eau et les dépressions où l'influence de l'excès d'eau est grande ; les sols développées sur loess récents paraissent peu affectés par l'hydromorphie. Lorsque celle-ci se manifeste, comme ça peut être le cas de certains sols bruns lessivés ou sols lessivés, elle est davantage marquée dans les horizons B/C ou dans

le sommet de C. La structure plus continue de ces horizons pourrait être à l'origine des signes d'excès d'eau observés, mais l'influence du substrat à faible profondeur et une moindre activité biologique pourraient aussi en être la cause. Toutefois, cette hydromorphie n'affecte pas les cultures annuelles actuellement pratiquées sur la plupart de ces sols.

Dans les unités pédologiques où le loess affleure dès la surface, le pH dépasse 8 (8,3). D'après M. VINK (1963), on peut craindre dans des situations analogues un blocage des engrais phosphatés et une déficience possible en bore, en fer, manganèse et potasse. Il conviendrait d'y éviter les plantes craignant le calcaire.

L'interprétation de la capacité d'échange dans les sols où l'influence des carbonates de calcium est grande s'avère difficile. La valeur de  $Ca^{2+}$  y dépasse presque toujours celle de T. Ce problème est déjà constaté sur les loess du nord de la France (JAMAGNE, 1973), la méthode classique de détermination de T des sols calcaires devrait être remise à l'étude pour pouvoir l'interpréter correctement.

Les unités de sols qui ont atteint les stades d'évolution les plus poussés, peuvent être désaturés sur 80 cm de profondeur et leur pH peut descendre à 5,2.

## 2. - SOLS DEVELOPPES SUR LEHMS ANCIENS

Ce matériau occupe surtout la partie sud-ouest joignant Diefmatten à Gommersdorf. Avant de présenter les sols développés à partir de ce matériel, il convient de relater certaines observations :

Cette formation présente une alternance irrégulière de niveaux rougeâtres et jaunâtres. Les premiers ont une teneur en argile légèrement plus élevée ( $\approx 2\%$ ) ; les seconds renferment bien davantage de concrétions ferro-manganiques indurées. Souvent, ces concrétions nous paraissent fossiles et semblent témoigner d'un comportement hydrodynamique ancien.

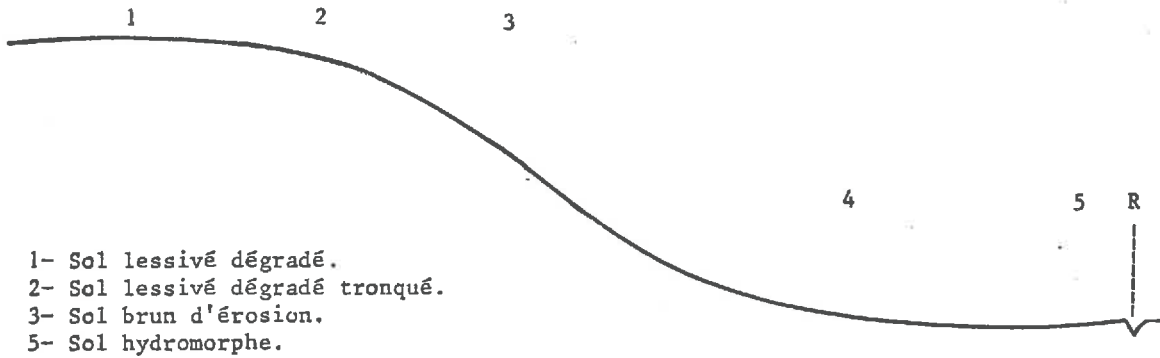
En effet, sur une coupe (route d'Aspach le Bois à Cernay, carte I.3.) nous avons observé sous un loess de tels niveaux dont l'humidité observée à la sortie de l'hiver ne saurait expliquer le concrétionnement. En effet, le loess susjacent et le solum type sol lessivé qu'il supporte ne présentent d'ailleurs pas de manifestation d'hydromorphie. Le cailloutis sur lequel repose le lehm ne renferme pas de nappe, du moins dans sa partie supérieure accessible à nos observations. La carrière située à 150 m de l'autre côté de la route ne présente pas de niveau aquifère net. Dans ces conditions, il semble bien que les lehms ont subi une pédogenèse active caractérisée par ce concrétionnement antérieur au dépôt des loess et seraient donc des paléosols.

Ceci dit, si les conditions topographiques sont défavorables, la partie supérieure des niveaux lehmiques peut être soumise à une hydromorphie actuelle active sans qu'il soit toujours possible de distinguer les signes d'hydromorphie contemporaine des vestiges de l'ancienne.

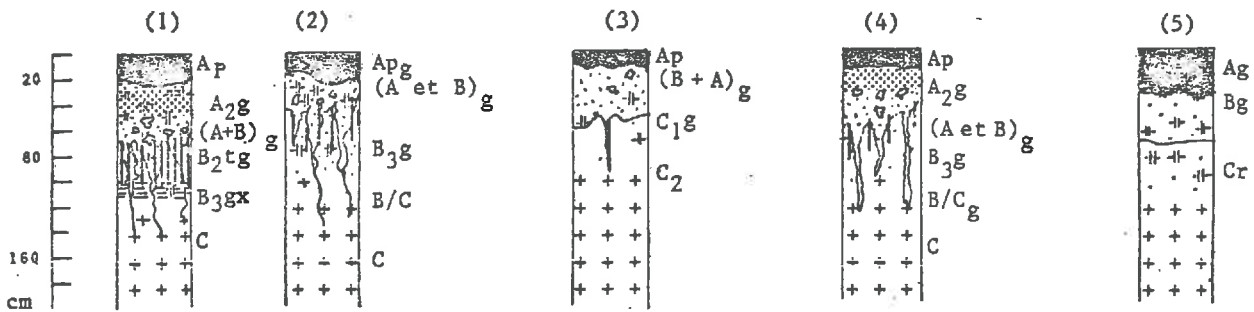
La limite séparant les lehms anciens et les autres matériaux limoneux suit, grosso modo, la ligne d'isohyète 900 mm telle qu'elle a été tracée par ROTH (1974). Aussi, les lehms anciens, sont-ils soumis à un régime pluviométrique plus élevé que celui des autres formations limoneuses quaternaires.

Nous sommes donc en présence d'un matériau meuble bien que compact, désaturé en surface, situé dans un contexte climatique favorable (carte I.3) à une évolution pédologique plus poussée que celle décrite sur loess récent. Ces conditions favorisent l'action des processus de dégradation et l'apparition de glôsses déferriées. Comme nous le constatons lorsque la position géomorphologique épargne les lehms de l'action de l'érosion. Aussi, observe-t-on du sommet d'une butte vers le fond des vallons et des vallées, la séquence suivante : sol dégradé en position horizontale (pente < 2 %), sol dégradé tronqué sur pente moyenne ; sol brun par ablation sur pente forte ; sol d'apport colluvial dans les dépressions. L'hydromorphie est plus ou moins marquée suivant l'influence de la position topographique ou la proximité des niveaux imperméables (schéma. II.2)

Schéma II.2.



- 1- Sol lessivé dégradé.
- 2- Sol lessivé dégradé tronqué.
- 3- Sol brun d'érosion.
- 5- Sol hydromorphe.



Şéquence topographique sur lehms anciens

- |  |                                      |  |                                |
|--|--------------------------------------|--|--------------------------------|
|  | Horizons riches en matière organique |  | Accumulation d'argile          |
|  | Horizons A <sub>2</sub>              |  | Niveau de compacité (fragipan) |
|  | Noyaux de B <sub>t</sub>             |  | Horizons C compacts            |
|  | Signes d'hydromorphie                |  | Glosses                        |

R : Ruisseau

## 2.1. - Sols lessivés dégradés

### Profil 47

Date : 10 Avril 1979

Carte IGN échelle 1/25 000 ; feuille Thann 7-8

Coordonnées : x = 957,6 ; y = 313,2

Altitude 334 m

Position géomorphologique : terminaison d'un plateau sur pente faible  
( < 2 % ) convexe

Géologie : Quaternaire .

Drainage interne faible. Ecoulement superficiel lent à très lent

Classification : sol lessivé dégradé.

### Description morphologique

A<sub>p</sub>(g) 0-28 cm : couleur grisâtre, texture : limon moyen ; structure polyédrique grossière à éclats anguleux ; frais ; compacité faible à moyenne ; fraible ; bonne activité lombricienne ; faiblement organique ; très nombreuses racines ; tâches rouilles autour des racines. On y note la présence des passages de A 2 g remontés par le labour ; limite régulière et distincte.

A 2 g 28-42 cm : couleur brun gris ; texture : limon moyen ; structure lamellaire fine à moyenne très bien exprimée ; frais ; compacité faible à moyenne ; friable ; activité biologique moyenne d'origine lombricienne ; très faiblement organique ; revêtements rosâtres nombreux sur les faces de la structure et le long des chenaux lombriciens ; localement passages très concrétionnés ; quelques racines dans glosses ; limite inférieure régulière et distincte.

(A et B) g 42-60 cm : couleur brunâtre ; texture limono-argileuse ; structure assez continue vers les horizons A et prismatique moyenne plus bas avec une tendance lamellaire même dans les glosses ; frais ; assez compact ; friable ; activité biologique très réduite ; très faiblement organique ; nombreuses concrétions et amas sur faces verticales ; nombreuses taches rouilles ferro-manganiques et plages grisâtres ; apparition d'un noyau de B<sub>2t</sub> amorce des glosses ; plages grisâtres/matrice ≈ 50 % ; limite graduelle.

B<sub>2</sub>tgx 60-80 cm : couleur brun rougeâtre ; texture limono-argileuse ; structure assez difficile à préciser ; présence de grandes faces obliques ; humide ; compact à très compact ; assez plastique ; activité biologique presque absente ; très peu de matière organique ; grandes plages grises déferrifiées ; concrétionnement du bord des glosses, début de "fragipanisisation" ; limite distincte et légèrement ondulée.

B<sub>3</sub>gx 80-150 cm : couleur brun rouille à brun orangé ; texture limono-argileuse ; structure assez continue ; tendance lamellaire plus nette que précédemment ; assez humide ; très compact ; moyennement plastique ; très peu de chenaux lombriciens revêtus ; faible teneur en matière organique ; glosses devenant plus étroites et plus ramifiées vers le bas ; quelques concrétions friables ; fond du profil à 1,50 m.

## 2.2. - Sols lessivés dégradés tronqués

Les sols ont été observés dans des positions topographiques exposées à l'érosion. De ce fait, leurs horizons de surface subissent des troncatures progressives qui tendent à les rajeunir.

Profil 402

Date 23 Avril 1979

Carte IGN Belfort 3-4

Coordonnées : x = 354,7 ; y = 5278,1

Altitude 360 m

Position géomorphologique : sommet d'une butte ; au départ d'une  
pente moyenne (2-5 %)

Exposition ; versant nord

Drainage interne faible ; écoulement superficiel modéré

Géologie : Quaternaire

Matériau : lehm ancien

Classification : sol lessivé dégradé tronqué.

Description morphologique

Ap 0-18 cm : couleur gris uniforme ; texture limono-argileuse ;  
structure continue à éclats anguleux, légère tendance  
polyédrique grossière ; frais ; moyennement compact ;  
friable ; nombreux chenaux lombriciens ; radicelles denses ;  
moyennement organique ; limite inférieure abrupte ;  
faiblement ondulée.

(A et B)<sub>g</sub> 18-30 cm : front d'approfondissement de l'horizon A et de  
"digestion" de B ; couleur brun-gris à beige ;  
texture : limon argileux ; structure continue  
à la partie supérieure et polyédrique vers le  
bas ; frais ; assez compact ; friable ; assez  
nombreux terricules et chenaux lombriciens ; ra-  
dicelles assez denses ; faiblement organique ;  
nombreuses taches et amas ferro-manganiques dans  
noyaux de B<sub>t</sub> ; limite abrupte interrompue et for-  
tement ondulée.

B<sub>2</sub>tg 30-50 cm : couleur brun rouge ; texture limono-argileuse ; structure polyédrique moyenne à grossière ; sous-structure lamellaire ; frais ; assez compact ; friable ; terricules et chenaux lombriciens moyennement nombreux ; racines moyennement denses dans chenaux de lombrics ; faiblement organique ; quelques concrétions dures ; nombreuses glosses anastomosées, déferrisées grises , formées d'argilanes et de siltanes ; revêtements argilo-humiques dans chenaux lombriciens, sur les faces verticales et horizontales des agrégats et dans glosses ; limite abrupte et régulière.

B<sub>31</sub>g 50-70 cm : couleur rosâtre ; texture limono-argileuse à argilo-limoneuse ; structure cubique assez grossière ; frais ; compact ; friable ; chenaux lombriciens moyennement nombreux ; faiblement organique ; très nombreuses concrétions ferromanganiques indurées ; revêtements ferromanganiques continus le long des faces de structure localement, ces revêtements sont liés à d'autres rosés et argileux ; limite régulière et graduelle.

B<sub>32</sub> 70-90 cm : couleur brun rosé ; texture limono-argileuse à argilo-limoneuse ; structure cubique très grossière à sur-structure prismatique, quelques grandes faces conchoïdales ; frais ; très compact ; friable ; chenaux lombriciens très rares ; matière organique négligeable ; quelques radicelles ; les glosses plus rares et plus espacées ; limite graduelle et ondulée.

B/C 90-120cm : couleur brun rosé à jaunâtre, texture argilo-limoneuse ; structure continue ; frais ; extrêmement compact ; friable à dur ; activité biologique non décelée ; pauvrement organique ; glosses grises espacées ; quelques argilanes rosées ; fond de profil 1,20 m.



### 2.3. - Sols bruns d'érosion

L'effet de l'érosion est ici encore plus prononcé que précédemment. Le sol a été érodé jusqu'à l'horizon C. Dès que la topographie s'adoucie, le sol dit d'érosion évolue à nouveau dans le sens de la dégradation.

#### Profil 180

Date 22 Avril 1979

Carte IGN Thann 7-8 ; échelle 1/25 000<sup>e</sup>

Altitude 395 m

Position géomorphologique : pente faible et rectiligne

Exposition : versant sud-est

Drainage interne : imparfait à faible

Géologie : quaternaire

Matériau : lehms anciens

Classification : sol brun d'érosion

#### Description morphologique

Ap 0-20 cm : couleur gris uniforme ; texture limon moyen ; structure polyédrique subangulaire très grossière ; frais ; peu compact ; friable ; chenaux de lombrics rares ; moyennement organique ; limite inférieure régulière et très abrupte.

(A et B)g 20-40 cm :

couleur jaune grisâtre ; texture limono-argileuse ; structure polyédrique grossière à moyenne vers le bas ; frais ; faiblement à moyennement compact ; friable ; chenaux de lombrics assez nombreux ; taches ferro-manganiques nombreuses ; limite inférieure abrupte, discontinue à faiblement ondulée.

Cet horizon constitue une zone de départ des glosses grises.

(B et A)g 40-70 cm :

couleur brun rouille ; texture limono-argileuse ; structure à tendance lamellaire moyennement développée ; frais ; moyennement compact ; friable ; quelques chenaux de lombrics ; enduits ferro-manganiques sur les faces horizontales de la structure ; quelques concrétions friables ; limite inférieure abrupte, discontinue et ondulée. On note, pour cet horizon, la présence de revêtements assez épais sur les faces verticales ; les glosses, bordées d'un liseré rouille, sont larges mais pas très contrastées.

B/C<sub>g</sub> 70-90 cm :

couleur rouille ; texture : limono-argileuse ; structure lamellaire très fine à continue ; frais ; compact ; friable ; très rares chenaux ; les glosses sont plus minces que dans l'horizon supérieur, mais plus contrastées ; limite inférieure graduelle et irrégulière.

C<sub>g</sub> :

couleur rougeâtre ; texture : limon moyen ; structure continue à éclats anguleux ; frais à sec ; très compact ; dur ; nombreuses concrétions ferro-manganiques ; les glosses de couleur gris-blanchâtre sont encore très contrastées mais s'amincissent vers le bas du profil ; on note en leur centre la présence d'argile déferrifiée.

## 2.4. - Sols hydromorphes

### Profil 408

Date : 23 Avril 1979

Carte IGN de Belfort : échelle 1/25 000

Coordonnées : x = 354,3 ; y = 5277,8

Altitude 350 m

Position géomorphologie : dôme étroit et allongé sur pente assez forte  
rectiligne, orientée nord-est

Végétation : prairie permanente

Drainage : interne limitée, écoulement superficiel rapide. Nappe semi-  
permanente

Géologie : Quaternaire et Tertiaire

Matériau : lehm sur cailloutis du Sundgau

Classification : sol hydromorphe.

### Description morphologique

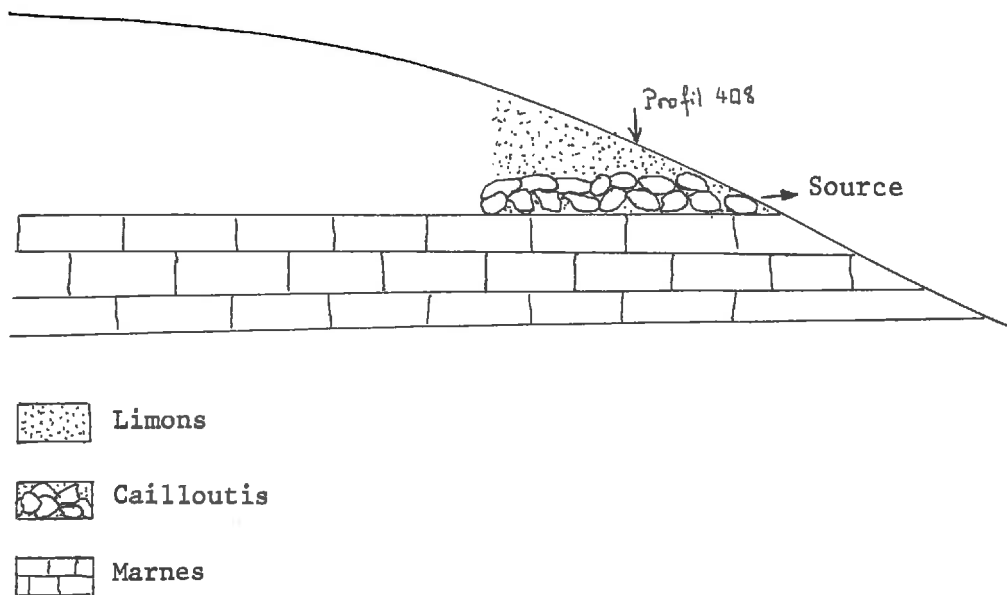
A<sub>11</sub> g 0-10 cm : couleur gris foncé ; texture : limon moyen ; structure  
grumeleuse fine ; humide ; peu compact ; peu plastique ;  
activité biologique limitée ; fortement organique ;  
nombreuses radicelles ; limite abrupte et régulière.

A<sub>12</sub> g 10-25 cm : couleur gris clair ; limon argileux ; structure polyé-  
drique grossière rectangulaire ; humide ; peu compact ;  
plastique et collant ; quelques chenaux lombriciens ;  
assez fortement organique ; taches rouilles à proximité  
des racines ; nombreuses radicelles ; limite régulière  
et graduelle.

A<sub>2</sub> g 25-40 cm : couleur blanc gris-pâle ; limon moyen ; structure con-  
tinue à éclats anguleux ; humide ; assez compact ; peu  
plastique et non collant ; quelques chenaux de lombrics  
faiblement organique ; quelques racines empruntant les  
chenaux lombriciens ; taches rouilles nombreuses et  
petites ; quelques petits cailloux ; limite graduelle  
assez ondulée.

- (A et B)g 40-50 cm : couleur gris-blanc en zone de A, rouille dans zone de B ; texture : limon moyen à limon argileux ; structure continue à éclats anguleux ; humide ; assez compact ; assez friable ; rares chenaux de lombrics occlus ; faiblement organique ; taches rouilles nombreuses (30 % de l'horizon) ; amas de Fe Mn légèrement indurés ; quelques fentes décolorées verticales ; limite abrupte à graduelle , localement très abrupte.
- B<sub>2</sub> g 50-70 cm : couleur gris-orangé ; texture limono-argileuse ; structure lamellaire très grossière à polyédrique moyenne ; quelques graviers ; quelques faces verticales revêtues de limons fins ; très humide ; assez compact ; peu plastique à friable ; quelques faces dans fentes structurales ; porosité faible ; activité biologique nulle ; pellicules ferrugineuses légèrement indurées ; limite graduelle, faiblement ondulée.
- B<sub>3</sub> g 70-95 cm : couleur rouille-orangé ; texture limono-argileuse ; structure lamellaire à polyédrique moyenne ; faces verticales nettes très humides ; peu compact ; nombreux amas ferro-manganiques ; présence de débris de matière organique non décomposée ; localement gleyifié ; limite fortement ondulée, interrompue.
- G<sub>1</sub> r 95-110 cm : couleur bleu clair ; texture limono-argileuse ; structure continue ; gorgé d'eau ; matière organique non décomposée ; traînées rouilles autour des racines ; gley réduit, très gluant.
- G<sub>2</sub> r 110-140 cm : couleur marmorisée ; bariolage bleu-rouille ; texture limono-argileuse ; structure continue ; très compact ; très humide ; nombreux cailloutis Pliocène du Sundgau.

Ce sol s'est développé sur les vestiges des lehms et sur le cailloutis du Sundgau. Malgré leur position topographique favorable à une évacuation rapide de l'eau pluviale hors du profil, on note un engorgement important qui fait évoluer ces sols dans des conditions hydromorphes. L'origine de l'excès d'eau est liée à la fois à la nappe du cailloutis et à la présence à faible profondeur du substrat marneux imperméable.



#### Niveau d'apparition des sources induisant l'hydromorphie des sols sur pente

##### 2.5. - Conclusion sur la séquence de sols développés sur lehms

Alors que la séquence d'évolution sur loess s'observe en milieu aéré, non ou peu acide, la séquence sur lehms anciens s'observe en milieu plus compact (réduction) plus acide et plus désaturé.

La première montre une différenciation texturale du solum par lessivage des éléments solides fins (illimérisation de Fridland 1958 ; argilluviation de Dudal 1968). Le sol le plus évolué sur loess, en condition de culture, est un sol lessivé.

La seconde est celle où la dégradation géochimique des argiles succède au processus d'entraînement mécanique mis en jeu dans la première. Morphologiquement, la dégradation est caractérisée par une éluviation poussée des horizons A ( $A_2$ ), d'une intensification des signes d'hydromorphie concrétisées par une marmonisation des sommets des horizons B prolongée par une glossification des horizons B et, éventuellement, des C. Dans les conditions de mise en culture, le sol typique développé dans les lehms anciens, lorsque les facteurs de la pédogenèse agissent sans contraintes particulières est un sol lessivé dégradé. Les autres stades observés sont déterminés par un ou plusieurs facteurs pédogénétiques dont l'action prédomine.

En fait, nous retrouvons pour les sols limoneux du Sundgau, l'évolution type séquentielle telle qu'elle a été décrite par JAMAGNE (1970 ; 1973 ; 1978) pour les limons du Bassin Parisien et par BEGON (1972) pour les Sols de Boulbène. Le rapport limons/argiles des couches superficielles des sols décrits peut dépasser 4. La valeur de  $\log I_0 I_s$  y est de l'ordre de 1,4. L'indice de plasticité,  $I_p$  est de 4,5 pour les horizons superficiels les plus dépourvus en argile. La densité apparente, généralement inférieure  $1,4 \text{ g/cm}^3$  en surface, dépasse  $1,55 \text{ g/cm}^3$  dans les horizons non remaniés pour les façons culturales. La perméabilité de ces sols varie entre  $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  et  $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ . La valeur moyenne de 10 mesures est  $7,8 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ . Aux défauts de comportement dus aux constituants physiques, déjà évoqués pour les sols sur loess, s'ajoutent ceux dus à une compacité élevée des sols sur lehms. Celle-ci réduit la quantité d'eau stockée et limite le transfert de l'eau et de l'air. Du point de vue des caractéristiques chimiques, ces sols paraissent acides et leur complexe absorbant est généralement désaturé. Le cation  $\text{Ca}^{2+}$  qui représente plus de 70 % du taux de saturation tend à augmenter avec la profondeur du sol. Le taux de magnésium échangeable varie dans le même sens.

La tendance à l'acidité, ainsi que l'hydromorphie saisonnière, induite par la compacité des lehms anciens et, par un régime pluviométrique important, limite, le plus souvent, l'utilisation agricole des sols dérivés de ce matériau à la production d'herbe et du bois.

- D E U X I È M E P A R T I E -  
=====

L'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

CHAPITRE III : Techniques utilisées aux laboratoires.

CHAPITRE IV : Caractéristiques géotechniques des  
formations superficielles du Sundgau.

CHAPITRE V : Etude particulière : Le compactage.

### III - TECHNIQUES UTILISEES AUX LABORATOIRES

---

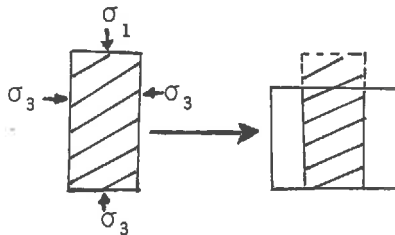
L'ensemble des techniques, qui ont été utilisées pour la détermination des paramètres mécaniques ou physico-chimiques des sols du Sundgau, sont ci-après présentées :

#### 1. - ESSAIS DE RESISTANCE MECANIQUE

##### 1.1. - Le triaxial

Cet appareil permet de quantifier la résistance au cisaillement par la détermination de ses deux composantes : la cohésion ( $c$ ) et l'angle de frottement interne ( $\varphi$ ) de la droite de coulomb d'équation :  
 $\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$ .

$\sigma_1$  = Contrainte axiale  
 $\sigma_3$  = Contrainte latérale



L'échantillon à l'état "naturel" ou perturbé, puis reconstitué, est placé dans une cellule contenant de la glycérine mise à la pression choisie pour l'essai. L'éprouvette, de forme cylindrique, est isolée par une membrane. A la contrainte hydrostatique s'ajoute verticalement la pression exercée à vitesse constante par un piston. Aussi, le champ de contraintes peut-il se décomposer comme suit :

- Une pression hydrostatique  $\sigma_3$ , encore appelée étreinte ou pression latérale. Elle est appliquée par le fluide emplissant la cellule.



- Une contrainte axiale ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ), ou déviateur, appliquée par l'intermédiaire du piston.

L'extrémité supérieure de l'éprouvette est au contact d'une pierre poreuse sertie dans un ensemble supportant le piston. Elle peut être reliée à un dispositif permettant la saturation de l'éprouvette. Celle-ci repose sur une ambase par l'intermédiaire d'une pierre poreuse qui assure, en cas de besoin, le drainage de l'échantillon. On peut la relier à un appareillage annexe autorisant la mesure de la pression interstitielle.

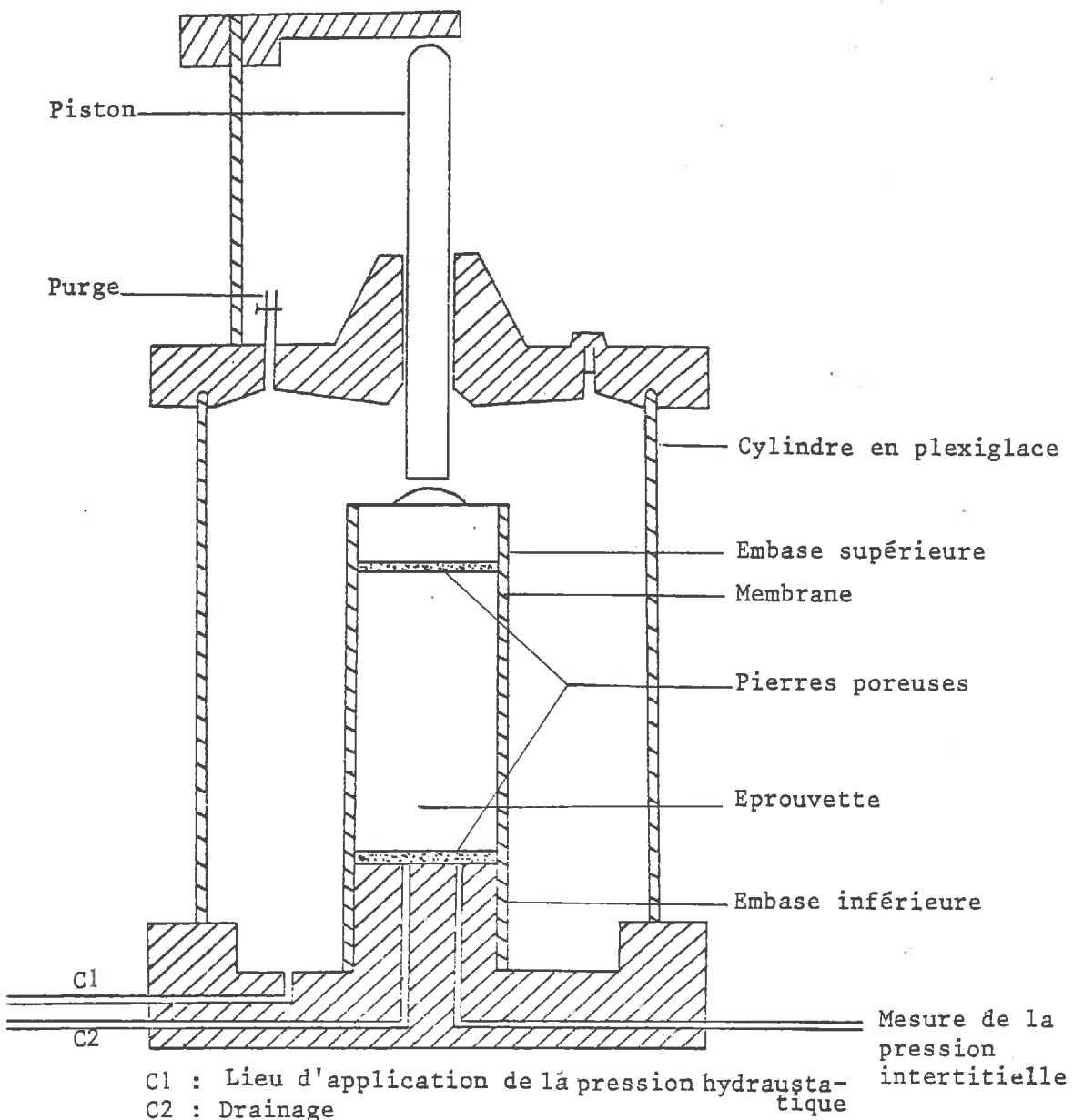


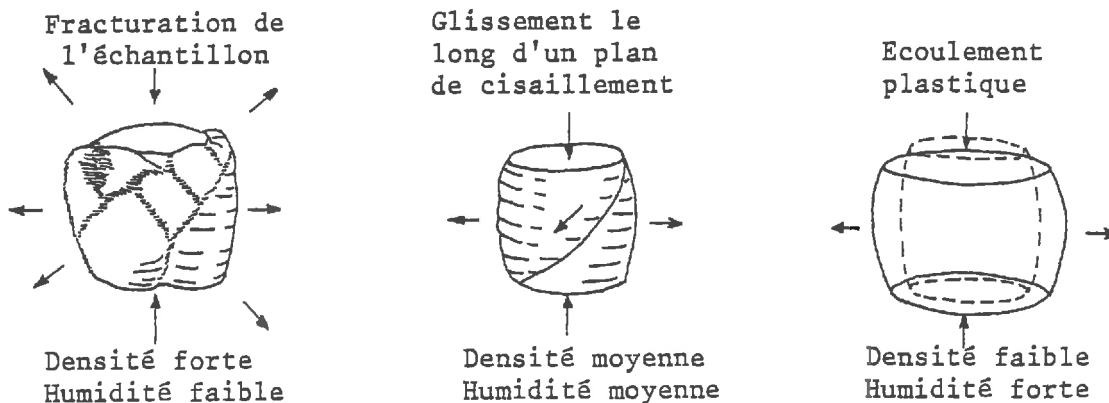
Fig. III.1. - Appareil triaxial.

La pression hydrostatique  $\sigma_3$  étant maintenue constante, on fait croître le déviateur ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) jusqu'à la rupture de l'éprouvette. L'opération est répétée autant de fois que l'on retient de pressions hydrostatiques. Il est donc très important que les éprouvettes, d'un essai à l'autre, soient aussi semblables que possible et représentatives de la couche de sol à étudier. Avec les résultats obtenus, on trace dans le plan les cercles de Mohr pour plusieurs valeurs de  $\sigma$ .

La rupture est atteinte lorsqu'il n'y a plus proportionnalité entre les contraintes et les déformations qu'elles engendrent. Alors que le comportement d'un matériau est considéré comme élastique avant la rupture, il deviendra plastique après celle-ci.

On considère que durant la phase plastique, la déformation de l'éprouvette se fait à volume à peu près constant. La déformation, à la rupture, peut se faire par cisaillement franc suivant un plan préférentiel de rupture, ou par une déformation en tonneau.

Les différents comportements des sols cohérents après leur écrasement:



Du point de vue graphique, comme le montre la figure suivante, deux types de courbes ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) en fonction de la déformation axiale  $\varepsilon_1$  peuvent se présenter :

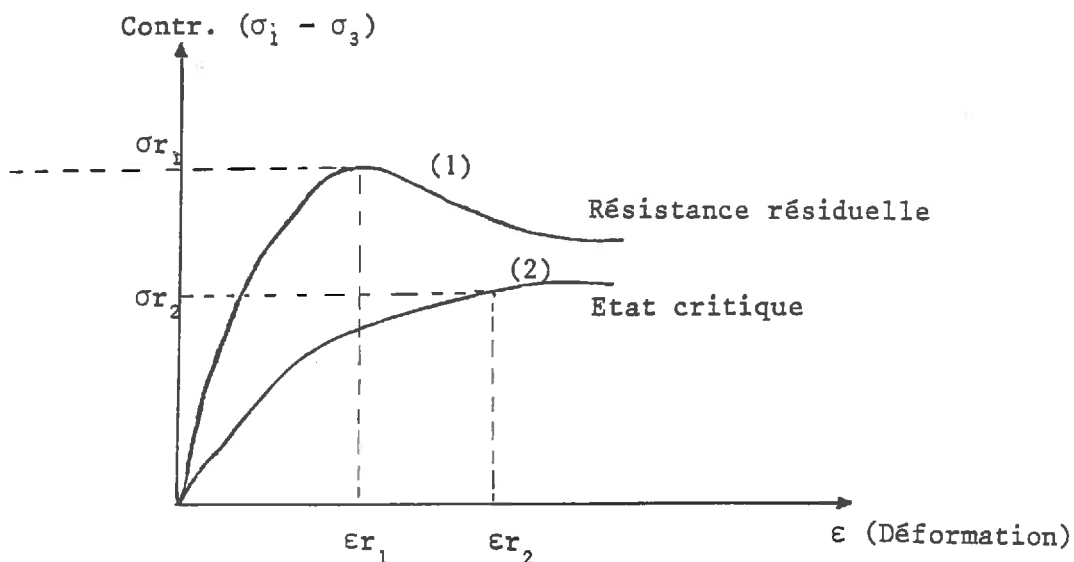


Fig. III.3. Courbes :  $\sigma_1 - \sigma_3 = f(\epsilon)$

Dans le cas de la courbe 1, le matériau se déforme avec l'accroissement des contraintes jusqu'à un maximum  $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$  où la rupture est imminente pour un accroissement supplémentaire de  $\sigma$ . Jusqu'au maximum, le matériau est considéré comme étant élastique. Au delà du maximum, la résistance décroît brusquement jusqu'à une certaine valeur résiduelle.

En revanche, d'après la courbe 2, qui ne présente pas un maximum net, la déformation croît indéfiniment avec la contrainte. Dans ce cas, on choisit comme déviateur de rupture celui qui correspond à un pourcentage donné  $\epsilon_r$  de la déformation axiale.

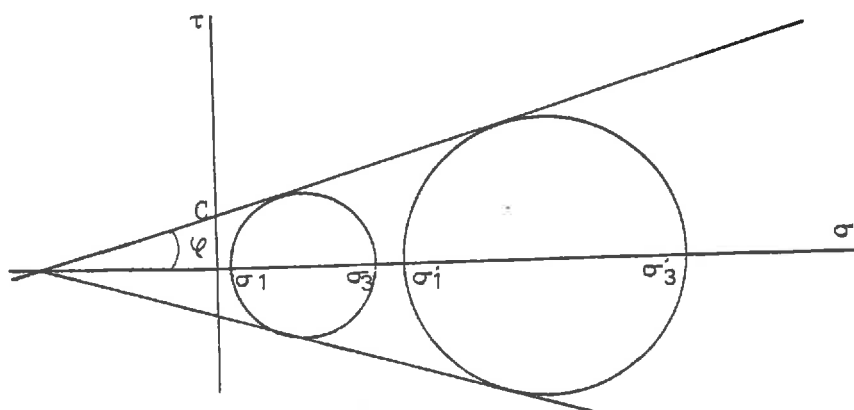


Fig. III.4. Cercles Mohr, courbes intrinsèques

On appelle courbe intrinsèque (Fig. III4) la courbe enveloppe des cercles de Mohr. Cette courbe définit, dans le plan, des domaines de contraintes applicables à l'échantillon. Quand le point représentatif se trouve sur la courbe intrinsèque, il y a écoulement plastique, c'est-à-dire rupture au sens où on l'entend habituellement.

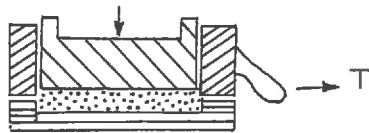
Il existe plusieurs types d'essais triaxiaux :

- les essais non consolidés non drainés (U.U.),
- les essais consolidés non drainés (C.U.),
- les essais consolidés, drainés (C.D.).

Quel que soit le type d'essai triaxial, celui-ci se fait en deux temps :

- On commence à appliquer la pression hydrostatique  $\sigma_3$ ,
  - . soit à drainage fermé, dans quel cas, on applique la pression verticale au moyen du piston. L'essai est dit non consolidé,
  - . soit à drainage ouvert, auquel cas on attend que la pression interstitielle soit dissipée. L'essai est dit consolidé.

#### 1.2. - Essai dans la boîte de cisaillement rectiligne de Casagrande



La résistance au cisaillement des sols cohérents et pulvérulents peut être mesurée au moyen de la boîte de Casagrande. L'essai permet de déterminer les caractéristiques mécaniques (tels la cohésion et le frottement de l'éprouvette cisailée) dans d'autres conditions de travail que lors d'un essai triaxial, avec l'impossibilité pour le sol de se déformer latéralement, la contrainte latérale étant inconnue.

L'échantillon est placé dans un boîtier constitué de deux parties pouvant se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston intégré dans la partie supérieure du boîtier transmet une force normale donnée à l'échantillon. La demi-boîte inférieure est fixe. Les efforts de traction croissant, sont transmis à la partie supérieure du boîtier au moyen d'un levier. Des comparateurs permettent de mesurer les tassements du sol et les déplacements de la partie tractée du boîtier. On note l'effort de traction qui provoque la rupture de l'éprouvette ( $\tau_r$ ) pour une contrainte normale donnée  $\sigma_r$ . L'essai est effectué sur plusieurs éprouvettes avec des valeurs de  $\sigma_r$  différentes (Fig. III.5.).

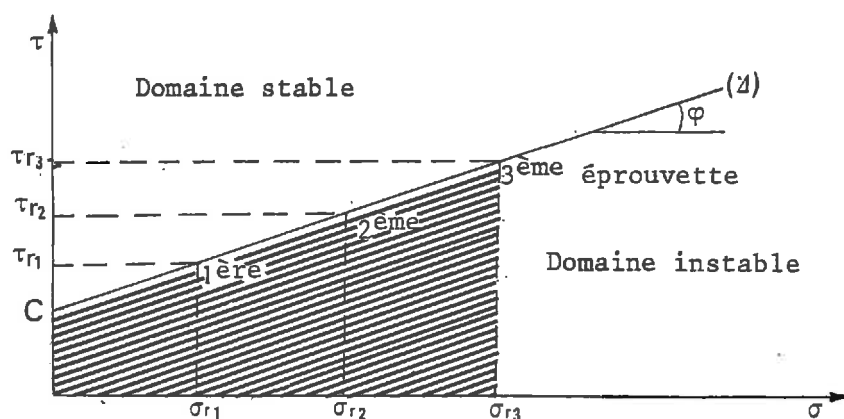


Fig. III.5. Représentation de la droite de Coulomb.

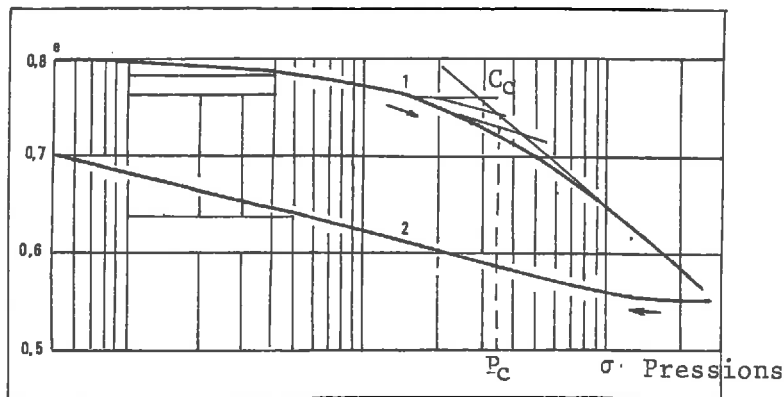
Cet appareil, d'emploi facile, présente un certain nombre d'imperfections :

- Les pressions ne sont pas uniformément réparties dans tout l'échantillon. De ce fait, la rupture ne se produit pas simultanément en tous les points du plan de glissement.
- Il y a risque de frottement parasite, notamment celui qui peut avoir lieu entre la partie supérieure du boîtier et la surface cisailée de l'échantillon.

Dans cet essai, on n'est pas maître des conditions de drainage qui dépendent de la perméabilité du matériau et de la vitesse d'essai.

### 1.3. - La compressibilité oedométrique

Le but essentiel des essais oedométriques est l'étude de la consolidation du sol dans le temps et dans l'espace. L'échantillon de sol est placé dans un boîtier dont la partie supérieure est soumise à une charge de compression normale constante. Un comparateur placé sur la partie supérieure du moule enregistre les variations de la hauteur de l'échantillon ( $\Delta_h$ ). Celui-ci est habituellement drainé pendant la durée de l'essai. Ce procédé permet de déterminer la relation entre les charges et les déformations, ainsi que le coefficient de perméabilité verticale pour une compacité donnée.



- 1 Charge
- 2 Décharge

Fig. III.6. Courbe oedométrique

Les résultats sont figurés sur un diagramme contrainte - indice des vides. Les contraintes sont portées sur l'axe des abscisses en module logarithmique.

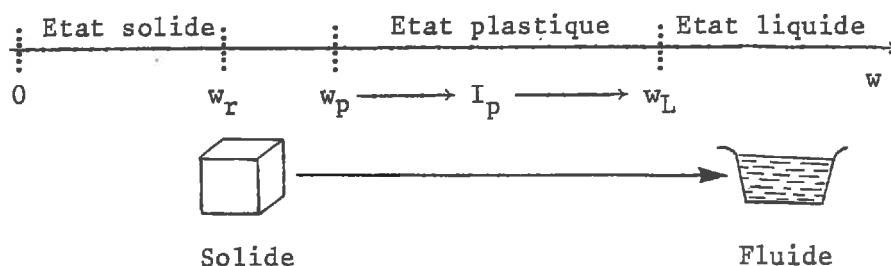
La courbe obtenue présente généralement deux branches : l'une est sensiblement horizontale ; l'autre est plus inclinée, les variations de l'indice des vides ( $e = \frac{V_v}{V_s}$ ) y sont linéaires en fonction des logarithmes des contraintes. L'indice de compression,  $C_c$ , est la pente de la seconde partie de la courbe. La pression de consolidation  $\sigma_c(P_c)$  est la charge au-delà de laquelle la variation d'indice des vides devient sensible (déterminé par la construction de Casagrande) (Fig. III.6.).

D'un point de vue mécanique, la première branche de la courbe correspond à l'étape de consolidation proprement dite. Pendant cette phase primaire, le tassement se fait sous contrainte totale. Lors de la phase secondaire, le tassement se fait sous contrainte effective entraînant la compressibilité des éléments solides, l'eau et les particules solides étant pratiquement incompressibles.

#### 1.4. - Limites d'ATTERBERG

La consistance des sols varie avec leur cohésion et avec leur teneur en eau interstitielle du système poral. Elle est aussi fonction des contraintes subies par les matériaux. Il est évident qu'une même argile ne réagira pas de la même façon après avoir subies des contraintes d'intensité très différentes. ATTERBERG a défini, à partir d'essais conventionnels, quatre états de consistance des sols :

- l'état liquide,
- l'état plastique,
- l'état solide avec retrait,
- l'état solide sans retrait.



##### a) Limites de liquidité, ou $w_L$

Cette limite marque le passage de l'état plastique à l'état liquide. Au-delà de la limite de la liquidité, le sol se comporte comme un liquide et s'écoule sous son propre poids. La mesure de  $w_L$  est pratiquée sur une pâte en cours de dessiccation. On travaille sur des échantillons

remaniés, tamisés à 2 mm. Le  $w_L$  est déterminé au moyen d'une coupelle de volume connu tombant d'une hauteur donnée (1 cm) un certain nombre de fois. Conventionnellement,  $w_L$  est la teneur en eau, en %, qui correspond à la fermeture de la rainure de 2 mm sur 1 cm, en 25 chocs.

Les résultats obtenus sont donc relatifs à l'histoire hydrique appliquée au matériau, mais aussi à l'énergie mise en jeu, lors de ce test. Cette énergie cinétique peut s'exprimer comme suit :

$$E_c = \frac{P.n.h}{V}$$

P est le poids de l'échantillon porté à l'humidité voulue

n est le nombre de chute de la coupelle

h est la hauteur de chute

V est le volume total du matériau, 125 cm<sup>3</sup>

soit, 
$$E_c = \frac{1.25 \cdot 10^{-2}}{125 \cdot 10^{-6}} = 2 \text{ KJ/m}^3$$

b) La limite de plasticité, ou  $w_p$

La plasticité des sols peut se définir comme leur aptitude à se modeler. Cette aptitude est fonction de la nature et du taux d'argile. Les forces de masse deviennent, de ce fait, négligeables au côté des forces colloïdales qui confèrent aux sols argileux et limoneux argileux le pouvoir de subir des déformations importantes sans perdre leur cohérence et leur continuité.

Conventionnellement,  $w_p$  est la teneur en eau en deçà de laquelle un sol perd sa plasticité et commence à devenir friable. Pratiquement, ATTERBERG définit  $w_p$  comme atteint... lorsqu'on confectionne des rouleaux pleins de 3 mm de diamètre qui ne s'effritent pas en petits tronçons. La détermination de cette limite est donc basée sur le mode de rupture, par effritement, et le diamètre du rouleau à la rupture.

Il semblerait que l'effritement soit dû à une rupture par cisaillement et par traction. Dans un premier temps, on applique une rotation de contrainte en confectionnant le rouleau, ensuite les conditions d'essai sont bien plus à déformation contrôlée qu'à contraintes contrôlées.



Les déterminations des limites de liquidité et de plasticité sont couramment mesurées par les mécaniciens des sols ; cela en raison de la grande fidélité des résultats expérimentaux. La limite de plasticité dépend cependant d'appréciation plus ou moins subjectives de l'opérateur.

Les limites d'ATTERBERG restent difficilement interprétables d'un point de vue physique. On ne connaît généralement pas la densité du matériau aux deux états de liquidité et de plasticité. Nombreux sont les géotechniciens qui cherchent à établir des corrélations entre les limites d'ATTERBERG et certaines propriétés ou paramètres du sol pour en prédire le comportement. Or, il est gênant, voire dangereux, de prédire le comportement à partir des essais dont on ne connaît pas l'interprétation physique.

Il serait donc plus intéressant de pouvoir relier les limites d'ATTERBERG à un niveau d'énergie et de densité. A cet effet, FAURE (1978) a donné à ces limites une référence énergétique, ce qui permet de les placer sur la courbe Proctor.

c) Limite de retrait ou  $w_r$

$w_r$  marque le passage de l'état solide avec retrait à l'état solide sans retrait. Autrement dit, pour des teneurs en eau inférieures, le volume de l'échantillon reste constant pour une teneur en eau moindre, et s'accroît pour une teneur en eau supérieure.

Certains auteurs, étudiant les phénomènes de retrait, notent lors d'une dessiccation lente et continue, correspondant aux différents types d'eau liée quatre étapes successives (in MANOJLOVIC),

- retrait structural,
- retrait normal,
- retrait résiduel,
- "sans retrait".

d) Indice de plasticité,  $I_p$

$I_p$  correspond à la différence des limites de liquidité et de plasticité.  $I_p = w_L - w_p$ . Il définit le domaine de teneur en eau dans lequel se trouve le sol à l'état plastique.

Casagrande a montré qu'il existe, pour les sols américains, une relation de forme :  $I_p = aw_L - b$ , où  $a$  varie de 0,7 à 0,8 et  $b$  de 13 à 17.

e) Indice de consistance

Cet indice est défini par l'expression :

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p} ; w \text{ est la teneur en eau à l'état naturel.}$$

on considère que sa valeur est voisine de 0 pour les matériaux récents et proche de 1 pour des argiles en place.

L'activité des sols

Ce coefficient relie les limites d'ATTERBERG à la taille des constituants solides du sol.

Quand on porte en ordonnées l'indice de plasticité et en abscisses la fraction granulométrique  $< 2\mu\text{m}$ , on constate que les points s'alignent sur une droite passant par l'origine. SKEMPTON appelle la pente de cette droite "activité de l'argile" dont l'expression est :

$$I_A = \frac{I_p}{\% < 2 \mu\text{m}}$$

En fonction de la valeur de  $I_A$  on considère si

$I_A < 0,75$ , que l'argile est inactive (ex. kaolinite : 0,38)

$0,75 < I_A < 1,25$  que l'argile est normale (illite : 0,9)

$I_A > 1,25$ , que l'argile est active (montmorillonite Na : 7).

REMARQUE - L'indice de consistance  $I_c$ , tout comme l'activité des argiles, sont reliées à  $I_p$ . Or, comme l'a souligné FAURE (1978), la définition de  $I_c$  telle qu'elle a été formulée est critiquable, car elle prend en compte deux teneurs en eau caractérisées à des énergies différentes.

### 1.5. - Mesures de densités

Pour un sol en "équilibre" avec le milieu, on distingue l'espace poral textural défini par l'arrangement des grains solides de l'espace poral structural d'origine pédologique, biologique ou anthropique ou climatique. Cette distinction a permis à certains auteurs, dont MONNIER (1965) ; (FIES 1979), d'appeler porosité texturale, celle qui mesure les vides inéluctablement engendrés par l'assemblage des éléments sableux, limoneux et argileux, constitutifs d'un sol. La porosité structurale mesure l'espace poral résultant de la modification de l'arrangement textural par les facteurs externes : façons culturales, activité biologique, processus pédogénétiques...

L'espace poral totale d'un sol, constitué par les espaces poreux textural et structural, est mesuré par la porosité totale.

L'état de densification des sols influence entre autres la stabilité des ouvrages, les transferts des fluides, de la chaleur et la pénétration des racines. Nous développerons cet aspect au chapitre V.

La détermination des différents types de porosité nécessite des mesures des poids volumiques et densités tels :

- poids volumique humide ou  $\gamma_{d_w}$
- poids volumique sec ou  $\gamma_d$  (densité apparente)
- poids volumique des microagrégats secs ou  $\gamma_{dd}^T$
- poids volumique des microagrégats humides  $\gamma_{d}^T$
- densité solide  $\gamma_s$ .

#### a) Densité apparente sèche

Déterminer la densité apparente sèche revient à mesurer le volume d'encombrement occupé par un poids donné de matériau sec (105°C).

De nombreuses techniques permettent de mesurer le poids volumique ou densité apparente des sols. Selon les situations, on utilise la technique appropriée. Nous avons utilisé, pour nos propres mesures de densités apparentes, la méthode de mottes enrobées de cire et celle des anneaux. La première technique consiste à enrober de cire les mottes maintenues à l'humidité naturelle. On en mesure les poids avant et après enrobage, puis le volume par poussée d'Archimède dans l'eau. Connaissant le poids et la densité de la cire, la teneur en eau des mottes, on détermine la densité apparente du sol.

La méthode des anneaux consiste à enfoncer avec soin un cylindre dans le sol pour en prélever le volume équivalent de matériau du niveau à caractériser. Après séchage à 105°C, on obtient la densité apparente sèche

$$\gamma_d = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume}} \quad (\text{g/cm}^3).$$

#### b) Densités apparentes des microagrégats

Les poids volumiques des microagrégats ont été mesurés sur des éléments de dimension comprise entre 2 et 3 mm, tantôt humides et tantôt séchés à la température ambiante, soit  $\sim 22^\circ\text{C}$ . On estime qu'à cette taille on peut préserver une granulométrie représentative du matériau, tout en ayant une probabilité suffisamment grande pour éliminer les espaces poreux grossiers liés à l'activité biologique et à la macrofissuration (STENGEL 1979). Les microagrégats secs ont été obtenus par broyage ménagé et tamisage. Ils sont déposés par la suite pendant plusieurs heures dans le pétrole pour assurer le remplissage des pores. Après l'immersion, on ressuie les échantillons pour éliminer l'excès du pétrole autour des microagrégats (MONNIER 1973). Cette opération délicate, mais indispensable, est réalisée au moyen d'un papier filtre qui donne des résultats satisfaisants. On considère que le ressuyage est atteint lorsque la surface des microagrégats n'est plus brillante, mais mate. On procède à la mesure du volume des échantillons par pesée hydrostatique dans le même liquide, l'échantillon étant placé dans un panier.

Le choix du liquide utilisé se justifie par son affinité pour les produits terreux, sans en provoquer le gonflement et avec une faible perte de poids par évaporation.

La densité apparente sèche de ces échantillons s'exprime :

$$\gamma_{dd} = p \frac{d}{P - P_0} \quad \text{où}$$

p est le poids de l'échantillon sec

d est la densité du liquide ( $= f(\theta) \sim 0,780$ )

P<sub>0</sub> est la poussée enregistrée pour le panier seul

P est la poussée enregistrée pour le panier contenant l'échantillon.

### c) La densité solide

Le rapport du poids sec des particules solides à leur volume représente leur masse volumique  $\rho_s$ . Le rapport de celle-ci à la masse volumique de l'eau exprime la densité solide. Pour les sols naturels, constitués essentiellement de quartz, la valeur moyenne de  $\gamma_s$  est  $\sim 2,7$ . Nos mesures de densité solide ont été faites au moyen du pycnomètre à eau.

## 1.6. - Compactage Proctor

C'est à Proctor (USA) que l'on doit les premiers essais dans le domaine du compactage des sols. Il a examiné dès 1933 l'influence de la teneur en eau et de l'intensité de l'énergie sur le compactage des sols.

But : Le test Proctor permet de déterminer le comportement au compactage d'un sol dans une gamme d'humidités et pour un niveau donné d'énergie mise en jeu.

### a) Appareillage

La technique de compactage retenue est la méthode Peltier 1959. L'essai s'effectue dans un moule de 300 cm<sup>3</sup> maintenu fixé sur un support, puis prolongé dans sa partie supérieure par un anneau de remplissage. Le compactage est produit par une dame de 1 kg tombant un certain nombre de fois d'une hauteur déterminée.

b) Préparation des échantillons

On supprime, ou plus précisément, on atténue le plus possible, les différences d'histoire énergétique subies par les matériaux lors de leur mise en place ou acquise en leur appliquant une technique de préparation commune. Celle-ci consiste à les sécher à la température ambiante, puis on les broie pour obtenir des éléments de taille inférieure à 2 mm constitués de grains élémentaires et d'agrégats.

On prépare pour un même matériau, autant d'échantillons qu'il est nécessaire pour réaliser les déterminations aux différents % d'humidité. La courbe Proctor complète d'un matériau est obtenue avec 10 à 20 déterminations. Normalement 600 g de terre suffisent pour réaliser un échantillon. Cette terre est mélangée intimement et avec soin au % que l'on y introduit, puis on l'enferme hermétiquement dans un sac plastique au moins 72 heures avant le compactage.

Nous avons humecté nos échantillons de 2 à 30 % d'eau avec une progression arithmétique de 2, soit environ 12 échantillons par matériau.

c) Principe de compactage

On déverse dans le moule trois fois le tiers de son volume de terre préalablement préparée. Chacun des trois apports est soumis à 30 coups de dame de 1 kg tombant d'une hauteur de 20 cm, soit pour les 3 couches d'un même échantillon un total de 90 coups de dame. On ôte l'anneau de remplissage pour arroser à 300 cm<sup>3</sup>. La valeur de l'énergie développée s'élève à  $\frac{1.3.20.30}{300} = 6 \text{ Kgf/cm}^2$  soit 0,6 MJ/m<sup>3</sup>

Connaissant le poids humide de ce volume de terre, on la met à 100°C dans l'étuve jusqu'à poids constant.

$$\frac{\text{Poids sec}}{\text{volume}} = \text{Densité Proctor à une humidité donnée}$$

$$\text{Porosité Proctor} = \frac{\text{Densité réelle} - \text{densité Proctor}}{\text{Densité réelle}}$$

d) Courbe Proctor

Lorsqu'un matériau est compacté avec une énergie constante aux teneurs en eau croissantes de l'état sec à l'état "saturé" son comportement passe, généralement, par quatre phases différentes figurées sur la courbe :  $\gamma_d = f(w)$

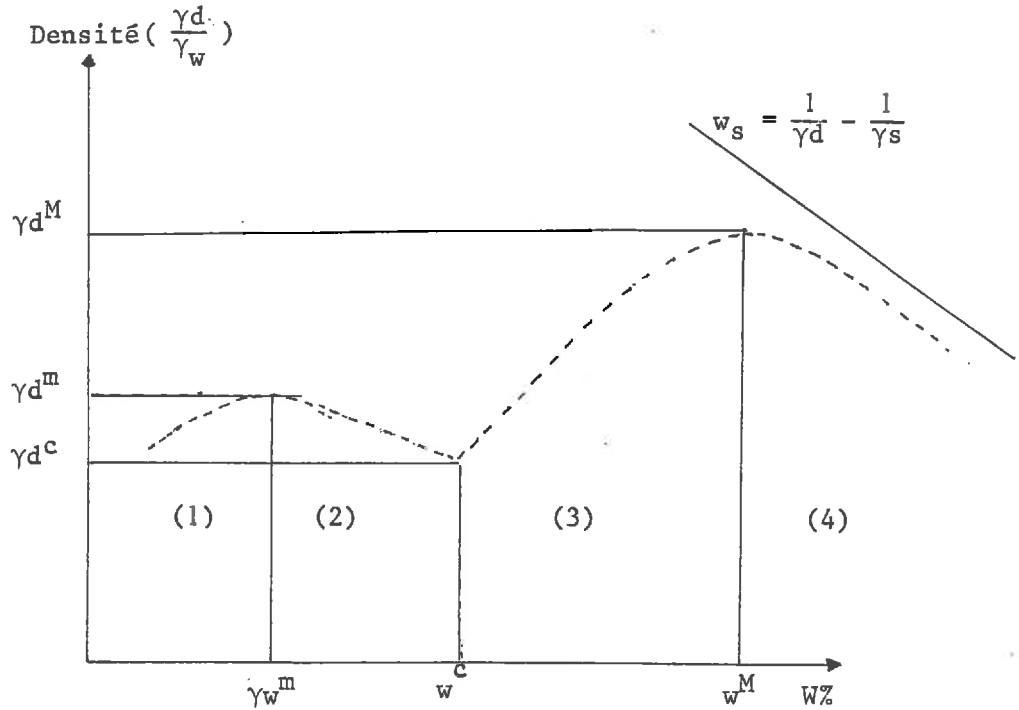


Fig.III.7. La courbe Proctor

- où :
- $\gamma_d^M$  est la densité maximale,
  - $w^M$  est la teneur en eau de  $\gamma_d^M$
  - $\gamma_d^m$  est la densité maximale de la 1ère partie de la courbe Proctor
  - $w^m$  est la teneur en eau de  $\gamma_d^m$
  - $\gamma_d^c$  et  $w^c$  (water critic) correspondent respectivement à la densité et à la teneur en eau du point de sensibilité au compactage.
  - $w_s$  : hyperbole de saturation.

### Phase 1

Aux faibles teneurs en eau (% à  $w^m$ ) l'accroissement de la compacité engendrée par le compactage est dû en fait à un concassage des éléments structuraux dont la fragilité augmente avec la teneur en eau.

### Phase 2

Au-delà de la limite de retrait des agrégats, le gonflement des particules argileuses libérées de la structure des agrégats commence à se manifester. Il en résulte une diminution de la compacité par l'augmentation de la pression du gonflement des phyllites. Celle-ci dépend non seulement du type de matériau présent, mais aussi de la nature des cations présents et des contraintes subies par le matériau. Ce phénomène est d'autant plus sensible que la teneur en argile gonflante est importante (FAURE, 1978).

### Phase 3

Cette diminution de compacité s'arrête quand l'argile atteint sa limite de plasticité relative à l'énergie de compactage. La teneur en eau correspondante  $w_c$  (water critic), est appelée seuil hydrique de sensibilité au compactage. Au-delà de cette limite, la déformabilité de l'argile lui confère un rôle de lubrifiant vis-à-vis des constituants de sol incompressibles. Cette lubrification dont l'action est opposée à celle du gonflement, contribue à un accroissement très sensible de la compacité. A ce niveau, l'humidification diminue la cohésion due à la capillarité et favorise aussi le compactage en permettant des glissements entre particules et grains solides.

### Phase 4

Quand l'argile atteint sa limite de liquidité, le matériau est généralement saturé, excepté quand le pourcentage de l'argile est très faible. Au-delà de cette limite le matériau est incompressible ; la courbe Proctor tend asymptotiquement vers l'hyperbole de saturation d'équation :

$$w_{\text{sat}} = \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} . \text{ Les essais avec drainage (oedomètre) réalisés par}$$

IKLER (1969) et FAURE (1978) font apparaître que la courbe Proctor se confond avec l'hyperbole de saturation à  $\gamma_d^M$ . Il apparaît que les sols contenant une fraction notable d'éléments phylliteux ont leur



comportement profondément influencé par les propriétés de la fraction argileuse. Dans de tels sols, compactés à une teneur en eau peu élevée, les forces d'attraction interparticules colloïdales prédominent et conduisent à une structure dite floculée (LAMBE, 1958), où les particules d'argile forment entre elles des angles importants. Quand la teneur en eau augmente, les forces de répulsion interparticulaires tendent à augmenter, la structure ainsi acquise sera dispersée. Dans ce cas, les particules sont orientées avec un degré de parallélisme important.

## 2. - IDENTIFICATION DES MINÉRAUX ARGILEUX AUX RAYONS X

L'identification de minéraux argileux s'avère particulièrement intéressante, car leurs propriétés physico-chimiques (gonflement-retrait, capacité d'échange) sont à la base des comportements rhéologiques des sols. La détermination des minéraux argileux est basée sur le comportement de la distance réticulaire (001) à des traitements spécifiques. La fraction granulométrique inférieure à  $2\mu\text{m}$  des matériaux originels saturés au magnésium et au potassium, ont été soumis à des traitements à l'éthylène-glycol et au chauffage à  $250^{\circ}\text{C}$ , puis  $450^{\circ}\text{C}$ .

## IV - CARACTERISTIQUES GÉOTECHNIQUES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES DU SUNDGAU

### INTRODUCTION

La compréhension du comportement des sols et la prévision des réactions des matériaux destinés aux travaux géotechniques nécessitent la détermination des propriétés physiques et mécaniques des formations géologiques et pédologiques de la région à aménager.

La méthode d'étude des sols choisie est fonction de l'objectif poursuivi. Aussi, à l'inverse des agronomes, les géotechniciens, intéressés par la partie des sols pauvre en matière organique et moins perturbée par l'activité biologique, découpent-ils les sols sur au moins les trente premiers centimètres (terre végétale) qui présentent des caractéristiques qu'ils redoutent et contrôlent mal. Les ouvrages du Génie Civil peuvent provoquer des réactions de la part des couches qui les supportent directement, et aussi, à plus ou moins long terme, de la part des couches plus profondes.

C'est entre autre pour cette raison que nous avons effectué les prélèvements destinés à l'étude géotechnique sur des matériaux se rapprochant le plus de la roche-mère.

Les paramètres et les propriétés du sol conditionnant sa portance et son tassement sont la constitution physico-minéralogique, la teneur en eau, la densité, la plasticité, la cohésion et l'angle de frottement interne. L'aptitude d'un sol à servir d'assise aux ouvrages géotechniques est aussi fonction de la pente, de la profondeur de la roche-mère, de la pierrosité, et de l'engorgement du sol.

Dans le périmètre qui nous intéresse, les formations que nous avons rencontrées lors de la prospection pédologique englobent les marnes de l'Oligocène, les cailloutis du Sundgau Villafranchiens et les divers limons quaternaires (Chap. I, carte hors texte 1).

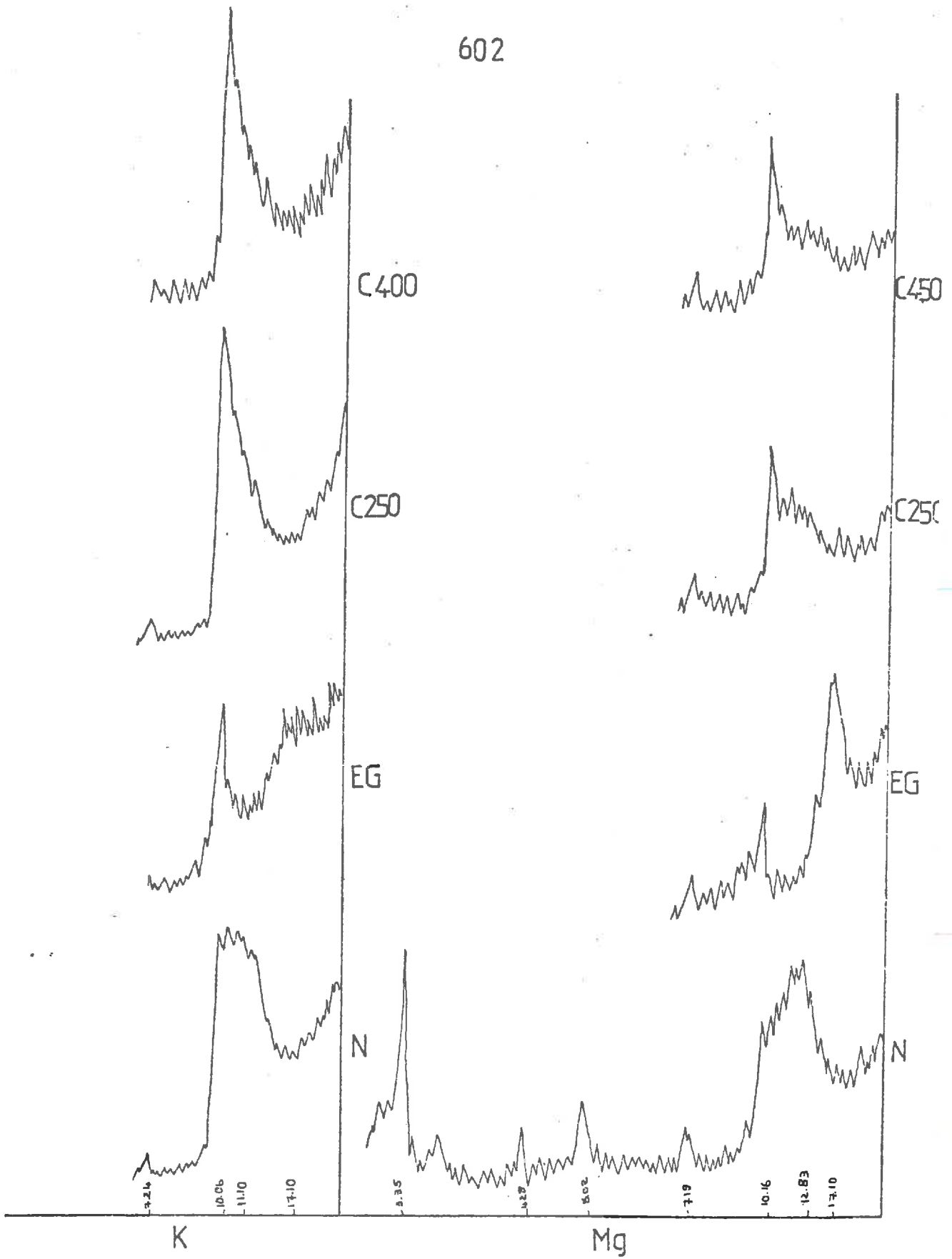


Fig. IV.1. diagramme rayons x des marnes

Bien qu'ils présentent des intérêts indéniables, aussi bien agronomiques que géotechniques, nous laisserons de côté les cailloutis. Pour chacune des autres formations, nous présenterons les caractéristiques géotechniques les plus couramment déterminées pour juger de l'aptitude des formations à supporter les ouvrages. Le but de l'étude n'étant pas l'approfondissement d'un paramètre mécanique particulier, nous travaillerons sur les valeurs moyennes des caractéristiques physiques et mécaniques. Cette façon de procéder nous semble présenter davantage d'intérêt pour les aménageurs de l'espace. Ces moyennes prennent en compte les résultats obtenus au cours d'une étude réalisée par la C.N.R. (Compagnie Nationale du Rhône).

## 1. - CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES MARNES DE L'OLIGOCENE

### 1.1. - Nature chimique de la fraction < 2 $\mu$ m

L'analyse des diagrammes de rayons X montre que ce matériau est caractérisé par la dominance d'un interstratifié Illite/smectite, avec une expansion à 17 A après le traitement K. L'illite représente environ 30 % des argiles alors que la kaolinite n'est qu'en faible quantité (5 %) Fig. IV.2. Les photos 1 et 2 annexe IV montrent la forme des particules argileuses de ce matériau.

### 1.2. - Paramètres physiques

#### a) Granulométrie

La granulométrie de cette formation fait apparaître plusieurs classes dont l'hétérogénéité est fonction de son degré de contamination par les sables et les grès. Les passages sableux peuvent contenir moins 1 % d'argiles, alors que celle-ci peut dépasser 60 % en leurs absences. (Fig. IV.2).

Cette formation est toujours carbonatée. La teneur en carbonate de calcium oscille entre 26 et 60,6 %. La moyenne obtenue sur 11 échantillons s'élève à 35,2 %.

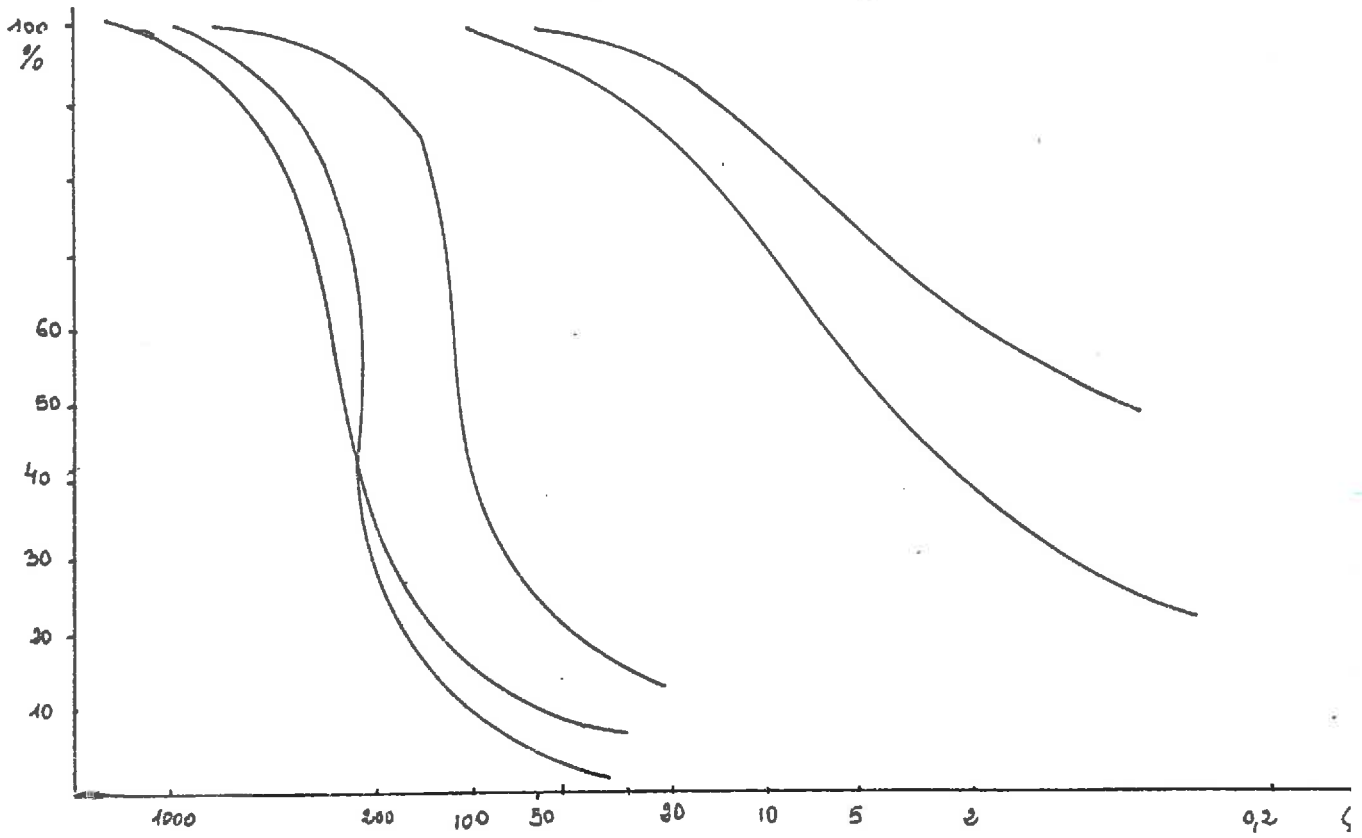


Fig. IV.2. Courbes granulométriques des marnes.

b) Teneur en eau à l'état naturel

La teneur en eau de cette formation varie avec la profondeur, avec le degré de compacité du matériau et sa constitution physique. La moyenne pour 85 échantillons est 18,1 % avec un écart-type de 5,9. Les échantillons sont généralement saturés ( $S_r^* > 90 \%$ ).

c) Compacité

Quand il est homogène, ce matériau est très compact, exception faite de sa partie supérieure lorsqu'elle est altérée. Localement, le matériau présente des microfissures et, de ce fait, une moindre compacité. Le plus souvent, ces fissures sont tapissées de "silt". La densité de ce matériau augmente avec la profondeur de la formation.

Il en résulte un poids spécifique variable selon la profondeur de prélèvement, son degré d'altération, de fissuration et selon l'importance de la contamination par d'autres formations.

Nombre d'échantillons		Moyenne	Ecart - type	Unité
Teneur en eau	85	18,1	5,89	%
Poids volumique sec (densité apparente)	87	1,82	0,20	g/cm <sup>3</sup>
Poids volumique humide	87	2,13	0,14	g/cm <sup>3</sup>
Densité réelle	8	2,73	0,015	-

TABLEAU IV.1 Récapitulatif des caractéristiques physiques des marnes.

On peut remarquer que la densité apparente sèche est élevée en moyenne ; il en résulte une porosité moyenne de 33,3 %. Dans les passages sableux, la densité apparente peut descendre à 1,21 g/cm<sup>3</sup>.

---

\* Degré de saturation  $S_r = \frac{\text{Volume de l'eau}}{\text{Volume des vides}}$

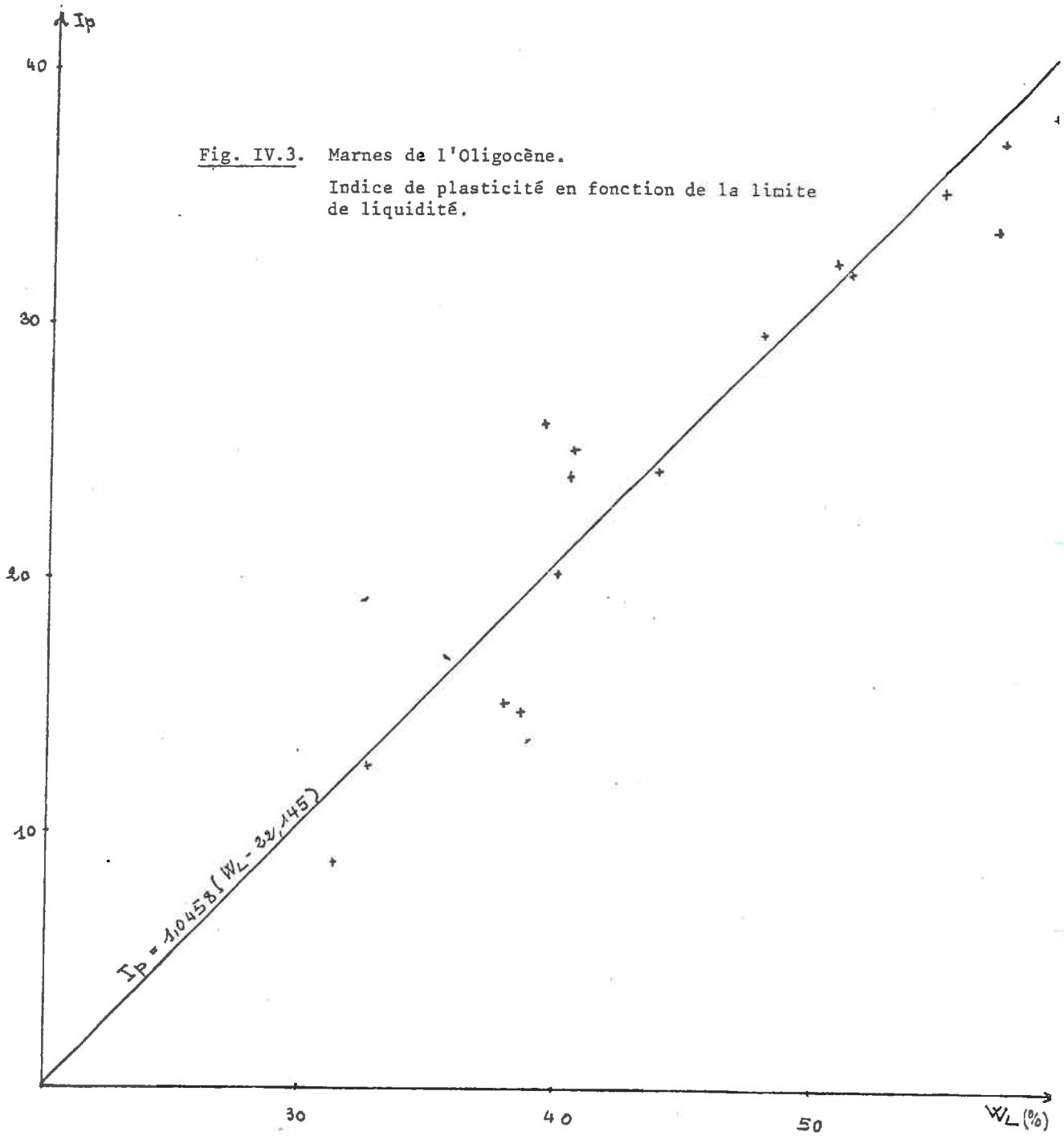


Fig. IV.3. Marnes de l'Oligocène.  
Indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité.

1.3. - Caractéristiques mécaniques

a) Limites d'ATTERBERG

Ce test, très couramment utilisé, permet d'apprécier la consistance d'un sol en fonction de la teneur en eau. Les valeurs obtenues à partir de ce matériau sont exposées au tableau IV.2.

Limites d'ATTERBERG	Nombre d'échantillons	Moyenne	Ecart type	Unité
Limite de liquidité ( $w_L$ )	14	46,4	8,72	%
Limite de plasticité ( $w_p$ )	14	19,8	2,55	%
Indice de plasticité ( $I_p$ )	14	26,6	9,17	%
Indice de consistance ( $I_c$ )	12	0,98	0,3	-

TABLEAU IV.2

D'après la classification de Casagrande, ce matériau est une argile minérale de moyenne à forte plasticité. Quand nous portons les valeurs de  $I_p$  en fonction de  $w_L$  (Figure IV.3.), nous constatons que les points s'alignent approximativement suivant la droite d'équation :

$$I_p = 1,046 (w_L - 22,15) ; (r = 0,96).$$

L'indice de consistance de ce matériau ( $0,9 < I_c < 1,4$ ) correspond à une consistance ferme à très ferme.

L'échantillon que nous avons retenu pour nos propres essais présente les caractéristiques suivantes :

PARAMETRES PHYSIQUES							Ca CO <sub>3</sub> tot.	PARAMETRES MECANIQUES			
A %	LF %	LG %	S %	$\gamma_d$	$\gamma_s$	nT	%	$w_L$	$w_p$	$I_p$	Activité
41,4	43,9	10,5	4,5	1,76	2,77	0,36	31,4 %	43,5	23	20,5	0,50

TABLEAU IV.3



c) Essais triaxiaux

Les caractéristiques mécaniques interangulaires déduites des essais triaxiaux consolidés, drainés, effectués sur des échantillons marneux prélevés à des profondeurs allant de 1 à 26 m, se présentent en moyenne comme suit :

	Nb d'échantillons	Moyenne
Cohésion C'	6	0,25
Angle de frottement $\varphi'$	6	32

TABLEAU IV.4

Les graphiques de  $(\sigma_1 - \sigma_3) = f\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^*$ , et les cercles de Mohr sont regroupés en annexe IV.

d) Oedomètre

Des essais oedométriques réalisés sur un échantillon prélevé à une profondeur de 4,65 à 5,15 m donne un coefficient de compressibilité  $C_c$  de 0,08 ( $C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \text{Log} \sigma}$ ), avec une pression de préconsolidation de  $4 \cdot 10^2$  KPa. Le coefficient obtenu nous semble très faible et caractérise un matériau peu compressible.

Profondeurs (m)	w %	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	e	Pc (10 <sup>2</sup> KPa.)	C <sub>c</sub>
4,65	23,80	1,64	0,67	4	0,08

TABLEAU IV.5

Caractéristiques de l'échantillon étudié :

w = teneur en eau lors du prélèvement

$\gamma_d$  = densité apparente

e = Indice des vides

---

$\frac{\Delta L}{L}$  représente la variation de la hauteur de l'échantillon contraint par rapport à sa hauteur initiale.

e) Proctor

Les essais Proctor effectués sur un matériau ayant un  $I_p$  de 20,5 donnent les valeurs suivantes :

- Densité au maximum Proctor : 1,66.
- Teneur en eau du maximum Proctor : 22 %.

Trois essais Proctor normaux, entrepris par la CNR sur matériaux, donnent les valeurs suivantes :

Echantillons	$w^{M*}$ %	$\gamma_d^{M**}$	$I_p$ %	$w_L$ %
P 362	17,4	1,77	24,0	40,3
P 304	18,9	1,66	34,3	55,5
P 302	20,7	1,62	39,6	64,5
Moyenne	19,0	1,68	32,6	53,4

TABLEAU IV.6

1.4. - Problèmes géotechniques des marnes

Avant l'utilisation en remblai, il sera nécessaire de procéder à une fragmentation poussée du matériau pour éviter d'avoir un remblai qui, tout en ayant une compacité moyenne acceptable, serait hétérogène. Un tel remblai pourrait évoluer dans le temps par désagrégation des mottes en une structure plus ou moins ouverte.

Localement, cette formation est microfissurée. Ces fissures, souvent tapissées de "silt" ou de sable, pourraient avoir un comportement hydrique et mécanique différent de ceux des niveaux où la marne est compacte de manière homogène.

---

\* Teneur en eau de l'optimum Proctor.

\*\* Densité du maximum Proctor.

Les résultats Proctor et ceux présentés en 1.2c permettent de constater que la densité apparente naturelle est nettement supérieure à celle engendrée par le procédé Proctor. Les contraintes de préconsolidation subies par le matériau à un moment donné de son histoire paraissent élevées.

Comme le laissent prévoir les résultats d'essais mécaniques, la fissuration, ainsi que les passages gréseux et sableux, constituent des hétérogénéités dans le matériau marneux, qui à plus ou moins long terme, peuvent donner lieu aux tassements différentiels ils portent des ouvrages lourds. De fait, quand cette formation apparaît en surface sur pente, on aperçoit généralement des mouvements de terrain sous forme de "loupes" de glissement (photos 7 et 8 annexe IV). Ceci constitue un risque important pour la stabilité des ouvrages.

Plus au nord du périmètre, on a constaté que les marnes renferment une proportion non négligeable de poches de gypse, souvent évidées par dissolution (Ecluse de Brunstatt, entre 26,35 et 26,90 m de profondeur). On peut donc craindre l'existence ailleurs de ces mêmes poches, car elles représentent un grand risque géotechnique.

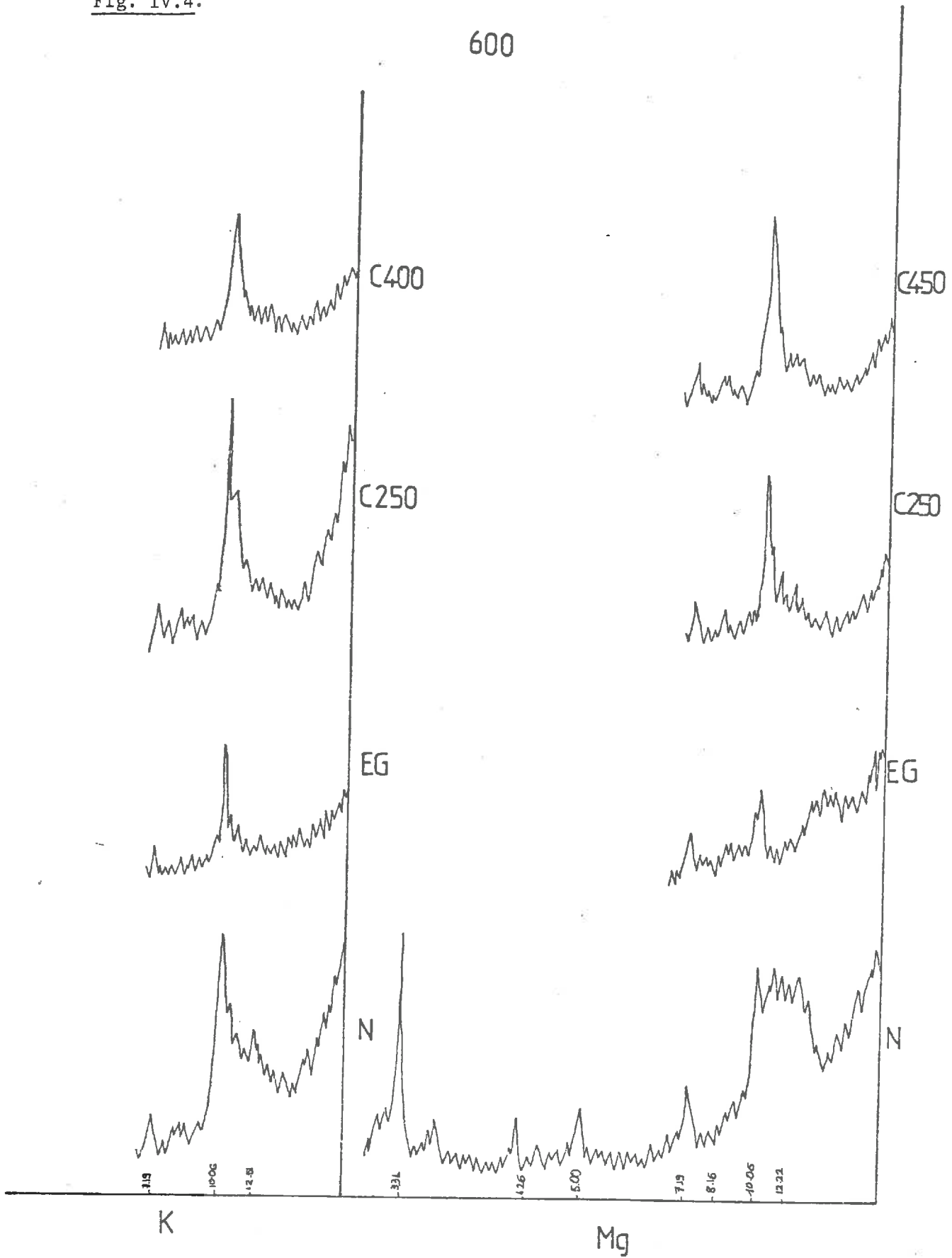
Pour toutes ces raisons, il nous semble préférable d'éviter des constructions lourdes sur ces formations ou de les utiliser en tant que matériau routier.

## 2. - CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES LEHMS ANCIENS

### 2.1. - Nature minéralogique de la fraction < 2 $\mu$ m

L'examen des différents diffractogrammes obtenus à partir de l'analyse aux rayons X révèle que la fraction caractérisée est constituée essentiellement d'illite et d'interstratifié (10/14Å) expansibles. Les interstratifiés présents sont plutôt type illite/vermiculite de basse charge, ou smectite de transformation. En effet, l'argile saturée par du potassium se ferme à 10Å et n'est plus expansible à l'éthylène glycol. Secondairement, on y trouve de la kaolinite (en faible quantité) et du quartz (Fig. IV.4).

Fig. IV.4.



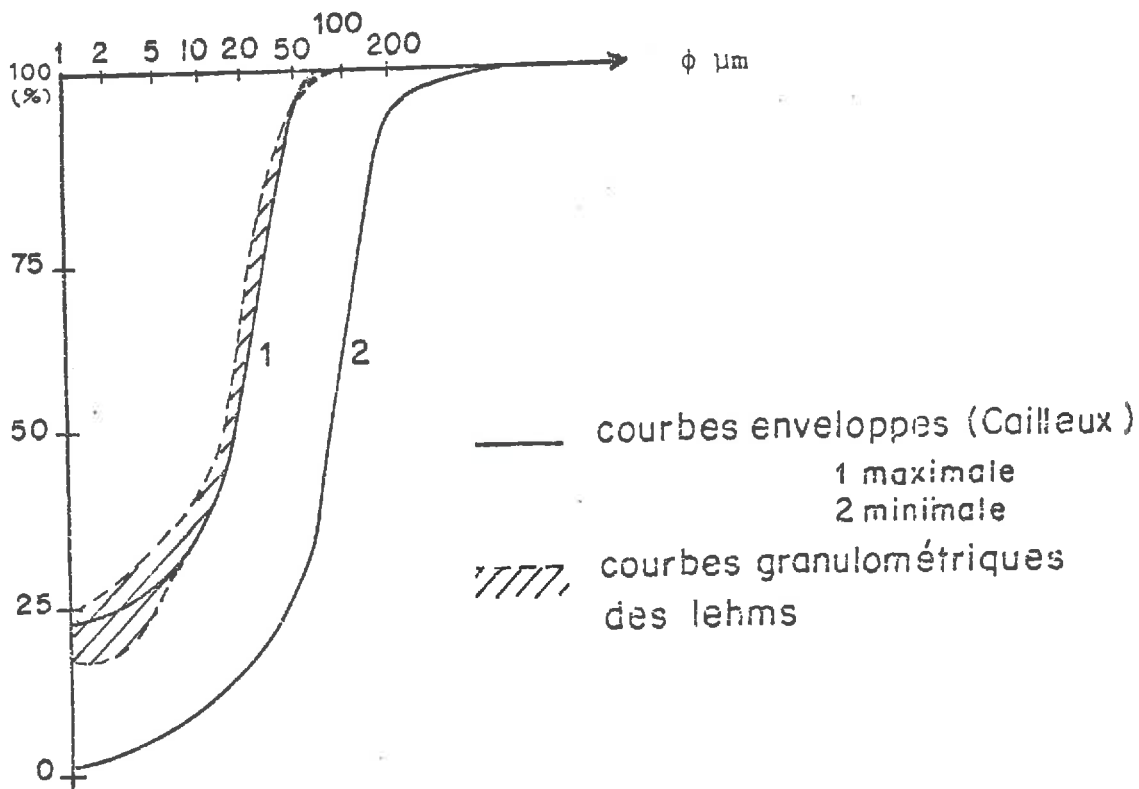
La photo 3 (annexe IV) montre les formes des particules vues au microscope électronique.

## 2.2. - Paramètres physiques

### a) Granulométrie

Les résultats d'analyses sédimentologiques montrent que la granulométrie des lehms est très homogène. Plus de 93 % des grains ont une dimension inférieure à 50  $\mu\text{m}$ . La fraction argileuse inférieure à 2  $\mu\text{m}$  est en moyenne de 19,7 % (9 échantillons). Les valeurs extrêmes étant 17,0 et 24,6 %. La proportion d'éléments supérieurs à 50  $\mu\text{m}$  est de l'ordre de 6 %. Le rapport limon grossier sur limon fin (L.G./L.F.) égale 0,67.

Les courbes cumulatives des lehms dessinent une sigmoïde très redressée entre 2 et 50  $\mu\text{m}$ . La "concentration granulométrique" dans la classe des limons montre qu'il s'agit d'une population homogène transportée très probablement par un même agent sélectif. Comparée aux "courbes enveloppes" de CAILLEUX (1953), on constate que celles des lehms s'en écartent très peu et sont plus proches de la courbe maximale que de la minimale (Fig. IV.5) :



b) Minéraux lourds

Le comptage de minéraux lourds obtenus sur les fractions granulométriques sableuses et surtout limoneuses apportent quelques précisions sur la nature et l'origine des lehms anciens.

La teneur pondérale des différents minéraux lourds varie entre 0,20 et 2,78. Ils sont essentiellement constitués de zircon, d'épidote, de tourmaline et de minéraux de métamorphisme. A l'état de trace on observe deux groupes de minéraux :

- Ceux du métamorphisme alpin : glaucophane et chloritoïde, qui sont présents dans le cailloutis du Sundgau déposé par le Rhin (BONVALOT J. 1974).
- Ceux qui pourraient témoigner d'un apport éolien, telle l'augite aciculaire. On y décèle un fort pourcentage de minéraux opaques, dont au moins 50 % sont de l'hématite sous forme de baguettes.

Localement, on peut observer, en plus ou moins grande quantité, des sphènes et de la hornblende verte.

L'observation à la loupe binoculaire du quartz révèle environ 50 % de N.U. et 50 % de E.L. Ceci témoigne d'une faible usure mécanique et permet d'envisager un transport éolien.

c) Compacité

Le poids volumique ou densité apparente,  $\gamma_d$ , est en moyenne de 1,66 g/cm<sup>3</sup>. Les valeurs extrêmes étant 1,34 et 1,84 g/cm<sup>3</sup>. La densité solide,  $\gamma_s$ , est en moyenne 2,71 (6 échantillons). La porosité totale (nT) égale 39,11 %.

Comme nous l'avons précisé précédemment, ce matériau est généralement très compact. Cette compacité ne peut être expliquée par l'activité de l'homme, car l'équipement agricole actuellement utilisé n'est pas assez lourd pour engendrer une telle compacité. D'ailleurs, la profondeur concernée échappe aux pressions pouvant éventuellement être exercées par le matériel agricole.

D'autres hypothèses peuvent être proposées. Une des thèses fréquemment admise consiste à expliquer la compacité des lehms par les phénomènes de gel liés à un contexte périglaciaire. Nous émettons également l'hypothèse selon laquelle, la densification serait amorcée par le départ d'éventuels carbonates de calcium suivi d'une mobilisation puis d'un réarrangement de l'argile et des particules les plus fines qui viendraient combler les vides laissés par le départ des carbonates de calcium. Ce processus de densification serait facilité par la constitution physico-minérale de ce matériau. Les deux hypothèses retenues ne s'excluent pas.

### 2.3. - Caractéristiques mécaniques

#### a) Limites d'ATTERBERG

Les limites d'ATTERBERG  $w_L$ ,  $w_p$ ,  $I_p$  déterminées sur les matériaux lehmiques, donnent les valeurs suivantes :

- $w_L$  37,3 %
- $w_p$  19,4 %
- $I_p$  17,9 %
- $I_c$  0,8 %.

#### b) Essais triaxiaux

Les caractéristiques mécaniques interangulaires déterminées par des essais triaxiaux consolidés, drainés, (à partir des échantillons prélevés à des profondeurs de : 0,70 à 1,30 m pour l'un et 0,90 à 1,40 m pour l'autre), sont les suivantes :

$c'(10^2 \text{ KPa.})$	0,2	0,25
$\varphi'$	29	25

c) Oedomètre

Pc(10 <sup>2</sup> KPa.)	C <sub>c</sub>	w <sub>L</sub>
3,5	0,14	44,8
4	0,13	38,6

Les résultats à partir des deux essais oedométriques montrent que la corrélation proposée par SKEMPTON :  $C_c = 0,007 (w_L - 10)$  est supérieure à celles déterminées expérimentalement. Ce matériau semble plus compressible que la marne.

d) Proctor

Compacté à une énergie de 0,6 MJ/m<sup>3</sup>, ce matériau a une densité ( $\gamma_d^C$ ) à l'humidité critique ( $w^C$ ) de 1,56 pour une teneur en eau de 6,1 %. La densité au maximum Proctor  $\gamma_d^M = 1,74$  et sa teneur en eau = 17,5 %.

2.4. - Problème géotechnique des lehms anciens

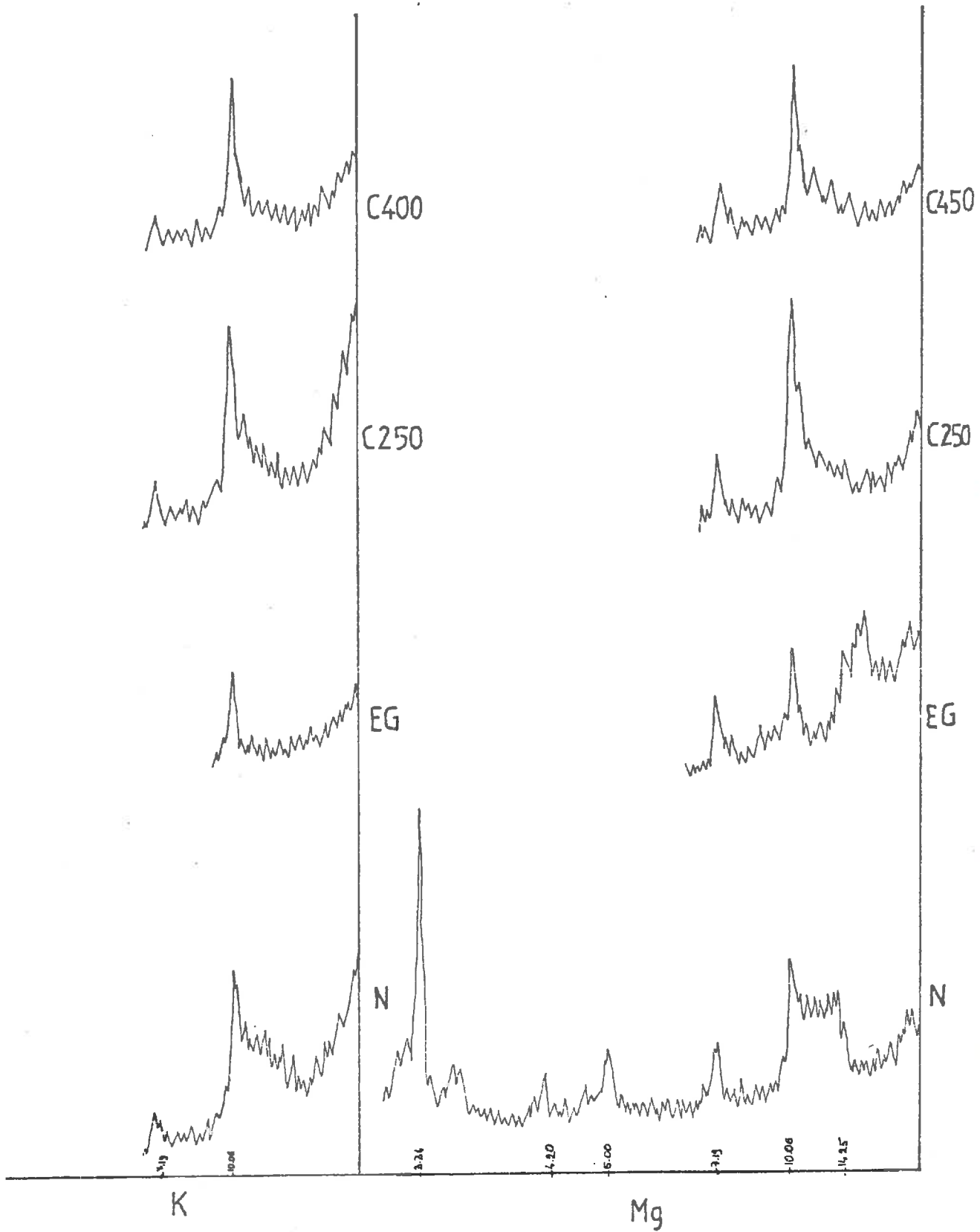
Si la compacité naturelle de ce matériau est généralement satisfaisante d'un point de vue géotechnique, la circulation de l'eau s'en trouve limitée. Il faudra donc éviter l'utilisation de ce matériau pour des ouvrages sur des terrains en dépression ou en position de drainage externe limité, à moins de recourir à un drainage préalable à la mise en place de l'ouvrage. Les résultats obtenus au moyen du test Proctor montrent que ce matériau entre en phase de compacité en des teneurs en eau assez basses (6,1 %). On pourrait donc s'attendre à une densification de la partie superficielle de cette formation si elle était soumise à des pressions du même ordre que celles développées par le test Proctor.

La présence des veines déferrisées pourrait constituer des plans de glissement préférentiels dans ce type de formation. Par conséquent, on peut redouter la rupture d'un tel sol s'il est sollicité surtout en position de pente.



Fig. IV.6. Diagramme rayons X des vieux loess.

601



### 3. - CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES VIEUX LOESS

Nous avons vu au chapitre I que cette formation a été rencontrée au centre du périmètre d'étude, autour de la ligne d'isohyète 900 mm.

#### 3.1. - Nature minéralogique de la fraction inférieure à 2 $\mu\text{m}$

L'examen des diagrammes après les divers traitements (Fig. IV.6. ) montre que ce matériau renferme un mélange d'argile constitué par de l'illite et des interstratifiés. Ces derniers paraissent semblables à ceux du matériau lehmique. La fraction granulométrique analysée renferme également un peu de kaolinite ( $\sim 5\%$ ) et du quartz. La photo 4 (annexe IV) rend compte de la forme des particules constitutives de ce matériau.

#### 3.2. - Paramètres physiques

##### a) Granulométrie

Le pourcentage des particules de dimension supérieure à  $50\mu\text{m}$  n'excède pas  $2,7\%$ .  $57,3\%$  des particules sont de taille inférieure à  $20\mu\text{m}$ .  $17,7\%$  d'entre elles sont inférieures à  $2\mu\text{m}$ . Le rapport limon grossier/limon fin est en moyenne de  $0,86$ . Comparée aux "courbes enveloppes" de CAILLEUX, la courbe des vieux loess y est partiellement incluse, mais reste très proche de la courbe maximale (Fig. IV.7). L'allure de la courbe est sigmoïde et paraît redressée entre  $10$  et  $50\mu\text{m}$ .

Resitué dans le diagramme textural, ce matériau appartient à la classe LA, mais reste très proche de la classe LM. D'un point de vue granulométrique, ce matériau est assez proche des lehms.

La teneur moyenne en carbonate de calcium est de  $8\%$ .

##### b) Teneur en eau des échantillons prélevés

Lors de leur prélèvement, la teneur en eau moyenne des échantillons est de  $25\%$  d'eau pondérale. Celle-ci augmente avec la profondeur du sol. (Exception faite pour les périodes pluvieuses où l'effet inverse est observé jusqu'à la "zone" d'influence de la nappe phréatique).

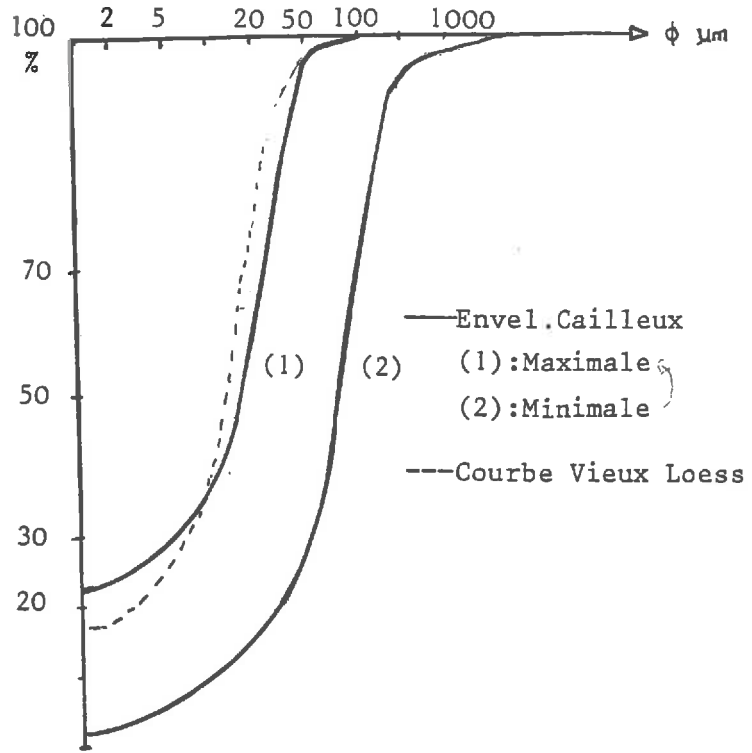


Fig. IV.7.

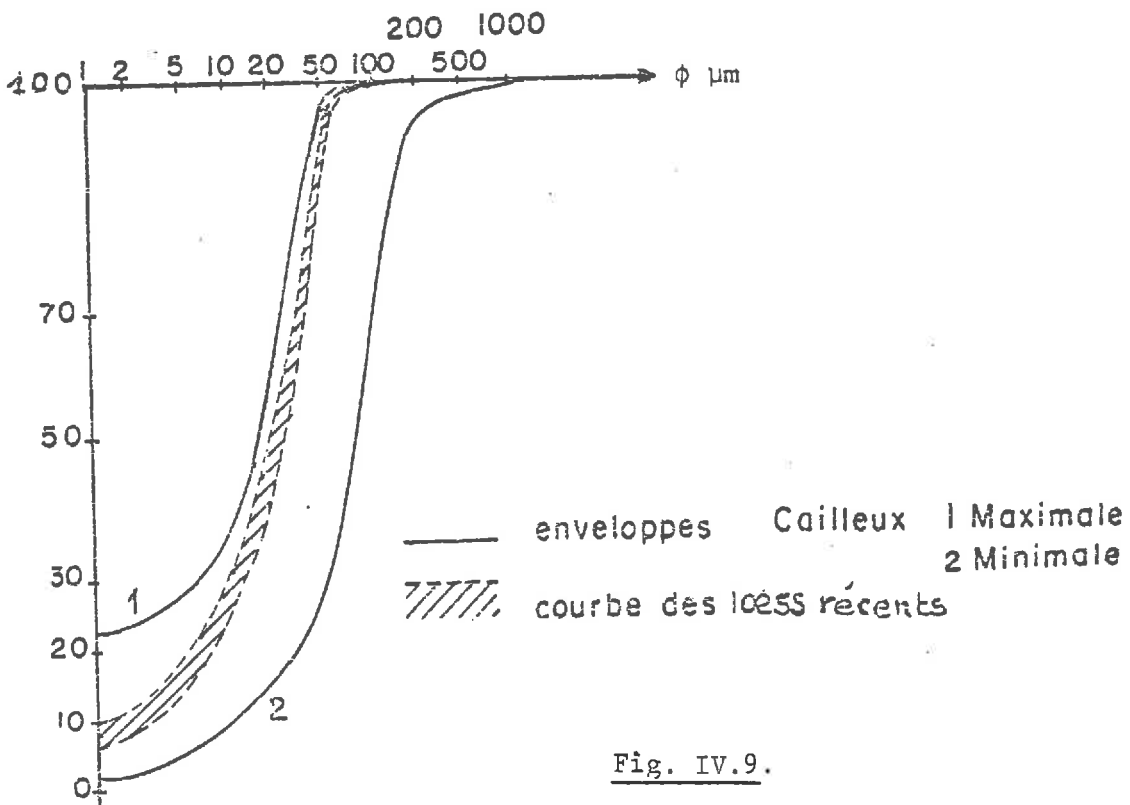


Fig. IV.9.

c) Compacité

Le poids volumique (ou densité apparente) moyen est égal à  $1,63 \text{ g/cm}^3$ . La densité solide,  $\gamma_s$ , égale à 2,76, la porosité totale  $n_T = 40,94 \%$ , l'indice des vides correspondant  $e = 69,3$ .

3.3. - Caractéristiques mécaniques

Etant donné que ce matériau ne recouvre pas des surfaces continues suffisamment grandes pour justifier la gamme complète des essais mécaniques, seules les limites d'ATTERBERG et les tests Proctor ont été effectués.

a) Limites d'ATTERBERG

Les valeurs obtenues à partir de ce test montrent que ce matériau se place dans l'abaque de Casagrande parmi les argiles minérales à faible plasticité ( $w_L = 28,3 \%$ ,  $w_p = 19,3 \%$  ;  $I_p = 9$ ). L'indice d'activité de l'argile égale 0,51. On peut, par conséquent, considérer que ce sol est inactif.

b) Le test Proctor

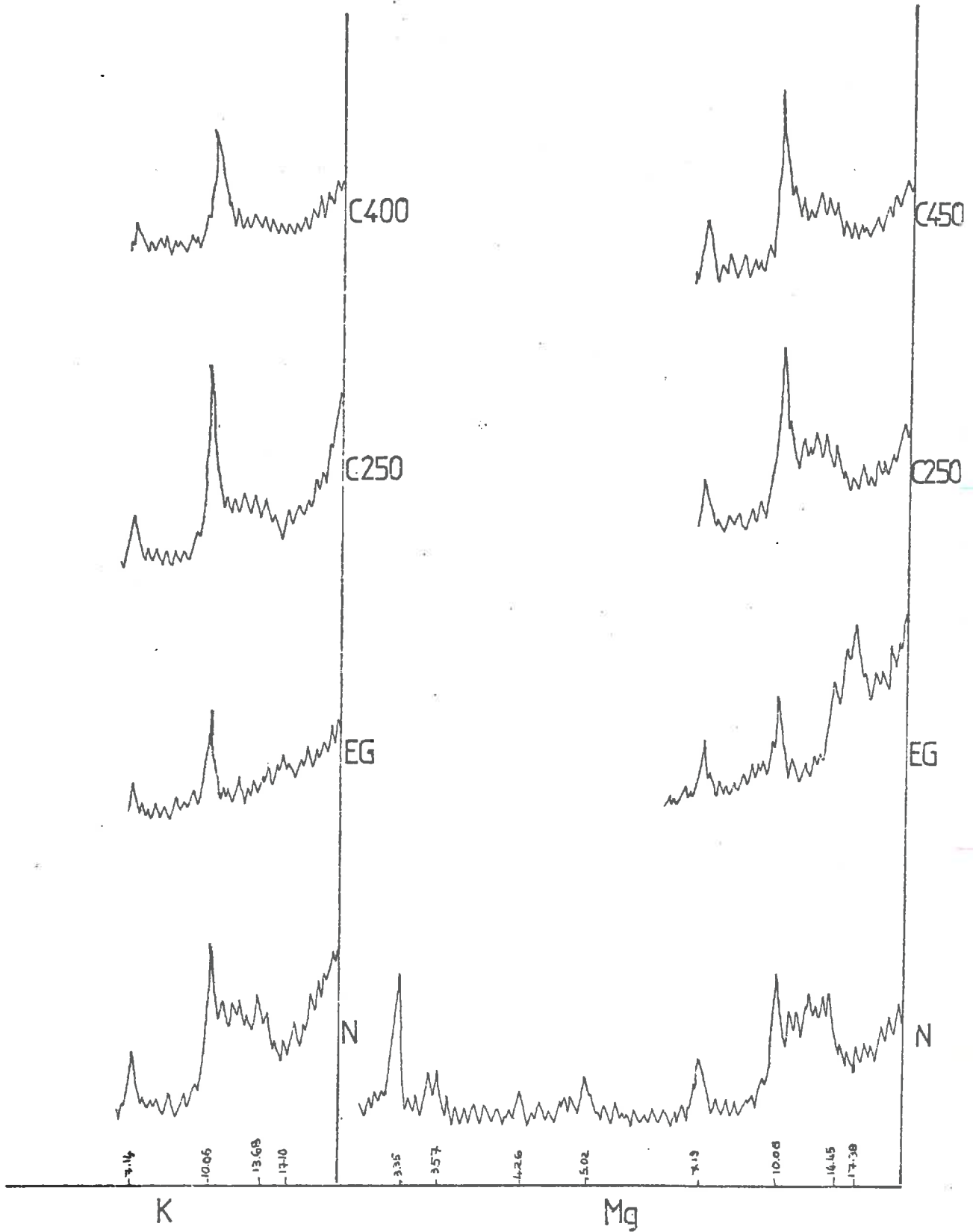
Pour une énergie de compactage de  $0,6 \text{ MJ/m}^3$  l'entrée en compacité de ce matériau commence à partir d'une teneur en eau de 7,15 %. La densité maximale ( $\gamma_d^M = 1,73$ ) a été atteinte pour une teneur en eau de 18,0 %. Ces résultats montrent que ce matériau commence à se compacte pour les teneurs en eau supérieures à celles des lehms.  $\gamma_d^M$  étant par ailleurs sensiblement du même ordre de grandeur pour les deux formations.

4. - LOESS RECENTS

Ce loess diffère du précédent par sa teinte plus grisâtre, sa faible résistance à la pression exercée par les doigts, sa teneur plus importante en carbonates de calcium, par une moindre teneur en argiles et par un rapport  $\frac{L_G}{L_F}$  plus élevé. Ce matériau, largement répandu dans la partie est du périmètre, peut atteindre les 10 m d'épaisseur.

Fig. IV.8.

603



#### 4.1. - Nature minéralogique de la fraction inférieure à 2 $\mu\text{m}$ (Fig. IV.8)

Cette fraction granulométrique renferme un mélange d'argile constitué par l'illite et des interstratifiés non gonflants. La kaolinite est, ici aussi, en faible quantité. La photo 5 (annexe IV) montre que les argiles constitutives de ce matériau ont une forme plate ("en strate").

#### 4.2. - Caractéristiques physiques

##### a) Granulométrie

La teneur moyenne en argile ( $< 2 \mu\text{m}$ ) de 12 échantillons prélevés entre 1,20 et 2 m est 11,0 % avec un écart type de 1,8. Les valeurs extrêmes étant 8,1 et 13,9 %. 51,8 % des particules ont une dimension inférieure à 20  $\mu\text{m}$  et 97 % sont inférieures à 50  $\mu\text{m}$ . On peut par conséquent, parler d'une population granulométrique très monogène. Le rapport limon grossier au limon fin égale en moyenne 1,19. Il dépasse généralement l'unité et semblerait indiquer :

- soit une fragmentation moins poussée des quartz en particules plus fines,
- soit un mode de tri différent des autres limons.

La première alternative nous semble plus plausible.

Les courbes granulométriques s'incluent parfaitement dans le faisceau délimité par les courbes enveloppes de CAILLEUX (Fig. IV.9.) ce qui appuie l'hypothèse éolienne.

La teneur moyenne en carbonates de calcium est 30,0 %.

##### b) Minéraux lourds

L'étude des minéraux lourds contenus dans les limons et sables n'a pas donné des résultats très significatifs, néanmoins il s'en dégage un certain nombre de renseignements :

- La teneur pondérale en minéraux varie entre 0,15 et 1,72.
- Comme pour les lehms, on note dans ce matériau une forte teneur en minéraux opaques.

- La fraction 160 à 500  $\mu\text{m}$  est à 80 % constituée de quartz. Le zircon observé dans cette fraction est de petite taille.
- Le cortège minéralogique observé est constitué de hornblende verte (107 à 134 ppm), de sphène (97 ppm), d'épidotes (57 à 65 ppm), de grenat, de staurotide et des traces de zircon. A l'état de traces, on peut observer des minéraux provenant du métamorphisme alpin tels des glaucophanes et chloritoïdes. Tous ces minéraux sont présents dans les cailloutis du Sundgau. Seule l'augite trouvée en trace ne peut provenir des Alpes.
- Un comptage rapide a été effectué : les non usés représentent 44 % ; les ronds mats 30 %, et les émoussés luisants 26 %. Ces résultats ne permettent pas de conclure quant à l'origine de ce matériau.

#### c) Teneur en eau des échantillons prélevés

La teneur en eau des échantillons prélevés entre 1,20 m et 3,10 m de profondeur est en moyenne de 24,2 %. Les valeurs extrêmes rencontrées étant 20,4 et 27,9 %. A ces teneurs en eau, les échantillons sont à plus de 90 % de la saturation.

#### d) Compacité

La densité apparente,  $\gamma_d$ , varie entre 1,44 et 1,66  $\text{g/cm}^3$ . La valeur moyenne de 7 échantillons est 1,58  $\text{g/cm}^3$ . Le poids volumique solide moyen est 2,72. La porosité moyenne,  $\bar{n}$ , égale 41,9 %.

### 4.3. - Caractéristiques mécaniques

#### a) Limites d'ATTERBERG

La limite de liquidité des échantillons étudiés fluctue dans l'intervalle  $32,8 \leq w_L \leq 24$  %. La moyenne obtenue sur quatre échantillons est  $w_L = 30,17$  %. La limite de plasticité s'est souvent avérée difficile à réaliser. La valeur maximale obtenue s'élève à 11,5 avec un matériau renfermant 12,5 % d'argile. Nous n'avons pas pu déterminer ce paramètre sur un matériau contenant 30,1 % de  $\text{CaCO}_3$  et seulement 9,1 % d'argile granulométrique. Il semble que cette impossibilité est due au taux d'argile ici particulièrement faible. D'autres auteurs, De PLOY (1973) et notamment EGRI (1972) signalent la même difficulté. Les travaux du dernier auteur relatent pour certains loess renfermant 25 à 30 % de  $\text{CaCO}_3$ , des indices de plasticité de 5 à 13 % d'eau.

b) Triaxiaux

Un essai non consolidé rapide (U.U.) fait apparaître les valeurs  $\varphi = 0$  et  $C = 0,3 \cdot 10^2 \text{KPa}$ .

En condition d'essai consolidé lent (drainé), on obtient les valeurs :  $\varphi' = 32$  et  $C' = 0,2 \cdot 10^2 \text{KPa}$ .

EGRI obtient, en cisailant des loess humides, les valeurs suivantes :  $C = 0,2$  ;  $\varphi = 23$  à  $32$

c) Oedomètre

Les deux branches de la courbe, dont l'une représente le tassement lors du chargement et l'autre le gonflement après le déchargement, permettent de constater que ce matériau est très plastique. Son indice de compressibilité  $C_c$  égale  $0,19$  pour une pression de consolidation  $P_c = 1,6 \cdot 10^2 \text{KPa}$ . Nous retiendrons que ce matériau est assez compressible.

La corrélation proposée par SKEMPTON :  $C_c = 7 \cdot 10^{-3} (w_L - 10)$ , se trouve confirmée pour 2 échantillons ( $0,1596$  et  $0,1617$ ). Par contre, pour l'échantillon dont nous n'avons pas pu obtenir la limite de plasticité, cette formule donne  $C_c = 0,102$ . L'indice de compressibilité obtenu montre que ce matériau loessique est compressible.

d) Essai Proctor

Pour un loess dont les caractéristiques physiques sont : teneur en argile :  $9,1 \%$ , teneur en carbonates de calcium égales à  $30 \%$ , on obtient les résultats suivants :

$$\begin{array}{ll} \gamma_d^C = 1,57 & w^C = 10,5 \text{ \% d'eau} \\ \gamma_d^M = 1,67 & w^M = 18 \text{ \% d'eau} \end{array}$$

4.4. - Exploitation et problèmes géotechniques des loess récents

La faible teneur en argile de ce matériau le rend inactif au sens géotechnique du terme. Les phénomènes de retrait - gonflement y sont quasiment nuls. Toutefois, la limite de liquidité relativement basse et la faible limite de plasticité rendent ce matériau très sensible à l'action de l'eau. On pourrait, par conséquent, y craindre des ravinements des talus et des coulées de solifluxion. Ce sol sera très difficile à travailler aux teneurs en eau élevées. De ce fait, il est recommandé de n'y



entreprendre des travaux de terrassement qu'en période sèche, car les engins pourraient s'y enliser. Ce matériau s'avère modérément compactable pour l'énergie de 0,6 MJ/m<sup>3</sup>.

Les résultats oedométriques ont mis en évidence la compacité de ce matériau. Le faible taux d'argile et la nature de celle-ci conduisent à une certaine irréversibilité du phénomène de compressibilité.

## 5. - LES DEPOTS D'ACCUMULATION

Ce sont les alluvions et colluvions déposés par les cours d'eau ou par ruissellement sur les pentes colluvions. La diversité de leur origine : loess, lehms, cailloutis du Sundgau et/ou argile, ne permet pas de s'en faire une image synthétique. Toutefois, ils ont des taux d'argile et de matière organique plus élevés que ceux des autres limons. Il s'agit de formations récentes marquées par l'hydromorphie. Leur épaisseur peut atteindre les 6 m, mais elle est souvent de l'ordre de 2 m.

### 5.1. - Caractéristiques physiques

#### a) Granulométrie

La granulométrie d'une telle formation varie au sein même d'un profil de sol et d'un endroit à l'autre, en fonction de l'influence de l'une ou l'autre formation géologique. Généralement, ces produits sont plus riches en argile et en éléments grossiers, au détriment de la fraction limoneuse. Les éléments grossiers sont constitués de graviers roulés et/ou de poupées calcaires.

Ces produits sont décarbonatés, à quelques exceptions près, dans la partie sud-ouest du périmètre d'étude. Au-delà de Heidwiller, plus au nord, les sols sont généralement carbonatés.

#### b) Teneur en eau

La teneur en eau lors du prélèvement des échantillons est en moyenne 26,77 % avec des valeurs extrêmes de 11,4 et 36,5 %. La position géomorphologique de ces sols et la proximité du substrat imperméable sont à

l'origine de la présence de la nappe phréatique à faible profondeur.

c) Compacité

La densité apparente de ces sols fluctue entre  $1,33 \text{ g/cm}^3$  et  $2,02 \text{ g/cm}^3$ , la moyenne est  $1,50 \text{ g/cm}^3$  (26 échantillons). La compacité augmente avec la profondeur de prélèvement. Les valeurs les plus faibles de  $\gamma_d$  ont été obtenues dans les horizons de surface, plus récents et plus riches en matière organique que les horizons profonds.

La densité réelle,  $\gamma_s$ , varie entre 2,65 et 2,72 soit en moyenne : 2,69; une porosité moyenne  $n_T = 42,2 \%$ . Le degré de saturation varie entre 78 et 100 %, soit une moyenne de 94 % (15 échantillons).

5.2. - Caractéristiques mécaniques

a) Limites d'ATTERBERG

Pour 11 échantillons, nous obtenons les valeurs suivantes :

- Limite de liquidité :  $\bar{w}_L = 45,89$  ( $32,8 < w_L < 64,5 \%$ )
- Limite de plasticité :  $\bar{w}_p = 21,26 \%$  ( $17,8 < w_p < 24,9$ )
- L'indice de plasticité  $I_p = 24,6$ . Les valeurs extrêmes étant 9,2 et 40,2.

Nous obtenons pour cette formation la relation :

$$I_p = 1,075 (w_L - 228), r = 0,98.$$

Ces résultats montrent que nous sommes en présence d'une formation qui se situe, sur le diagramme de Casagrande, dans le domaine des argiles plastiques. Les teneurs relativement élevées en argile et en matière organique sont, du moins partiellement, la cause des valeurs élevées des limites d'ATTERBERG. L'indice de consistance moyen  $\bar{I}_c = \frac{\bar{w}_L - \bar{w}}{I_p} = 0,78$

b) Oedomètre

Pour 11 échantillons prélevés entre 0,9 et 2,20 m de profondeur, l'indice de compressibilité moyen,  $\bar{C}_c$ , égale 0,27 pour un  $\bar{P}_c$  de  $1,52 \cdot 10^2 \text{ KPa}$ . L'indice de compressibilité paraît élevé, ce qui permet de considérer ce matériau comme très compressible.

Matériaux	Granulométrie (%)			Carbonates CaCO <sub>3</sub> (%)	Densité apparente g/cm <sup>3</sup>	Densité réelle γ <sub>s</sub>	Porosité n (%)	Limites d'Atterberg			Compactage			Triaxial		Oedométrie		
	A	LF	LG/LF					W <sub>L</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)	γ <sub>d</sub> <sup>c</sup>	W <sup>c</sup> (%)	γ <sub>d</sub> <sup>M</sup>	W <sup>M</sup> (%)	Coh. (10 <sup>2</sup> K/Pa)	φ	C <sub>c</sub>	P <sub>c</sub> (10 <sup>2</sup> K/Pa)
Marnes				35,2	1,82	2,73	33,3	46,4	19,8	26,6	1,51	15,5	1,68	19,0	0,25	32	0,08	4,0
Lehms anciens	19,7	44,4	0,67	-	1,65	2,71	38,7	37,3	19,4	17,9	1,56	6,1	1,74	17,5	0,2	27	1,13	3,8
Vieux loess	17,7	42,9	0,86	8,0	1,63	2,76	40,9	28,3	19,3	9,0	1,61	7,15	1,73	18,0	-	-	-	-
Loess récents	11,0	40,8	1,19	30,0	1,58	2,72	41,9	30,2	-	-	1,57	10,5	1,67	18,0	0,3 <sup>**</sup> 0,2 <sup>*</sup>	0 <sup>**</sup> 32 <sup>*</sup>	0,19	1,6
Dépôts allu-collu.					1,50	2,69	42,2	45,9	21,26	24,3	-	-	1,64	18,9	-	-	0,27	1,5

Tableau récapitulatif IV, 7.

\* A = Argileuse

\*\* S = Sableuse

(1) = Limono-argileuse

(2) = Limons moyens

\* Effectifs

\*\* Totaux.

c) Proctor

Trois essais Proctor donnent les résultats suivants :

$w^M$ (%)	$\gamma_d^M$
18,9	1,66
17,21	1,69
20,7	1,62

soit, des moyennes:  $\bar{w}^M = 18,9$  % et  $\bar{\gamma}_d^M = 1,64$

En somme, les principales caractéristiques physiques et mécaniques (tableau IV.7) qui distinguent les matériaux étudiés sont :

- la composition granulométrique et minéralogique,
- la teneur en carbonates de calcium,
- les limites d'ATTERBERG,
- les caractéristiques des courbes Proctor
- les valeurs de  $C_c$  et  $P_c$ .

## V - ETUDE PARTICULIERE : LE COMPACTAGE

---

### INTRODUCTION

L'aptitude qu'a un sol à se compacter, tant sous l'action de l'eau que d'une intervention mécanique, conduit les géotechniciens et les praticiens de l'agriculture, avec des préoccupations opposées, à s'intéresser aux processus de compactage.

Il existe plusieurs techniques de laboratoire et de chantier permettant de compacter les sols. On distingue deux grandes méthodes de laboratoire : le compactage statique (oedomètre, hydraulique) et le compactage dynamique (vibration, pétrissage, chocs).

Nous avons retenu, pour le compactage des échantillons du Sundgau, le procédé Proctor, méthode de compactage dynamique agissant par chocs Proctor. Nous avons présenté au chapitre III les caractéristiques et les modalités d'utilisation de ce procédé.

### 1. - DEFINITION DU COMPACTAGE DES SOLS

Le compactage est l'ensemble des actions qui consistent à réduire le volume poral d'un sol par le rapprochement des grains solides. Le test Proctor peut engendrer cette réduction du volume des fluides sans expulsion d'eau.

Le compactage affecte d'abord l'espace poral structural d'origine fissurale (tassement structural). Dans certaines conditions énergétiques et hydriques optimales, le compactage pourrait ensuite réduire l'espace poral de l'agrégat (compacité texturale) par une disposition et un réarrangement plus serré des particules. Enfin, l'augmentation du niveau d'énergie lors du test Proctor peut entraîner une modification granulométrique du matériau par changement de l'état des particules : cassures, fractures, et géométrie des surfaces (JOHNSON et al. ; 1962) des argiles et des grains indéformables.

## 2. - QUELQUES CONSIDERATIONS SUR L'ETAT DES SOLS

Sous l'effet d'un chargement (contrainte), le sol évolue par rupture et dislocation vers des structures moins lâches. Le chargement d'un sol non saturé, de composition granulométriques complexe, affecte principalement en un premier temps la fraction grenue de l'échantillon. Par la suite, si les conditions d'humidité et/ou de contrainte sont suffisantes, la fraction fine peut se mouvoir ou lubrifier les grains du squelette pour amener une densification plus forte du sol. La loi du comportement des sols n'est autre que la cause (l'état de contraintes) et la conséquence du mouvement qu'elle engendre (l'état de déformation). Les déformations peuvent être décomposées en une déformation isotrope avec variation de volume, et une déformation déviatoire résultant de la modification de la géométrie de l'assemblage sans variation de volume.

Bien que les déformations déviatoires n'engendrent pas d'augmentation de densité des sols, elles peuvent avoir des effets défavorables aussi bien en agriculture qu'en matière de génie civil : à ce sujet, les ornières provoquées par les engins sur les sols humides (état de plasticité) sont particulièrement éloquentes.

La compacité d'un sol tient non seulement à sa constitution physico-chimique, mais aussi aux contraintes qui lui sont appliquées, qu'elles résultent des processus de mise en place, pédo-climatiques, biologiques, ou des interventions anthropiques.

Ces actions qui déterminent l'histoire énergétique du sol modifient l'arrangement des grains, soit en augmentant la compacité, soit éventuellement en l'abaissant. Par conséquent, le degré de rapprochement des grains d'un sol (état de compacité) à un moment donné résulte d'un compromis entre les deux phénomènes.

De façon générale, le niveau de compacité est apprécié par la mesure du poids volumique, plus souvent appelé densité apparente.

Dans le domaine de la mécanique des sols, il est important de connaître les modalités d'arrangement physique des grains du squelette et des particules argileuses douées de propriétés physico-chimiques. "La densité maximale" est un paramètre entre autre directement dépendant des possibilités d'arrangement des éléments solides de tailles différentes.

Pour un matériau donné, on peut considérer que cette densité est atteinte lorsqu'elle reste constante pour des énergies de compactage plus fortes, et pour de faibles teneurs en eau.

Sur les bases d'hypothèses théoriques, des modes d'arrangements entre le squelette et l'argile ont été étudiés par de nombreux auteurs CHRETIEN (1971) ; MONNIER et FIES (1973) ; HENIN (1976) ; FIES (1978). Ainsi trois modèles permettent d'énoncer succinctement l'agencement de deux populations d'éléments de tailles différentes :

Lois d'additivité (Fig. V.1)

Dans ce cas, il s'agit d'une simple juxtaposition des deux populations de grains. Il y a indépendance entre les classes granulométriques. Ce cas de figure se présente rarement dans la nature.

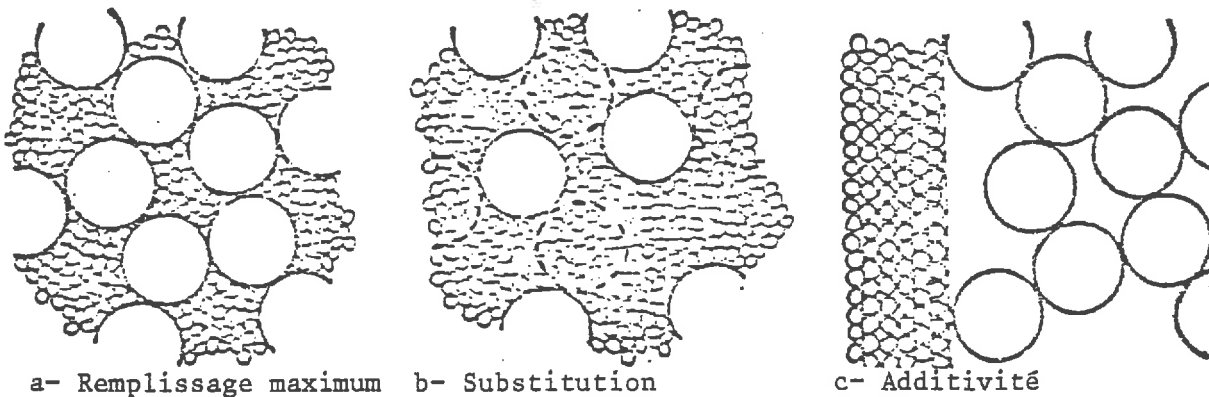


Fig. V.1. Modèle d'association de particules dans un mélange binaire. (d'après FIES).

Loi dite de remplissage (Fig. V.1)

Le remplissage des vides ménagés par l'architecture des grains de plus grande taille peut être partiel ou total.

Loi dite de substitution (Fig. V.1)

Il y a substitution, c'est-à-dire remplacement volume par volume équivalent de grains par des particules de plus petite taille.

3. - INTERETS DU COMPACTAGE

La compacité des sols conditionne à la fois les rendements en production agricole et la bonne tenue des ouvrages du génie civil. Alors que les agronomes redoutent une trop grande compacité, les constructeurs d'ouvrages la recherchent car la stabilité des ouvrages en dépend largement (autour de l'ouvrage, évidemment, le tassement du sol par les engins de chantier est à éviter).

En provoquant un meilleur serrage entre les particules et les grains le compactage augmente la résistance mécanique des sols, réduit leur perméabilité, et le gonflement des argiles. Il en résulte une bonne tenue des talus de remblais et des ouvrages géotechniques.

Dans le domaine géotechnique, il n'y a pas équivalence entre une forte densité et un bon compactage. Un bon compactage est celui qui est nécessaire et suffisant pour une bonne tenue. Une trop forte densité peut être nuisible à la tenue du massif compacté par suite d'un comportement hydrique défavorable ou par une discontinuité lithologique provoquée. Le compactage va donc consister à densifier un sol en vue de le rendre apte à la fonction géotechnique que l'on veut lui imposer.

Dans le domaine agricole, qu'elle résulte des pressions exercées par les machines agricoles ou des phénomènes naturels, une forte compacité des terres arables est préjudiciable à l'agriculture. Quand elle affecte les horizons superficiels, ou que ses conséquences se manifestent sur la profondeur utile, il se crée des propriétés physico-chimiques défavorables pour le travail du sol, pour la levée et le développement des végétaux cultivés, pour la vie microbienne. Ces propriétés défavorables résultent de la réduction des échanges gazeux (diffusion de l'oxygène), d'une faible perméabilité à l'eau du sol et d'une plus grande résistance physique à la pénétration des racines et des instruments de travail du sol.



L'une des fonctions importantes des racines est d'assurer l'approvisionnement en éléments nutritifs de la plante, or cette fonction est dépendante de la densité du réseau racinaire explorant un volume donné de sol. DAS (1972) conclut d'une expérimentation réalisée sur maïs qu'une densité racinaire de 1,5 à 2,0 cm/cm<sup>3</sup> de sol est nécessaire pour utiliser pleinement les réserves hydriques de ce volume de terre. Cet expérimentateur a montré pour le même végétal, soumis à trois traitements hydriques différents, que la compacité réduit l'élongation des racines pour les traitements en conditions plus sèches.

De très nombreuses études ont été conduites pour mettre en évidence la diminution des rendements agricoles par la compacité des sols : Black et Al. (1961), DAS, FLOCKER et Al. (1960) pour la tomate ; Dray Cott et Al. (1970), METTAUER et Al. (1978) pour la betterave à sucre ; DAS (1972) pour le maïs ; Hanks et Al. (1968) pour le blé...

Une expérimentation conduite dans le Gharb (Maroc) pour tester les effets du tassement d'un sol à caractère vertique sur la production de la canne à sucre a montré que celle-ci en est défavorablement affectée. Aussi, a-t-on noté qu'un tassement généralisé dû à de mauvaises conditions de préparation du sol provoque une chute de rendement en canne de 48 % et en sucre de 60 %, (JOUVE et Al. 1979). Cette perte d'environ 6,27 t de sucre à l'ha a été observée pour une augmentation des densités apparentes (1,32) de l'ordre de 10 % dans les 30 premiers cm. Les mesures de densité ont été réalisées 1 an après le tassement, ce qui met en évidence, une certaine irréversibilité du phénomène.

SCHMIDT (1963) rapporte que la conductibilité hydraulique était réduite de 1000 quand la porosité passait de 60 à 40 %. D'autres études ont montré que la croissance de la plante est réduite par la compacité si les pores remplis d'air représentent moins de 10 % du volume des fluides à la capacité au champ.

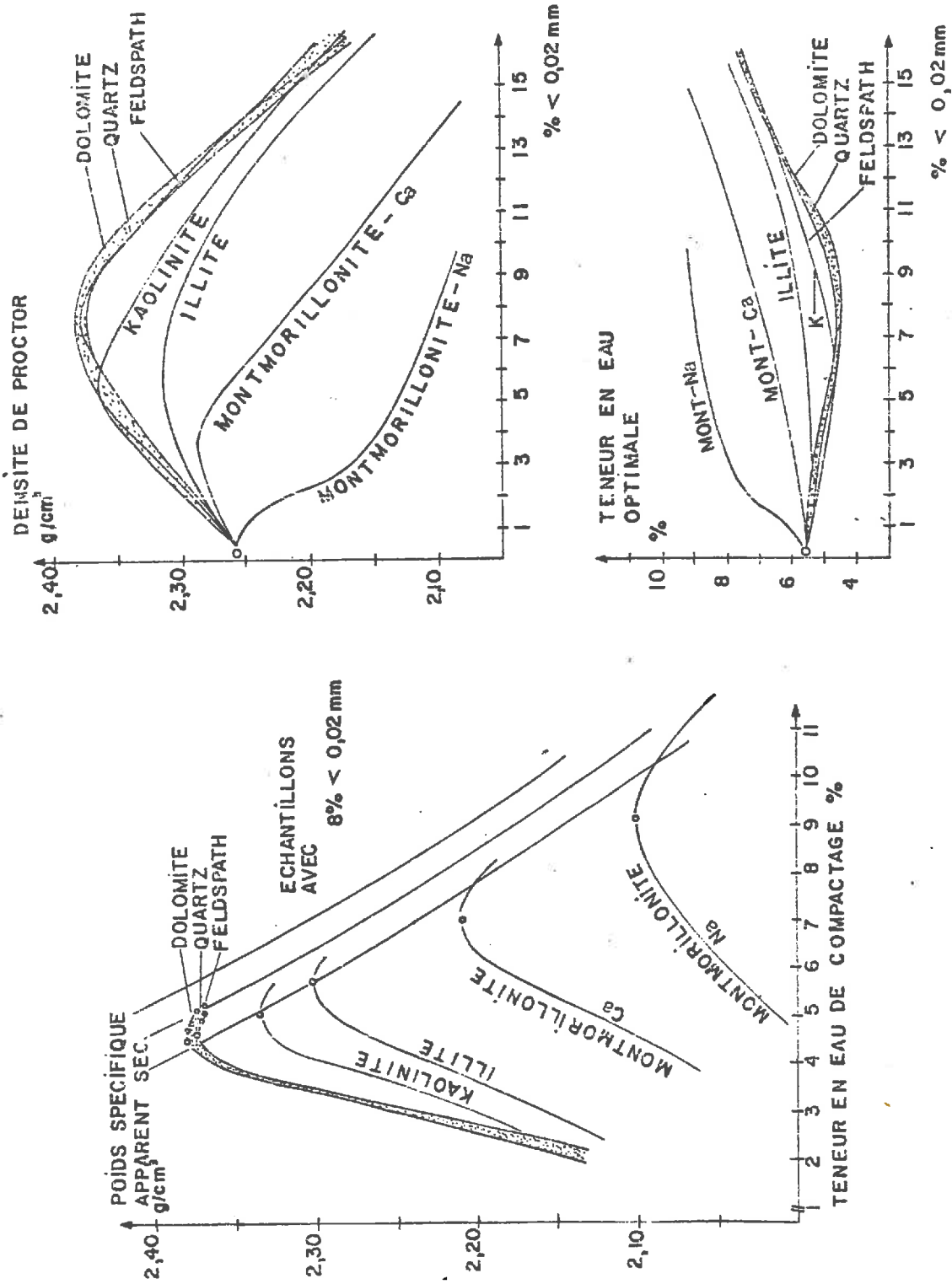


Fig. V.2. Compacité et minéralogie de divers matériaux (in Fry).

#### 4. - ETUDES DU COMPACTAGE AU LABORATOIRE

Le procédé Proctor, dont les résultats, fiables, servent de référence dans l'approche pratique des caractéristiques du compactage des sols, a fait, et fait encore l'objet d'études particulières: (NASH, 1951 ; TSHEBOTARIOFF, 1960 ; FELT, 1965 ; ROMAN et NAVARO, 1969) montrent que plus la texture est fine plus l'humidité critique  $w^c$  augmente. Toutefois, l'environnement ionique des argiles joue un rôle très important sur le tassement des sols (Fig. V.2). GARDON met en évidence l'influence de l'intensité d'énergie sur la "compressibilité" des sols. TURNBULL et FORSTER, 1957 ; FAURE, 1971, se sont intéressés à l'allure des courbes aux faibles teneurs en eau. D'autres auteurs ont cherché à relier l'allure des courbes de compactage aux limites d'ATTERBERG. D'une façon générale, la densité au maximum Proctor décroît lorsque les limites d'ATTERBERG augmentent comme le montrent les tableaux IV.6 (chap. IV). LEE note une incidence de la valeur de  $w_L$  sur l'existence ou la présence d'un ou deux maxima de densité. Cet auteur vérifie sur vingt huit échantillons que :

- Les courbes ayant un optimum sont surtout fréquentes pour  $30 < w_L < 70$  (kaolinite et illite pures).
- Les courbes sans optimum s'obtiennent généralement pour des sols à  $w_L > 70$  % (montmorillonite). FAURE (1978) retrouve le même résultat avec une montmorillonite dont  $w_L = 125$  %.
- Les courbes à deux optima sont constatées pour des sols :  
soit à  $w_L > 70$  % (montmorillonite + autre argile),  
soit à  $w_L < 30$  % (sable + argile).

Comme nous le verrons ultérieurement, les courbes que nous obtenons ne présentent qu'un seul optimum, alors que leur  $w_L$  peut rester inférieur à 30%.

A proportion égale de sable de même nature et dans les mêmes conditions expérimentales, les mélanges à base de kaolinite donnent des compacités à l'optimum Proctor supérieures à celles obtenues à base d'argiles montmorillonitiques (Fig V.2). Ce résultat est le reflet d'un compromis entre la taille des particules argileuses, de leur poids spécifique moyen d'une part, et les phénomènes de gonflement et de pouvoir de fixation d'eau par les argiles d'autre part (TESSIER, 1978). L'eau étant incompressible, il est donc normal que la montmorillonite se compacte moins bien que la kaolinite.

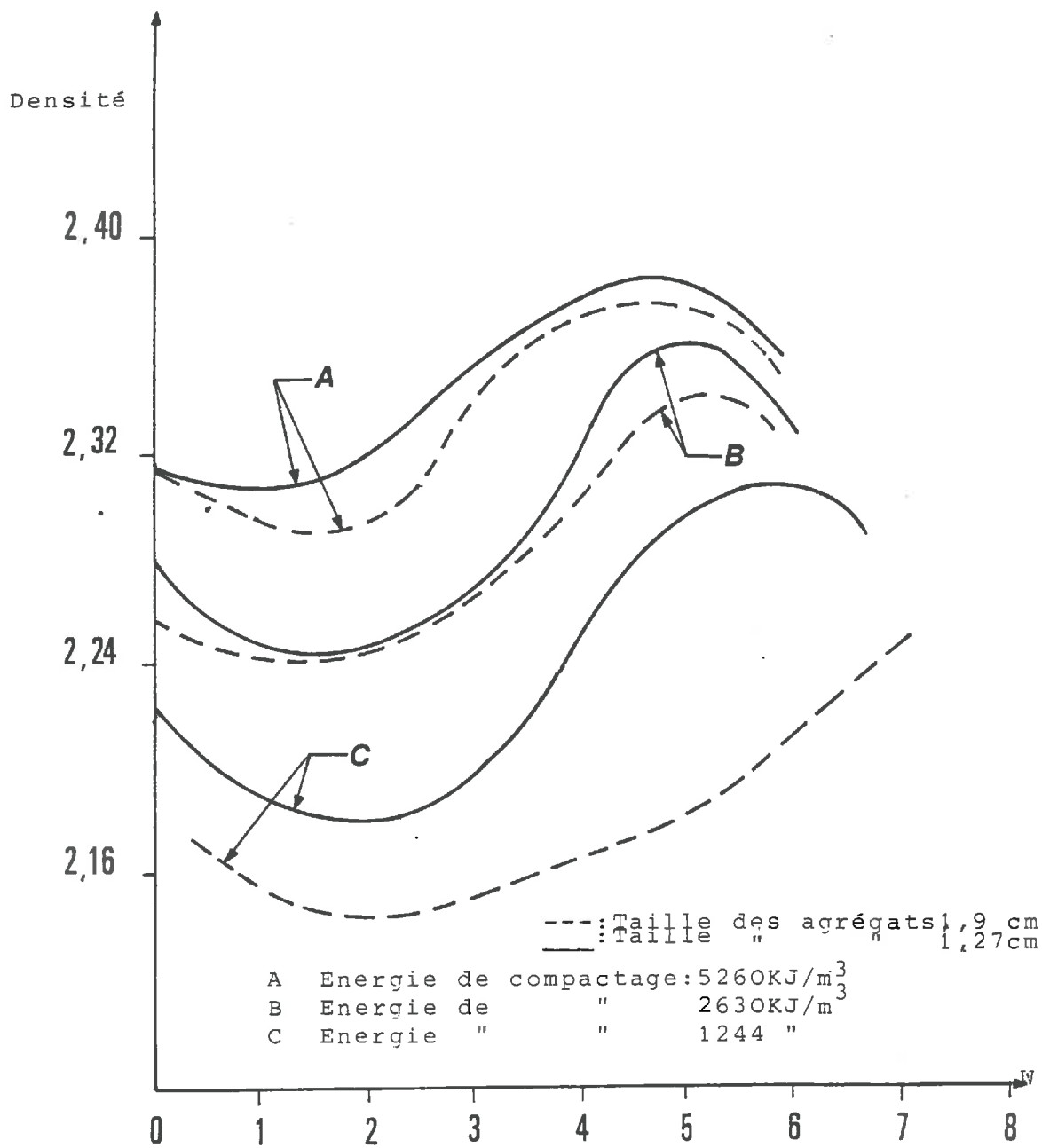


Fig. V.3.

Compaction dynamique à différentes énergies -  
Mise en évidence du seuil de sensibilité (d'après  
Turnbull et Forster, 1957).

FAURE (1978) a montré, à partir des mélanges binaires (argiles calciques -sable de Brou), que  $w^c$  dépend essentiellement du taux et de la nature de l'argile. Cet auteur définit le paramètre  $w^A = \frac{w^c}{A}$  où A est la teneur en argile.  $w^A$ , ou seuil de sensibilité au compactage de la phase argileuse, est constant pour un même type d'argile. Il égale 0,32 pour la kaolinite, 0,38 pour la montmorillonite. Ceci revient à dire que la valeur de  $w^A$  est dépendante des propriétés hydriques des argiles présentes aux énergies utilisées.

D'autres paramètres que l'argile influence la valeur de  $w^A$  :

- De nombreux travaux : SOANE et Al. (1970), MANIERE (1973), GUERIF (1976), FRANKLIN (1973) ont montré que  $\gamma d^c$  et  $\gamma d^M$  diminuent et que leurs teneurs en eau  $w^c$  et  $w^M$  augmentent avec un accroissement de la matière organique. FREE, LAMBE et CARLETON ont montré qu'une réduction du taux de MO de 4,1 à 2,5 % d'un sol limoneux engendre une augmentation de la densité à l'optimum Proctor de 1,40 à 1,61 et une diminution de la teneur en eau en ce point de 26 à 22 %.

GUERIF et FAURE (1979) ont montré que la matière organique tend à élever la valeur de  $w^c$  et diminuer celle de la densité  $\gamma d^M$ . Les auteurs ont proposé la relation linéaire entre  $w^A$  et  $\frac{MO}{A}$  :  $w^A = 1,52 \frac{MO}{A} + 27$  ( $r = 0,84$ )

- D'autres travaux montrent qu'il existe une corrélation négative entre le taux de carbonate de calcium et la densité du maximum Proctor (FAURE 1978 ; SOUTY 1979).

##### 5. - QUELQUES REMARQUES CONCERNANT LA TECHNIQUE PROCTOR

Les relations densités-paramètres de compactage sont partielles ; en effet,  $\gamma d = f(w, E^*, \text{minéralogie, granulométrie, condition limite})$ . On connaît mal à l'état actuel l'interaction entre les paramètres mis en jeu ; il en résulte une dispersion parfois non expliquée des résultats, les densités obtenues correspondent à des valeurs moyennes valables dans

---

\* E = Énergie

les conditions expérimentables. L'hétérogénéité de la densité, à la fois du haut vers le bas de l'échantillon (discontinuité entre les trois couches) et latéralement (du centre vers la périphérie) peut favoriser l'existence d'un plan de rupture dont il convient de tenir compte, par exemple lors du cisaillement de telle éprouvette.

Avant d'aborder l'étude du compactage des matériaux du Sundgau, il s'avère nécessaire d'indiquer le degré de fiabilité et la précision des valeurs expérimentalement obtenues. A ce propos, nous nous référons aux résultats d'une étude menée par SHERWOOD (1975). Celle-ci portait sur la répétitivité et la reproductibilité de l'essai Proctor effectué sur trois matériaux dans quarante laboratoires. Il note un écart type de l'ordre de  $0,04 \text{ g/cm}^3$  pour la densité et  $1,5 \%$  pour la teneur en eau. En conséquence, une incertitude de  $\pm 0,02$  sera affectée pour nos résultats de densités.

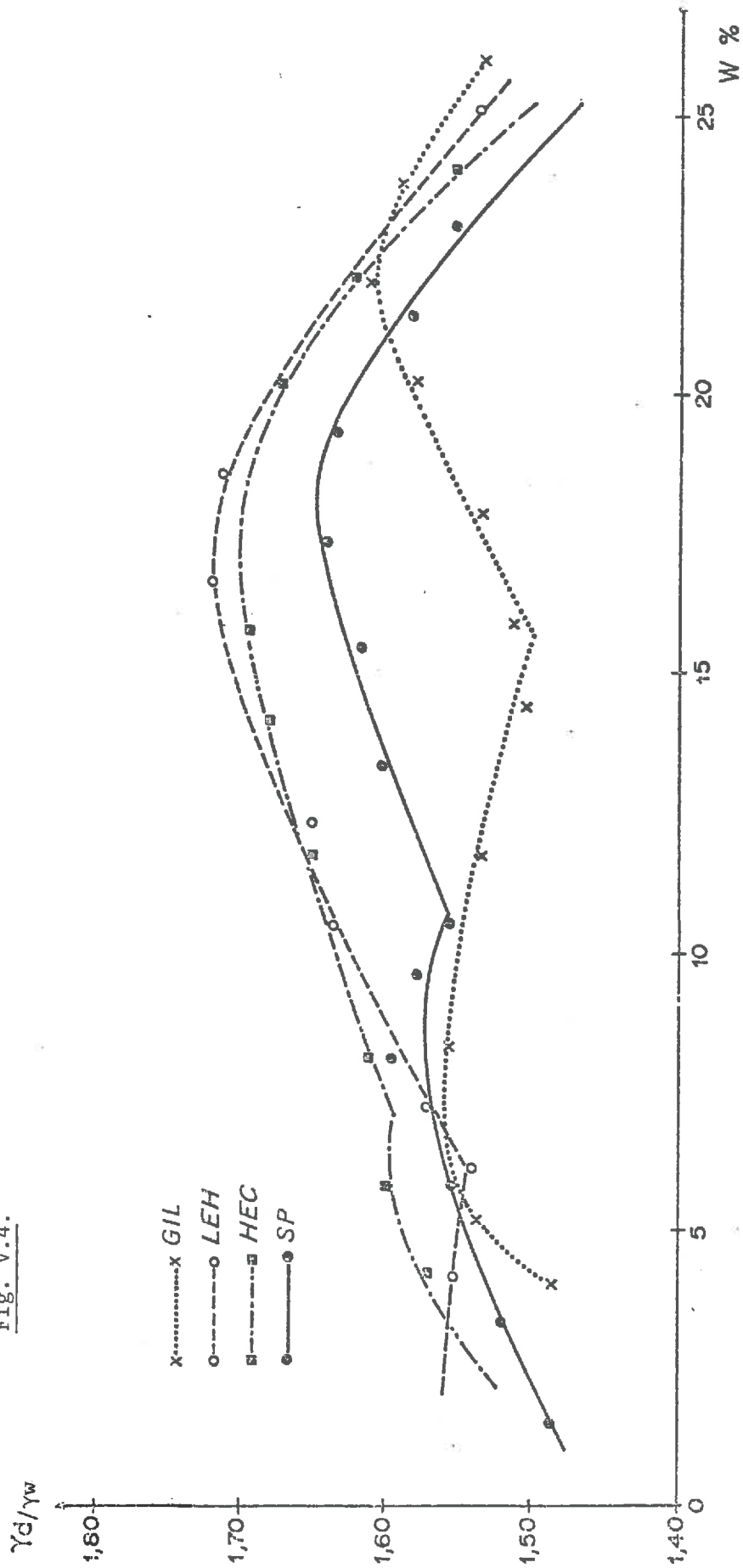
## 6. - COMPACTAGE DES SOLS DU SUNDGAU

Nous avons voulu par cette étude préciser le comportement au tassement des sols rencontrés. Les résultats que nous allons exposer proviennent d'un travail accompli uniquement au laboratoire. L'étude comprend trois étapes : la première caractérise la sensibilité au compactage des "matériaux originels". Dans un second temps, nous avons essayé de quantifier par leur aptitude à se compacter l'homogénéité de deux unités pédologiques. Enfin, la dernière étape teste la susceptibilité au compactage des horizons superficiels (A).

### 6.1. - Le compactage des matériaux originels

Les échantillons de matériaux originels ont été prélevés à des profondeurs dépassant  $1,50 \text{ m}$ . Les matériaux ont été nommés : GIL pour les marnes, LEH pour les lehms anciens, HEC pour les vieux loess et SP pour les loess récents. Il s'agit dans tous les cas de matériaux très pauvres en matière organique, aussi considérons-nous ici son rôle comme secondaire, voire négligeable.

Fig. V.4.



a) Le compactage des marnes

L'échantillon étudié a les caractéristiques analytiques suivantes :

TABLEAU V.1.

	A	L F	L G	S	LG/LF	CaCO <sub>3</sub> Total (%)	Calcaire actif (%)	M O pour cent d'argile
SD*	41,4 <sup>(1)</sup>	43,9	10,2	4,5	0,23	31,4	12,5	0,90
AD**	37,6 <sup>(2)</sup>	25,9	4,2	0,9	0,16	-	-	

SD\* Traitement sans décarbonatation

AD\*\* Traitement avec décarbonatation

(1) Argile dite globale ou A<sub>G</sub> (granulométrique)

(2) Argile dite vraie ou A<sub>V</sub> (minéralogique)

TABLEAU V.2.

w <sup>c</sup> (%)	γ d <sup>c</sup>	w <sup>M</sup> (%)	γ d <sup>M</sup>	w <sup>A</sup> (%)	$\frac{\Delta \gamma d}{\Delta W}$ (%)
15,5	1,51	22	1,62	0,37*	1,69
				0,41**	

\* Avant décarbonatation

\*\* Après décarbonatation

La sensibilité au compactage est quantifiée par le rapport :

$$s_c = \frac{\gamma d^M - \gamma d^c}{w^M - w^c} \quad \text{ou} \quad \frac{\rho^M - \rho^c}{w^M - w^c}$$

Elle correspond donc à l'augmentation moyenne de densité entre le seuil de sensibilité au compactage et le maximum Proctor pour une augmentation unitaire de la teneur en eau.



Les résultats, tels qu'ils apparaissent dans le tableau ci-dessus, montrent que le matériau étudié est peu sensible au compactage aux faibles teneurs en eau (Fig. V.4.)

Pour ces teneurs en eau, la densité de la marne compactée accuse une croissance rapide, pour décroître ensuite très lentement entre 7 % et 15,5 % d'eau. Nous avons vu que la première partie de la courbe correspond au concassage des agrégats sous l'action des chocs de la dame de compactage, et que dans la 2ème partie se manifestent les effets du gonflement de l'argile. Le gonflement, fonction de la nature de l'argile et des contraintes énergétiques reçues par elle, semble important pour le matériau testé. La teneur en eau au seuil critique de sensibilité au compactage,  $w^C$ , rapportée au taux d'argile globale,  $A_G$ , égale 0,37. La valeur obtenue du coefficient de proportionnalité,  $w^A$ , est peu différente de celle obtenue sur montmorillonite par FAURE (1978). Ce résultat n'est pas fait pour nous surprendre, car l'argile contenue dans le matériau étudié est à dominance interstratifié-smectite.

Au-delà de  $\gamma_d^C$ , on considère que les argiles ne gonflent plus et jouent leur rôle d'agent lubrifiant vis-à-vis du squelette qui tend à se densifier. Toute eau ajoutée à partir de  $w^C$  se répartirait à la surface des solides de telle sorte qu'elle jouerait, elle aussi, un rôle de lubrifiant. La phase de densification se poursuivrait ainsi jusqu'au maximum Proctor dont la valeur égale 1,62 pour la marne.

Pour des teneurs en eau supérieures à  $w^M$ , la branche descendante de la courbe Proctor de la marne tend vers l'hyperbole de saturation ( $w_s = \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s}$ ). Le matériau est à environ 92 % de sa saturation au maximum Proctor, l'écart à 100 est occupé par l'air piégé dans la structure de l'échantillon.

Nous retiendrons, en conclusion, que les résultats obtenus sont compatibles avec la constitution du matériau compacté.

b) Le compactage des lehms anciens (Fig. V.4)

Caractéristiques analytiques :

TABLEAU V.3.

	A	L F	L G	S	LG/LF	CaCO <sub>3</sub> Total (%)	Calcaire actif (%)	M O pour cent d'argile
SD	17,0	46,6	33,9	2,5	0,72	-	-	0,1
AD	20,7	47,3	29,5	1,5	0,12	-	-	

TABLEAU V.4.

$w^c$ (%)	$\gamma d^c$	$w^M$ (%)	$\gamma d^M$	$w^A$ (%)	$\frac{\Delta \gamma d}{\Delta w}$ (%)
6,1	1,56	18	1,74	0,36	1,59
				0,29	

La première partie de la courbe, jusqu'à  $w^c$ , paraît rectiligne et faiblement décroissante. Apparemment, les agrégats contenus dans la terre fine (< 2 mm) n'opposent pas une résistance notable à l'énergie type Proctor. On pourrait penser que le gonflement des argiles l'emporte légèrement sur l'effet du concassage des agrégats.

Le seuil hydrique de sensibilité au compactage,  $w^c$ , a la valeur de 6.1. Celle du rapport  $w^c$  au taux d'argile est de 0,36. La phase argileuse renferme surtout de l'illite et des interstratifiés. Le gonflement de telles argiles est modéré. Ce matériau paraît moins sensible au compactage que précédemment, la valeur de  $\frac{\Delta \gamma d}{\Delta w}$  est ici de 1,59.

Les densités apparentes obtenues à partir de la courbe de compactage des lehms montrent qu'ils se compactent nettement plus et pour de moindres quantités d'eau que la marne précédemment étudiée. Le comportement du matériau lehmique paraît conforme aux références citées.

c) Le compactage des vieux loess

Caractéristiques analytiques :

TABLEAU V.5.

	A	L F	L G	S	LG/LF	CaCO <sub>3</sub> Total (%)	Calcaire actif (%)	M O pour cent d'argile
SD	17,7	42,9	36,7	2,7	0,86	6,8	1,8	0,02
AD	20,2	36,3	35,5	1,2	0,98	-	-	

TABLEAU V.6.

$w^c$ (%)	$\gamma d^c$	$w^M$ (%)	$\gamma d^M$	$w^A$ (%)	$\frac{\Delta \gamma d}{\Delta w}$ (%)
1,61	7,15	1,73	18	0,40 0,35	1,11

La teneur en eau pour laquelle la fraction argile du matériau étudié passe à l'état plastique est de 7,15 %. Bien qu'elle soit supérieure à celle des lehms, cette valeur nous paraît faible. Rapportée au taux d'argile globale, on obtient un  $w^A$  égalant 0,40. La valeur obtenue dépasse les prévisions que l'on pourrait faire à partir du taux d'argile et de sa nature. En effet, les argiles présentes sont moyennement gonflantes. Elles ne sauraient, de ce fait, expliquer la valeur du  $w^A$ .

SOUTY (1979) a constaté que  $w^A$  des échantillons très carbonatés ( $34,4 < CaCO_3 \% < 94,4$ ) était supérieur à celui obtenu par GUERIF et FAURE (1979). Aussi, propose-t-elle la relation :

$$w^A = 1,74 \frac{(MO)}{A_v} + 0,78 \times \frac{CaCO_3}{A_v} + 35,24 \quad (r = 0,98).$$

S'il est vrai que l'échantillon compacté ne renferme que 6,8 % de CaCO<sub>3</sub>, la valeur de  $w^A$ , apparemment "anormale", non conforme, pourrait être expliquée par l'action des carbonates sur le comportement mécanique de ce matériau.

SOUTY détermine la fraction de CaCO<sub>3</sub> < 2 μm par la différence des taux d'argile globale et vraie. Si cette méthode donne satisfaction

\* CaCO<sub>3</sub> < 2μm.

pour des sols très riches en  $\text{CaCO}_3$ , comme c'est le cas pour ceux retenus par l'auteur, il peut en être autrement pour des sols argileux moins riches en ces carbonates. D'ailleurs, l'auteur reconnaît que  $(A_G - A_V)$  est en toute rigueur tout à fait incorrect. En effet, dans de tels sols, la proportion de l'argile combinée avant décarbonatation dans des assemblages de taille supérieure à  $2 \mu\text{m}$ , enrichit après cette opération la fraction  $< 2 \mu\text{m}$ . Il peut en résulter une teneur en argile granulométrique plus grande après qu'avant décarbonatation. C'est précisément le cas pour les échantillons étudiés. Nous ne pouvons pas, par conséquent, déterminer par cette méthode, et pour de tels sols, le pourcentage des carbonates de calcium inclus dans la fraction  $< 2 \mu\text{m}$ . Le problème de détermination de la fraction argileuse et du taux de carbonates de calcium de taille  $< 2 \mu\text{m}$  reste entièrement à résoudre pour les sols carbonatés de texture limono-argileuse et surtout argileuse.

Par contre, si nous rapportons la teneur en eau du seuil de sensibilité au compactage au taux d'argile après décarbonatation, nous obtenons la valeur de 0,35. Celle-ci nous semble satisfaisante, vu les caractéristiques physiques et minéralogiques de ce matériau.

La densité maximale de ce loess est moyennement élevée. Elle reste sensiblement du même ordre de grandeur que celle du lehm précédemment étudié. La teneur en eau pour laquelle on obtient cette densité est également comparable pour les deux matériaux. Rappelons que leur taux d'argile est assez proche. Il semblerait dans ce cas que HEC subit l'effet des carbonates de calcium, même si cet effet n'est pas perceptible aux teneurs en eau proches de celles du maximum Proctor.

d) Compactage des loess récent-éch. SP

Caractéristiques analytiques :

TABLEAU V.7.

	A	L F	L G	S	LG/LF	$\text{CaCO}_3$ Total	Calcaire actif %	MO/A %
SD	9,1	35,1	61,6	4,3	1,47	30,1	3,5	0,02
AD	9,4	24,8	34,4	2,3	1,39			

TABLEAU V.8.

$w^c$ (%)	$\gamma d^c$	$w^M$ (%)	$\gamma d^M$	$w^A$ (%)	$\frac{\Delta \gamma d}{\Delta w}$ (%)
10,5	1,57	18	1,68	1,15 1,12	1,47

L'étude minéralogique des argiles contenues dans ce loess montre que celles-ci sont constituées par un mélange à dominance d'argile non gonflante. Compte tenu de la nature des argiles, nous devrions avoir une valeur de  $w^A$  comprise entre 0,32 et 0,38. Or, celle-ci dépasse l'unité (1,15). La valeur si élevée de la grandeur  $w^A$  ne saurait être expliquée par le seul paramètre argile.

Outre l'action stérique, les carbonates de calcium pourraient agir de diverses façons vis-à-vis du compactage. Pour des teneurs en eau inférieures à  $w^c$ , ils pourraient retarder l'entrée des argiles en phase de plasticité en accaparant partiellement l'eau disponible. Ils pourraient aussi directement agir sur le comportement de l'argile en les rendant moins mobiles ou/et en atténuant leurs propriétés hydriques et de lubrifiant vis-à-vis des grains du squelette.

La densité et la teneur en eau du maximum Proctor du loess récent sont inférieures à celles des deux autres matériaux, plus pauvres ou dépourvus en carbonates de calcium, mais plus riches en argile:

En guise de conclusion, la courbe Proctor de ce matériau fait apparaître qu'il a un comportement au compactage fortement influencé par les carbonates de calcium - de façon inexplicable dans l'état actuel des connaissances.

#### Discussion et conclusion sur le compactage des matériaux originels

D'abord, nous pouvons constater que la compacité maximale engendrée par l'énergie de  $6 \text{ kgcm/cm}^3$  (soit  $0,6 \text{ MJ/cm}^3$ ) n'est pas très élevée pour l'ensemble des matériaux. Elle est plus importante pour les lehms, suivi des vieux loess. Elles peuvent être inférieures à certaines densités apparentes mesurées sur des échantillons non remaniés.

Ceci prouve que les contraintes naturelles subies par ces matériaux peuvent être, du moins localement, supérieures à celles exercées par le procédé Proctor.

Pour des teneurs en eau inférieures à  $w^c$ , nous constatons que la partie ascendante se manifeste pour les matériaux carbonatés. Il semblerait que les carbonates de calcium augmentent la résistance au concassage des agrégats, dont l'effet semble l'emporter sur le phénomène de gonflement des argiles. Les valeurs de  $w^c$  paraissent être affectées, entre autres, par la présence des carbonates de calcium. Ainsi, comme le montrent les courbes de compactage, le  $w^c$  est augmenté par la présence de ces carbonates. Tout se passe comme si ceux-ci accaparaient partiellement l'eau et retardent de ce fait le passage à l'état plastique des particules argileuses.

Quant aux valeurs de  $w^A$ , elles satisfont les prédictions théoriques pour les lehms, les marnes et le vieux loess; moins, toutefois, pour les loess récents.

En somme,  $w^A$  est influencé par les carbonates dont l'action ne se traduit pas de la même manière selon la composition du matériau compacté, et surtout vraisemblablement selon la nature du carbonate et sa granulométrie.

Les densités au maximum Proctor sont plus grandes pour les matériaux dépourvus ou moins riches en carbonates de calcium. Le phénomène, mis en jeu par leur présence aux teneurs en eaux supérieures à  $w^c$ , semble être une diminution de la déformabilité des argiles. Celles-ci seraient prises dans des assemblages qui réduiraient leur facultés de se déplacer ou de se déformer pour laisser passer les grains du squelette vers les vides non encombrés par la matière solide.

Si nous savons que les carbonates de calcium ont une action, même en faible quantité, sur le comportement des sols compactés, il reste à préciser quelle est la fraction agissante de ces carbonates, la modalité d'action spécifique et d'interaction avec les particules d'argile et les limons. Il semble que les carbonates de calcium ont des effets différents

selon le type d'argile présent. Nous avons vu que la méthode retenue par SOUTY pour déterminer la quantité de  $\text{CaCO}_3 < 2 \mu\text{m}$  ne peut pas être appliquée sur les matériaux du Sundgau. Une méthode de mesure de cette fraction granulométrique devrait être proposée. La méthode de détermination des argiles et des carbonates du calcium reste un problème à résoudre en milieu calcaire et argileux. Une proportion importante d'argile pouvant être combinée, avant décarbonatation, dans des assemblages de la taille des limons, voire des sables, et fausser ainsi les résultats granulométriques.

Nous venons d'étudier le compactage des matériaux originels rencontrés dans le Sundgau. Nous voudrions dans ce qui suit exposer les résultats obtenus à partir du compactage de deux populations d'horizons pédologiques dérivés des matériaux parentaux que nous venons d'étudier.

#### 6.2. - Compactage des horizons $B_t$ développés sur lehms et sur loess récents

Nous voudrions dans ce qui suit aborder un aspect nouveau d'applications de la mécanique des sols afin de quantifier l'homogénéité de deux unités pédologiques vis-à-vis du compactage. Pour ce faire, nous avons prélevé des échantillons d'horizons  $B_t$  des sols lessivés développés sur les lehms anciens et sur les loess récents. La justification de ce choix repose sur le fait que, dans le Sundgau, le niveau pédologique caractérisant au mieux les sols indiqués est l'horizon diagnostique  $B_t$  ; par ailleurs, ces sols ou ceux qui en dérivent sont quantitativement des plus importants dans le périmètre d'étude.

Rappelons que l'horizon  $B_t$  est essentiellement un horizon d'accumulation de l'argile (Chap. II). Ainsi, 4 horizons  $B_t$  des sols lessivés développés sur loess récents (Chap. II 1.4) et 5 horizons  $B_t$  des sols lessivés dégradés (Chap. II 2.1) développés sur lehms ont été prélevés entre 35 et 75 cm de profondeur.

a) Compactage des horizons  $B_t$  des loess récents ( $P_1$  à  $P_4$ )

Les 4 échantillons prélevés sont indiqués  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  et  $P_4$ .

Caractéristiques analytiques (Tab. V.9 et 10).

Les résultats montrent une grande homogénéité granulométrique des horizons compactés. La teneur en argile dépasse 26 %, sa teneur moyenne est de 27,8 %, la teneur maximale étant 29,5 %.

Les valeurs de  $w^c$  dépassent généralement 10 % (Fig. V.5). La moyenne étant 10,75. Le coefficient de proportionnalité  $w^A$  oscille entre 0,35 et 0,39. Les densités au maximum Proctor fluctuent entre 1,60 et 1,63. La moyenne étant 1,62. La teneur en eau du maximum Proctor varie entre 20,2 et 20,7 % d'eau.

La valeur  $w^c$  de  $P_1$  est légèrement supérieure à celle des autres échantillons de la même population ; le taux d'argile ainsi que le taux de matière organique ramené à l'argile, plus élevés en  $P_1$ , peuvent être la cause de la valeur plus élevée de  $w^c$  de cet échantillon.

La valeur du  $w^c$  des  $B_t$  est assez proche de celle du matériau parental. Tout se passe comme si la différence de teneur en argile entre les  $B_t$  et les loess récents avait le même effet sur  $w^c$  que les 30 % de carbonates de calcium présents dans ce loess.

La densité maximale atteinte pour l'énergie développée est dans tous les cas, inférieure à celle du matériau parental. Les teneurs en eau des maximum Proctor sont plus élevées pour les  $B_t$  que pour les loess récents parentaux. Ceci serait une conséquence d'une plus grande richesse des  $B_t$  en argile.

Nous retiendrons que les échantillons compactés semblent présenter une grande homogénéité vis-à-vis du compactage.



Ech.	Granulométrie				Bases échangeables en m.e.q./100 g de terre						MO/A (%)	Fe Deb (%)	Fe tot (%)	Fe Deb/Fe tot (%)	Fe tot/A (%)
	A	L F	L G	S	C.E.C.	Ca	Mg	K	Na						
P <sub>1</sub>	29,5	31,7	36,5	2,3	14,6	13,4	1,98	0,216	0,054	2,6	1,69	3,60	0,4694	12,2	
P <sub>2</sub>	26,1	34,6	37,0	2,3	11,6	8,2	1,51	0,278	0,036	2,5	1,47	3,21	0,4579	12,30	
P <sub>3</sub>	27,3	33,5	36,8	2,4	12,9	10,9	1,82	0,154	0,063	2,2	1,64	3,51	0,4672	12,86	
P <sub>4</sub>	28,3	33,6	36,6	2,4	13,3	11,1	1,91	0,208	0,066	2,01	1,83	3,72	0,4919	13,14	

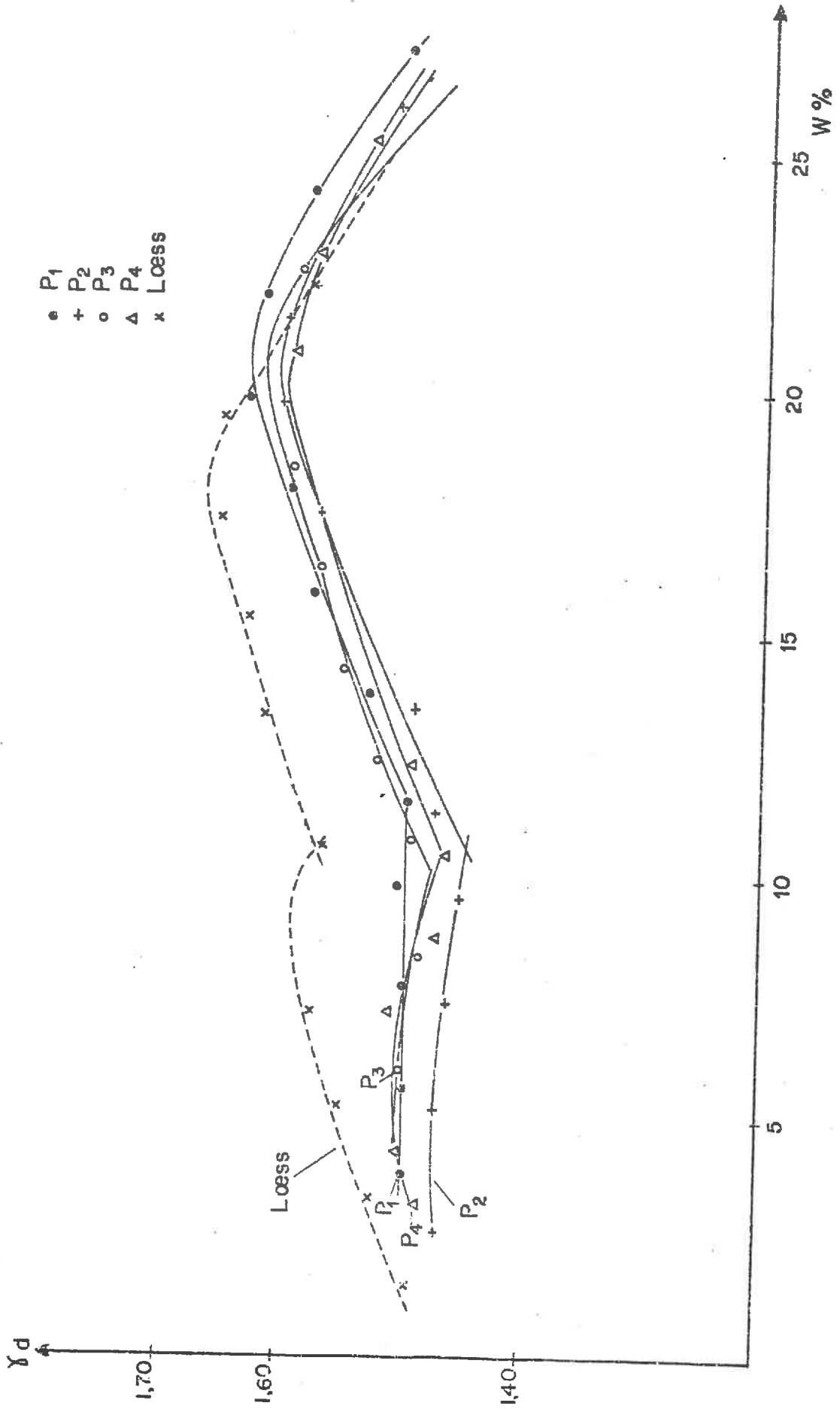
TABLEAU V.9 : Caractéristiques analytiques des échantillons P<sub>1</sub> ; P<sub>2</sub> ; P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>.

	w <sup>c</sup> (%)	γ <sup>d</sup> <sup>c</sup>	M <sub>w</sub> <sup>M</sup> (%)	γ <sup>d</sup> <sup>M</sup>	A <sub>w</sub> <sup>A</sup>	Δγ <sup>d</sup> /Δw (%)	M <sub>w</sub> <sup>M</sup> /A (%)
P <sub>1</sub>	11,5	1,50	20,7	1,63	0,39	1,41	70,17
P <sub>2</sub>	10,3	1,44	20,5	1,61	0,35	1,67	70,45
P <sub>3</sub>	10,0	1,47	20,5	1,62	0,37	1,43	75,09
P <sub>4</sub>	10,4	1,46	20,2	1,60	0,37	1,43	71,38
Loess	10,5	1,57	18,0	1,68	11,5/0,38	1,47	191,4

TABLEAU V.10 : Caractéristiques mécaniques des courbes de compactage des échantillons

P<sub>1</sub> ; P<sub>2</sub> ; P<sub>3</sub> ; P<sub>4</sub> et du loess récent.

Fig. V.5. Courbes Proctor des  $B_t$  sols lessivés sur loess récents.



b) Compactage des horizons  $B_t$  des sols développés sur les lehms anciens (Fig. V.6.)

Il a été vu au chapitre II que les horizons  $B_t$  des sols dégradés présentent une hétérogénéité caractérisée par une marmorisation et une glossification d'intensités variables selon l'importance des facteurs pédogénétiques. Nous proposons d'aborder dans l'étude l'influence de cette hétérogénéité dans le comportement du compactage de ces horizons.

Les échantillons ont été prélevés à une profondeur de 50 cm ( $\pm 10$  cm) et sont indiqués  $V_3$ ,  $V_4$ ,  $V_5$ ,  $V_6$  et  $V_7$ .

Caractéristiques analytiques (Tab. V.11 et 12)

La teneur moyenne en argile est de 22,3 %, les valeurs extrêmes étant 21,9 et 22,8 %. Les  $B_t$  des lehms sont donc moins riches en argile que ceux des loess. La teneur en matière organique reste inférieure à 0,5 % pour tous les échantillons (Tab. V.11).

Les valeurs des  $w^C$  sont regroupées autour de 7,7 avec des extrêmes de 7,5 et 7,8 %.  $w^C$  fluctue peu autour de la moyenne 0,34 (Tab. 12). Compte-tenu de la constitution des échantillons, les valeurs de  $w^C$  et de  $w^A$  nous paraissent satisfaisantes.

Les  $B_t$  des sols lessivés dégradés sont homogènes au niveau  $w^C$  et  $w^A$ . Au-delà de  $w^C$ , ils présentent une certaine hétérogénéité. En fait, à partir de  $w^C$ , il semble se dessiner deux types de comportement : l'un est constitué par deux échantillons ( $V_3$  et  $V_4$ ) qui paraissent se compacter nettement plus et pour de moindres quantités d'eau au maximum Proctor que les trois autres échantillons. Les autres données analytiques étant sensiblement du même ordre de grandeur pour les cinq échantillons, le rapport Fer total/Argile semble être le seul élément discriminant. Ce rapport est moins élevé pour l'un des deux groupes d'échantillons ( $V_3$  et  $V_4$ ). Nous émettons l'hypothèse selon laquelle les particules d'argiles des deux sous-populations,  $V_3$ ,  $V_4$  d'une part, et  $V_5$ ,  $V_6$ ,  $V_7$  d'autre part, n'ont pas les mêmes propriétés. Dans un cas,  $V_5$ ,  $V_6$  et  $V_7$  les particules argileuses seraient prises dans un assemblage type domaines (TESSIER) peu accessibles à l'eau et dont les forces de cohésion seraient supérieures à

	A (%)	L.F (%)	L.G (%)	S (%)	CEC*	Ca m.e.q.	Mg m.e.q.	K m.e.q.	Na m.e.q.	MO/A (%)	Fe Deb (%)	Fe tot. (%)	Fe Deb (%) / Fe tot.	Fe tot. / A (%)
V <sub>3</sub>	22,1	46,4	29,5	2,0	10,7	8,4	1,68	0,095	0,064	1,86	2,03	3,63	55,9	16,43
V <sub>4</sub>	22,8	43,6	32,1	1,5	11,0	12,9	1,98	0,099	0,069	1,89	2,01	3,76	53,5	16,49
V <sub>5</sub>	22,3	44,2	31,8	1,7	11,4	9,7	2,12	1,127	0,071	1,66	2,04	3,93	51,91	17,62
V <sub>6</sub>	22,7	44,5	31,0	1,8	11,3	8,8	1,95	0,130	0,045	2,20	1,95	3,81	51,18	16,78
V <sub>7</sub>	21,9	46,5	29,7	1,9	11,7	11,1	1,85	0,094	0,065	1,51	2,05	3,96	51,77	18,08

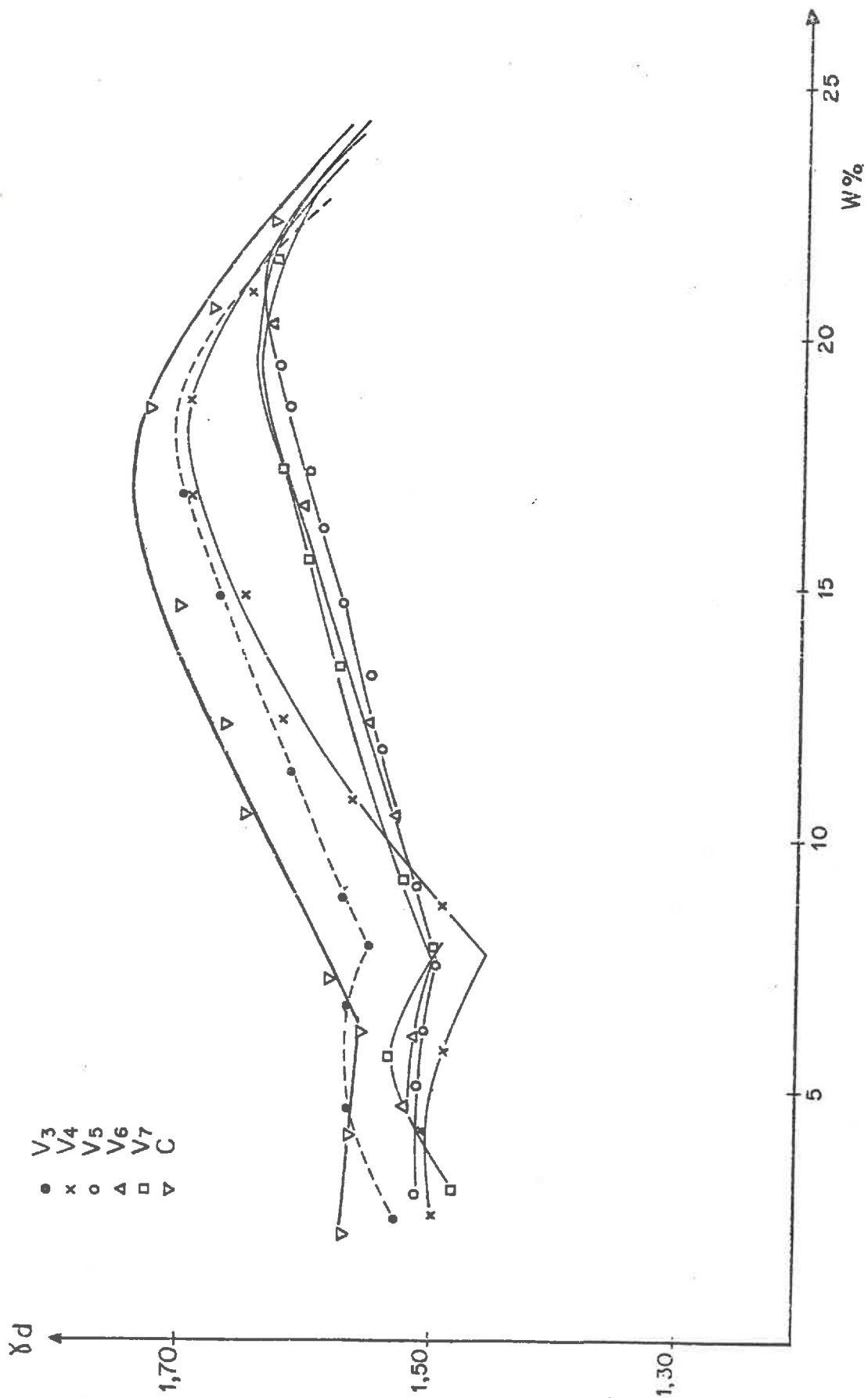
TABLEAU V.11 : Caractéristiques analytiques des échantillons V<sub>3</sub> ; V<sub>4</sub> ; V<sub>5</sub> ; V<sub>6</sub> et V<sub>7</sub>

\* m.e.q./100g de terre.

	w <sup>c</sup>	γ d <sup>c</sup>	w <sup>M</sup>	γ d <sup>M</sup>	w <sup>A</sup>	Δγd/Δw	M <sup>M</sup> /A
V <sub>3</sub>	7,8	1,55	18,5	1,71	0,35	1,50	83,71
V <sub>4</sub>	7,7	1,45	18,0	1,69	0,34	2,33	78,95
V <sub>5</sub>	7,7	1,49	21,0	1,64	0,34	1,08	94,17
V <sub>6</sub>	7,8	1,50	19,5	1,64	0,34	1,20	85,90
V <sub>7</sub>	7,5	1,50	20,0	1,64	0,34	1,12	91,32
Lehms anciens	6,1	1,56	18,0	1,74	0,36	1,51	105,9

TABLEAU V.12 : Caractéristiques mécaniques des courbes de compactage des échantillons V<sub>3</sub> ; V<sub>4</sub> ; V<sub>5</sub> ; V<sub>6</sub> ; V<sub>7</sub>

Fig. V.6. Courbes Proctor des  $B_t$  des sols lessivés dégradés.



l'énergie Proctor utilisée. Ces particules plus ou moins rigides, ne pourraient de ce fait jouer le rôle d'agent lubrifiant, ni glisser pour combler les vides intersquelettiques. D'où une densité plus lâche. Dans l'autre cas, les particules argileuses seraient plus libres à la fois pour se déplacer et enfin, aboutir à une plus grande densification de l'échantillon compacté.

Il a été noté lors du prélèvement d'échantillons que  $V_5$ ,  $V_6$  et  $V_7$  étaient plus marqués par l'hydromorphie que  $V_3$  et  $V_4$ . La stagnation plus prolongée d'une nappe temporaire pourrait alors être à l'origine d'une accumulation plus importante de fer.

En conclusion d'une étude expérimentale, PEDRO et Al. (1976) notaient que l'adjonction de fer favorise l'isotropie et l'organisation tridimensionnelle d'un matériau kaolinique, et diminue l'activité colloïdale des argiles. Le double rôle de ciment et de flocculant du fer vis-à-vis des particules argileuses a été montré par de nombreux auteurs LUTZ (1936) ; FORDHAM (1973) et WAKATSUKI et Al. (1975). Les échantillons  $V_5$ ,  $V_6$  et  $V_7$ , plus riches en fer que  $V_3$  et  $V_4$ , voient leur densité  $\gamma_d^M$  diminuée et la teneur en eau en ce point augmentée. La sensibilité au compactage, caractérisée par  $\frac{\Delta \gamma_d}{\Delta w}$ , est plus marquée pour  $V_3$  et  $V_4$ . Ainsi, ce rapport serait lié à la structure initiale du matériau.

Comparées au matériau parental (LEH), on constate que les densités au seuil de sensibilité au compactage et au maximum Proctor sont plus élevées pour LEH. Les teneurs en eau en ces points sont inférieures pour ce matériau. Cette situation résulterait de la différence du taux, de la nature et de l'état des argiles.

Les  $B_t$  issus des loess paraissent assez homogènes dans leur comportement au compactage. Les valeurs de  $w^A$ , proches de 0,34, paraissent compatibles avec la constitution des matériaux concernés. Les  $B_t$  des sols lessivés dégradés des lehms anciens sont homogènes quant aux populations. Pour tenter d'expliquer cette différenciation, nous évoquons l'hypothèse selon laquelle l'organisation des argiles serait différente dans les deux cas observés en raison du rôle attribué aux oxydes de fer en particulier.

La sensibilité au compactage, sc, différente pour  $V_3$ ,  $V_4$  d'une part, et  $V_5$ ,  $V_6$  et  $V_7$  d'autre part, serait liée à la structure initiale des matériaux.

En somme, les résultats précédents conduisent à penser que les deux populations ont des comportements assez homogènes et bien différenciés. Outre l'allure des courbes, ceux des paramètres déterminés qui permettent de caractériser les deux unités étudiées sont :

TABLEAU V.13.

	$w^c$	$w^A$	$\gamma_d^M$	$w^M/A$
$B_t$ /loess	10,6	0,37	1,61	71,8
$B_t$ /lehms	7,7	0,34	1,66	86,8

Valeurs moyennes des  $B_t$  des sols lessivés et des sols dégradés

Compte-tenu de la densité apparente en place des  $B_t$  des loess récents et des lehms anciens, on doit s'attendre à une compacité in situ s'ils subissent une énergie du même niveau que celle mise en jeu par le procédé Proctor.

### 6.3. - Le compactage des horizons superficiels du Sundgau

Lors des relevés pédologiques, nous avons prélevé sur une profondeur allant de 0 à 35 cm un certain nombre d'échantillons en vue de caractériser le comportement au compactage des horizons superficiels. Le compactage a été réalisé au laboratoire de la station I.N.R.A. de Colmar.

Parmi les caractéristiques essentielles des horizons A du Sundgau, intéressant leur comportement au compactage, nous évoquerons leur faible teneur en argile et leur plus grande teneur en matière organique (Tab. V.14). Les vingt échantillons intéressés sur limons et concernent aussi bien les sols brun calciques que les sols dégradés.

TABLEAU V.14.

PROFILS	HORIZONS	A %	L F %	L G %	MO %	MO/A %	C.E.C. m.g.d./100g de terre sèche	Ca	Mg	Ka	Na	S/T	pH eau
72	Ap	15,9	46,3	32,0	3,13	19,69	10,3	5,7	0,57	0,755	0,084	69,02	5,8
	B et Ag	20,7	43,9	30,0	1,28	6,18	9,3	4,9	1,01	0,135	0,043	65,46	5,5
353	Ap	14,9	37,7	42,0	1,71	11,96	9,0	6,7	0,96	0,107	0,045	86,8	5,6
237	Ap	13,5	41,0	42,6	1,71	12,67	8,5	6,1	0,82	0,385	0,030	86,29	6,0
165	A et B	20,9	44,4	25,9	0,57	2,73	10,5	6,9	1,81	0,098	0,068	84,54	5,7
	Ap	14,4	44,3	32,2	2,49	17,29	9,8	5,7	0,81	0,287	0,029	69,25	5,6
80	A 31	18,5	43,7	31,0	0,48	2,59	8,5	5,4	1,17	0,151	0,041	79,55	5,9
	Ap	18,1	39,2	36,8	1,46	8,07	10,5	7,7	1,45	0,379	0,032	91,06	6,0
437	Ap	14,0	37,4	44,2	1,37	9,79	8,2	5,0	0,81	0,107	0,063	72,93	5,2
187	Ap 1	14,1	38,1	44,8	1,74	12,34	8,3	6,0	0,83	0,519	0,036	88,98	6,0
	Ap 2	19,2	37,2	41,2	1,11	5,84	9,3	5,7	1,11	0,403	0,030	77,88	5,5
261	Ap	14,0	39,6	41,9	1,63	11,64	9,0	6,1	0,90	0,237	0,031	80,76	5,5
47	Ap	10,8	42,6	41,3	1,38	12,78	7,2	4,3	0,68	0,296	0,023	73,46	5,9
	A 2	14,3	43,0	37,4	0,38	2,66	6,9	4,4	0,95	0,135	0,032	79,96	6,2
102	Ap	11,2	44,1	40,6	1,91	17,05	7,4	3,1	0,51	0,089	0,036	50,47	5,0
	A 2	10,4	43,4	42,4	1,0	9,62	6,4	2,8	0,49	0,063	0,029	52,84	5,2
	A 3	17	42	34	0,81	4,76							
182	Ap 2	21,2	36,8	49,2	2,30	10,85	12,6	-	1,03	0,185	0,068	S	8
106	Ap	16,9	36,2	28,9	1,94	11,48	9,5	6,0	0,73	0,104	0,039	72,35	5,6
38	Ap	17,1	42,4	33,	4,42	25,85	11,1	3,4	0,51	0,267	0,060	38,17	4,9



Les horizons A du Sundgau sont généralement appauvris en argiles ; toutefois, le relief plus accidenté, surtout dans le secteur des lehms anciens (sud-ouest), se prête à une action plus intense de l'érosion. De ce fait, les horizons de surface peuvent, en position de pente, être davantage argileux.

#### Discussion et conclusion

La teneur moyenne en argile des horizons Ap étudiés est de 14,6 % (Nombre d'échantillons = 15 ; Ecart type = 2,7). Il sont plus pauvres en cet élément que les lehms anciens, les B<sub>t</sub> qui en dérivent et ceux dérivant des loess récents. Les horizons A<sub>3</sub> et A et B sont plus riches en argiles que les Ap. Globalement, la texture des couches superficielles est celle des limons légers à moyens.

Le taux de matière organique des horizons superficiels varie entre 0,4 et 4,4 %, avec comme valeur moyenne 1,6 %. Rapportées à l'argile, les proportions de la matière organique fluctuent entre 5,84 et 25,8 %. Généralement, les sols cultivés du Sundgau sont assez pauvres en matière organique.

L'observation globale des courbes Proctor (Fig. V.7) permet de faire un certain nombre de constatations. La fourchette d'humidité dans laquelle les sols étudiés rentrent en phase de plus grande sensibilité au compactage se situe entre 6 et 11,5 %. Les densités  $\gamma_d^c$  en ces points varient entre 1,29 et 1,59 (cf tableau).

Il se dégage trois grandes familles de courbes :

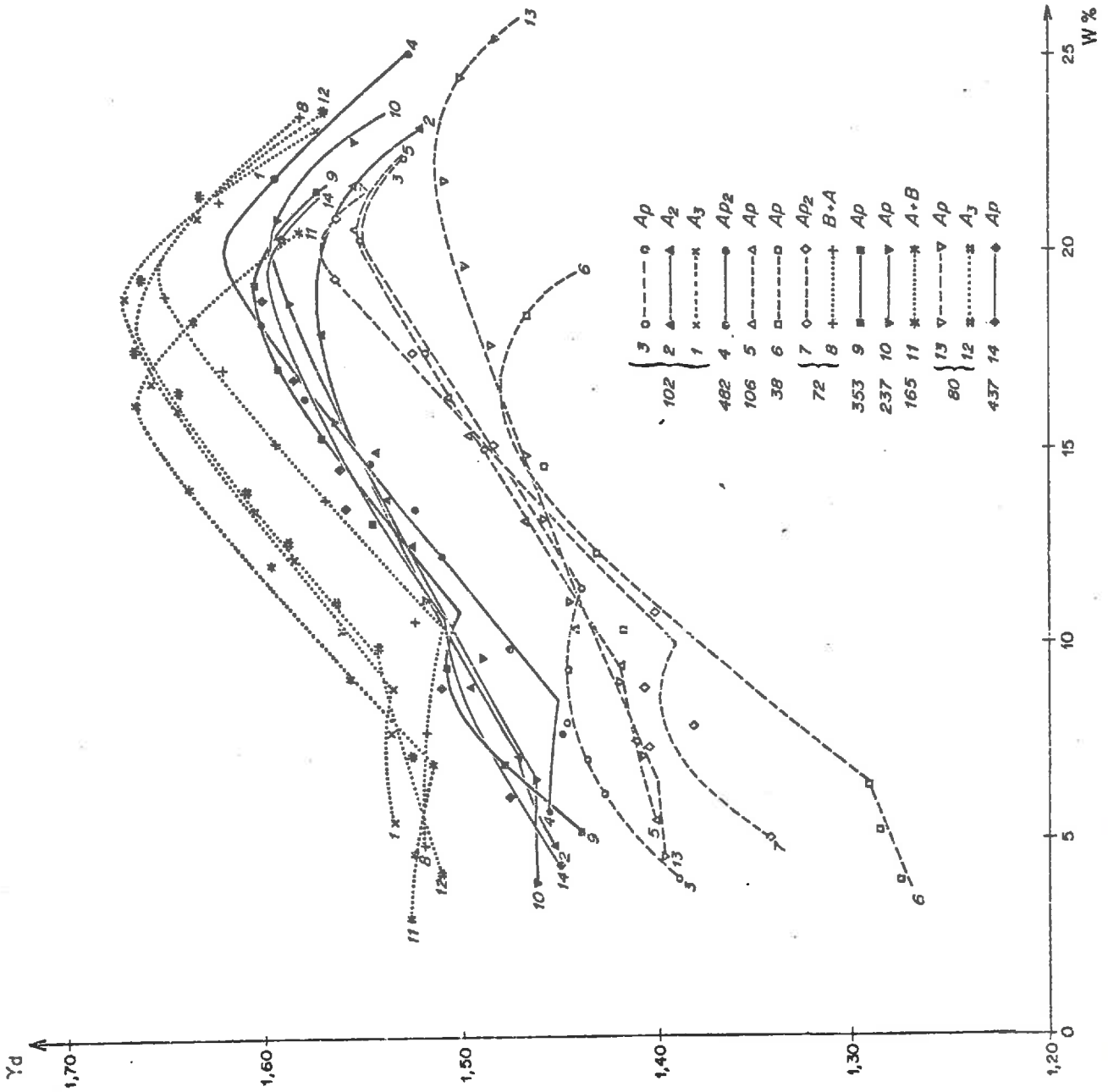
- celles qui se compactent très peu  $\gamma_d^M < 1,55$
- celles qui se compactent moyennement  $1,5 < \gamma_d^M < 1,60$
- celles qui se compactent nettement plus que les 2 catégories précédentes  $\gamma_d^M > 1,60$ .

La première catégorie de courbes représente les horizons Ap de profils 38, 72, 106 et 80. La teneur en argile de tels horizons est comprise entre 11,2 et 17,1 %. Leur rapport MO/A varie entre 11,48 et 25,85 %. Les 4 échantillons appartiennent à des sols dégradés sur lehms anciens et se situent à proximité des bois.

TABLEAU V.15.

N°	HORIZONS	w <sup>c</sup>	γ <sup>d</sup> <sup>c</sup>	M <sub>w</sub> <sup>M</sup>	γ <sup>d</sup> <sup>M</sup>	A <sub>w</sub> <sup>A</sup> exp	A <sub>w<sup>c</sup></sub> <sup>A</sup> *
72	Ap B et A /	10,0	1,39	20,2	1,53	0,63	0,57
		10,5	1,41	19,4	1,65	0,51	0,36
353	Ap	10,8	1,50	19,2	1,60	0,72	0,45
237	Ap	6,6	1,46	20,5	1,59	0,49	0,46
165	A et B	9,8	1,52	19,1	1,66	0,46	0,31
80	Ap A 31	6,5	1,40	19,7	1,52	0,45	0,53
		7,5	1,51	18,3	1,66	0,40	0,31
431	Ap	10,5	1,50	19,5	1,61	0,58	0,39
437	Ap	10,5	1,51	19,2	1,60	0,75	0,42
187	Ap 1 Ap 2	8,4	1,46	18,2	1,59	0,60	0,45
		8,2	1,52	18,9	1,65	0,43	0,35
261	Ap	6,3	1,44	19,5	1,58	0,45	0,45
47	Ap A 2	7,8	1,51	19,2	1,60	0,72	0,46
		8,5	1,59	16,7	1,69	0,59	0,31
102	Ap A 2 A 3	11,5	1,44	20,5	1,55	1,03	0,53
		7,2	1,48	19,0	1,57	0,68	0,42
		8,8	1,54	18,2	1,67	0,52	0,34
182	Ap 2	8,5	1,45	20,0	1,62	0,40	0,43
106	Ap	9,5	1,42	21,0	1,55	0,56	0,44
38	Ap	11,5	1,29	21,7	1,48	0,67	0,66

\* w<sub>w<sup>c</sup></sub><sup>A</sup> = 1,52  $\frac{M0}{A}$  + 27 (r = 0,84).



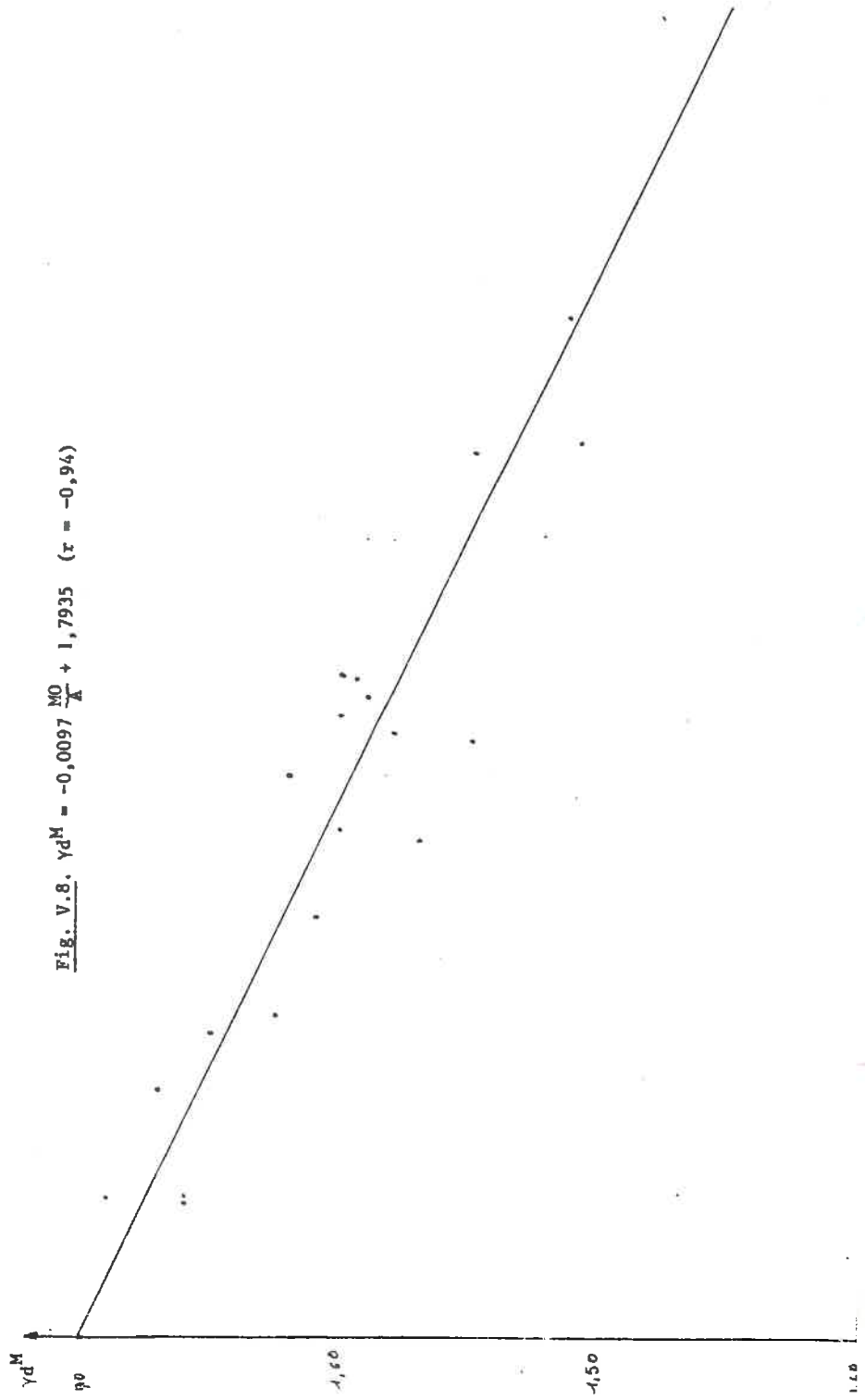


Fig. V.8.  $Y_d^M = -0.0097 \frac{M0}{X} + 1.7935$  ( $r = -0.94$ )

La seconde catégorie de courbes est effectivement la plus importante. Le taux d'argile y varie entre 10,4 et 18,1 %. Le rapport MO/A est compris entre 7,8 et 12,8 %.

La troisième famille de courbes représente les horizons Ap<sub>2</sub>. La teneur en argile varie entre 14,5 et 20,4 %. Les valeurs du rapport MO/A sont comprises entre 5,8 et 2,7 %.

Ce résultat montre que le tassement des sols croît avec la diminution du rapport MO/A. Nous rejoignons ainsi les travaux d'autres auteurs (BRADFIELD 1937 ; FREE et Al. 1948 ; MONNIER 1965, 1973 ; SOANE et Al. 1970, 1972 ; GUERIF et FAURE 1977, 1979) montrant la variation opposée du tassement du sol et de la matière organique.

Le rôle de la matière organique sur la densification des sols pourrait être attribué aux effets de celle-ci agissant seule ou en combinaison avec les argiles, et, semble-t-il aussi, avec les limons. Les courbes font apparaître aussi qu'il existe une valeur seuil du rapport  $\frac{MO}{A}$  en deçà duquel l'influence de la matière organique est réduite. La valeur se situerait autour de 4 % pour les sols superficiels du Sundgau.

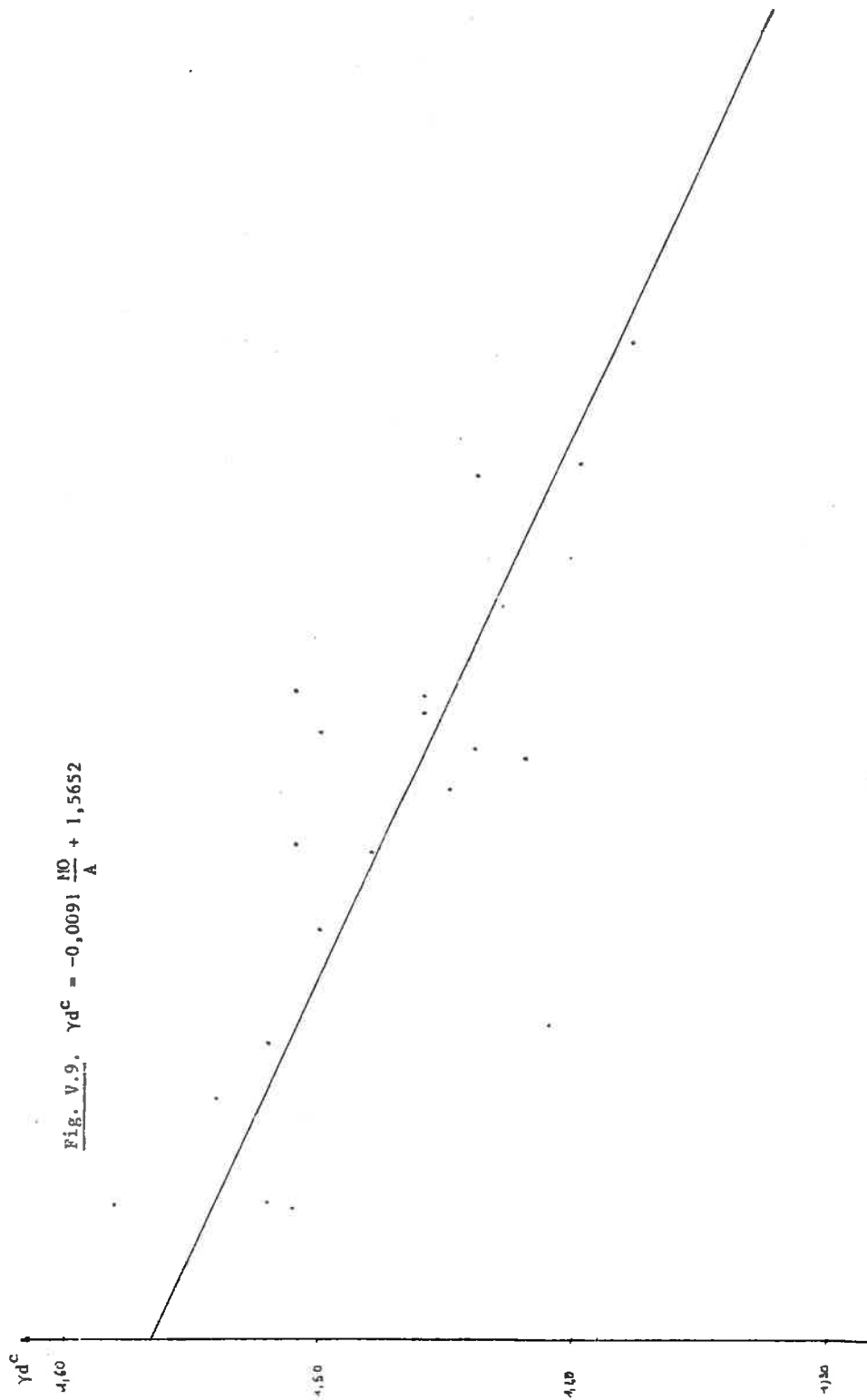
Nous établissons pour les sols limoneux superficiels du Sundgau une relation entre la densité au maximum Proctor et le rapport  $\frac{MO}{A}$ , qu'on peut exprimer :

$$\gamma_d^M = -0,0097 \frac{MO}{A} + 1,7035 \quad (N = 23 \text{ éch. ; } r = 0,94) \quad (\text{Fig. V.8})$$

Nous obtenons pour les mêmes échantillons une relation entre la densité au seuil de sensibilité au compactage et le rapport évoqué :

$$\gamma_d^C = -0,0091 \frac{MO}{A} + 1,57 \quad (r = -0,83) \quad (\text{Fig. V.9})$$

La diminution de  $\gamma_d^C$  Proctor avec le rapport  $\frac{MO}{A}$  s'expliquerait par une agrégation accrue par l'augmentation du taux de matière organique. Aussi, les sols moins riches en cette substance voient-ils leur  $\gamma_d^C$  augmenter. FORSTER (Fig. V.3.) ; GRIMALDI (1977) ont obtenu des densités au point de sensibilité au compactage plus élevées pour des échantillons



constitués d'agrégats de moindre taille. Ces résultats nous permettent donc de considérer que  $\gamma d^C$  est dépendant de la structure initiale du sol.

Lorsque l'on reporte les valeurs de  $\gamma d^M$  en abscisse et celles de  $\gamma d^C$  en ordonnées, on constate que les points s'alignent de part et d'autre d'une droite d'équation  $\gamma d^M = 1,0025 \gamma d^C + 0,1278$  (Fig. V.10). Le coefficient de corrélation est hautement significatif ( $r = 0,83$ ).

Une analyse plus détaillée des résultats rend compte d'un certain nombre de points intéressants à signaler. Ainsi, constatons-nous que le  $w^A$  expérimental est toujours supérieur aux valeurs théoriques. On est en droit de penser qu'une partie de l'eau nécessaire à la saturation des argiles aurait été détournée par d'autres substances actives et/ou que les liaisons argiles=autres substances seraient suffisamment fortes pour résister à l'énergie type Proctor jusqu'à une teneur en eau critique. On aurait par conséquent  $w^A$  expérimental =  $w^A$  théorique +  $\Delta w$ .

Parmi les substances autres que l'argile pouvant agir sur la valeur de  $w^C$ , nous avons signalé les carbonates, la matière organique et les hydroxydes. Dans le cas présent, les échantillons compactés ne renferment pas de carbonate de calcium, et nous supposons que l'action des hydroxydes est limitée. En admettant cette hypothèse,  $\Delta w$  résulterait essentiellement de l'action de la matière organique. FAURE note que l'influence de cette dernière sur  $w^A$  est très importante au-delà d'un certain seuil

GUERIF et FAURE (1979) ont établi à partir d'une gamme de matériaux de composition granulométrique différente, allant des sables aux argiles, la corrélation :  $w^A = 1,52 \frac{MO}{A} + 27,00$ . L'ensemble des  $w^A$  expérimentaux que nous obtenons sont globalement supérieurs à ceux que donnerait la relation citée (Tab. V.14). La divergence des résultats pourrait provenir de la nature des matériaux et de la qualité de la matière organique. Par conséquent, les relations établies entre les points caractéristiques des courbes Proctor et les paramètres analytiques (M.O. ; Argile) sont valables pour les horizons A de texture limoneuse. Les résultats de notre étude seront essentiellement valables à l'échelle locale du Sundgau, mais pourraient être extrapolés à d'autres terroirs dont les sols présentent la même texture.

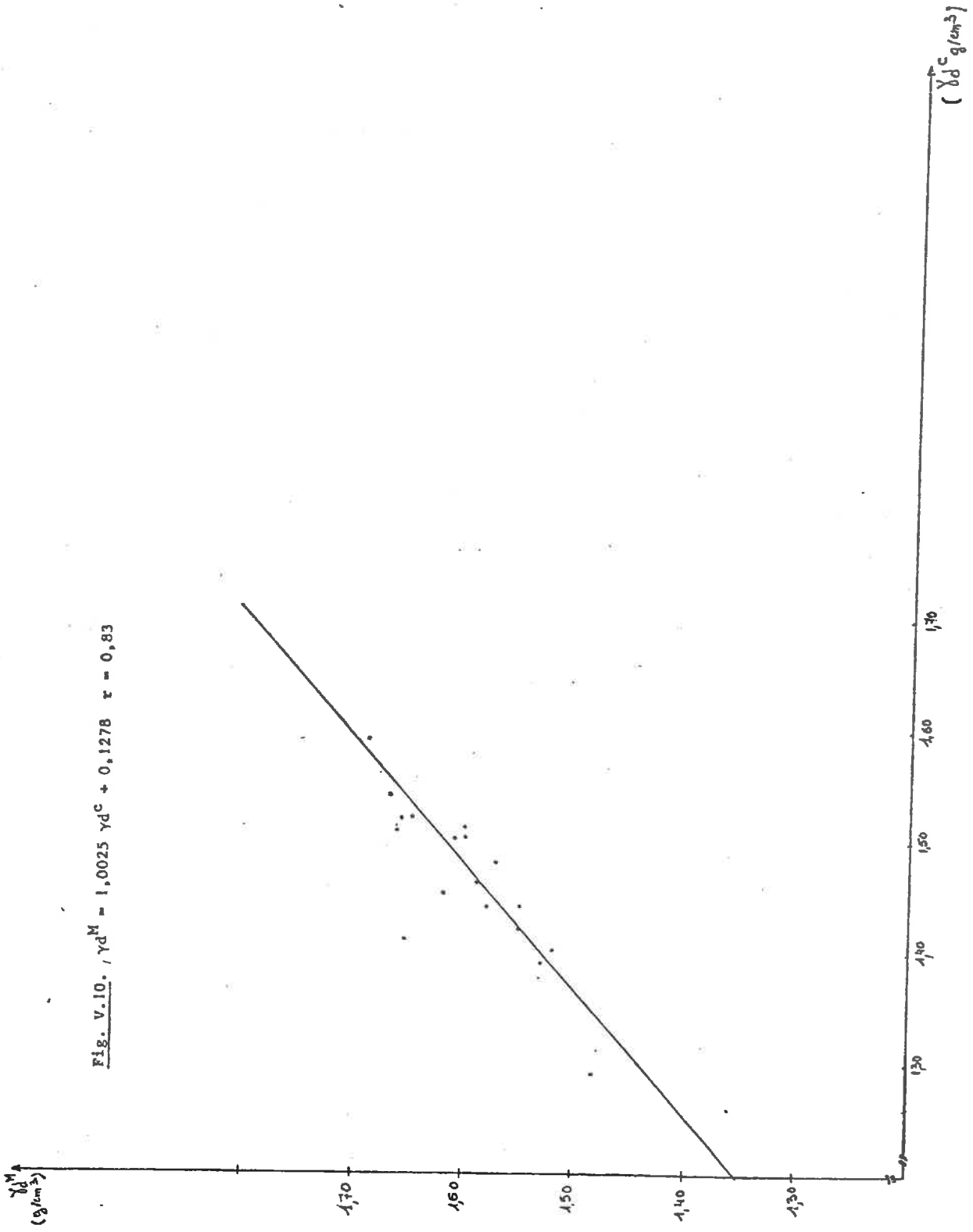


Fig. V.10.  $\gamma_d^M = 1.0025 \gamma_d^C + 0.1278$   $r = 0.83$



Si nous notons que  $w^A$  augmente généralement avec le rapport  $\frac{MO}{A}$ , nous ne pourrions pas précisément expliquer l'irrationalité de cette relation, sinon par la nature de la matière organique présente. Pour avoir une approche plus fine de l'influence de celle-ci sur le comportement des matériaux naturels de granulométrie et minéralogie connues, faudra-t-il connaître les proportions des fractions libre et lié ainsi que les propriétés hydriques et mécaniques de chacune d'entre elles.

Sans que l'on puisse tirer des conclusions généralisables à partir du rapport  $\frac{MO}{A}$ , celui-ci semblerait prépondérant et masquerait l'influence des autres facteurs agissant sur le compactage des horizons étudiés.

Les horizons  $A_2$  et  $A_3$  sont, parmi les échantillons étudiés, les plus sensibles au compactage. Ce comportement découle de leur moindre richesse en argile et/ou en matière organique par rapport aux  $A_p$ .

Lors de l'exécution d'un labour, les horizons  $A_2$  et  $A_3$  sont généralement plus humides que les  $A_p$ . Durant cette opération culturale, deux roues du tracteur roulent directement sur le sommet ou dans les horizons  $A_2$  et  $A_3$ . Par ailleurs, nous savons que le glissement des pneus du tracteur, et donc le risque de tassement du sol, augmente, du moins jusqu'à un certain seuil, avec l'humidité de celui-ci. La compacité de ces horizons est particulièrement "génante" compte tenu de leur composition minérale. En effet, le taux et la nature de l'argile (gonflement-retrait) ne permettront pas une réversibilité rapide du phénomène. Pour atténuer le risque de tassement de tels niveaux, il faudrait réduire le nombre de passages des tracteurs et éviter les labours profonds, surtout printaniers. Des techniques de décompactage (à sec) peuvent contribuer à réduire la compacité des sols.

D'un point de vue application, compte tenu du rôle important joué par la matière organique et de sa variabilité tant quantitative que qualitative, il s'avère difficile d'établir une carte thématique de sensibilité au compactage des horizons superficiels. Nous évoquerons (chap.VI.1) les problèmes soulignés pour une telle réalisation.

### Remarques particulières

Très souvent, à des teneurs en eau proches de 20 % inférieures à  $w^M$ , nous obtenons un point de densité inférieure à celle qu'il devrait avoir pour être sur la courbe Proctor (Fig. V.11). Bien que cet écart soit faible, sa persistance sur les courbes de compactage mériterait une étude approfondie. La présence de ce point pourrait être attribuée soit à l'eau, soit au solide. Dans un cas, il pourrait s'agir d'une modification des propriétés de l'eau au delà d'un seuil de teneur en eau. Dans l'autre cas, il s'agirait d'un changement de comportement des derniers agrégats qui se mettraient à absorber de l'eau (d'où diminution de  $\gamma_d$ ) avant leur éclatement (d'où augmentation de  $d$ ):

Il conviendrait de chercher comment se transforme l'équation  $\gamma_d = f\left(\frac{MO}{A}\right)$  pour différentes classes granulométriques.

Il serait souhaitable, pour les mécaniciens des sols, de connaître non seulement la quantité mais aussi la qualité de la matière organique. Il faudrait aussi connaître la variation des propriétés hydriques en fonction de leur taux.

Enfin, pour mettre en évidence l'incidence de la pédogenèse sur le tassement des sols, il conviendrait :

- de s'affranchir de l'influence de la matière organique, facteur trop dépendant de l'activité agricole,
- d'effectuer un échantillonnage beaucoup plus important que celui que nous avons effectué.

$S_c$  caractérise la susceptibilité au compactage des sols. Toutefois, il ne traduit pas la valeur de la compacité maximale ni le domaine d'entrée en phase de plus grande compacité ( $w^c$ ). En effet, des sols ayant un même  $S_c$  peuvent atteindre des densités ( $\gamma_d^M$ ) différentes et avoir des  $w^c$  différents. Or, ces deux paramètres importent pour classer les sols en fonction de leur comportement au compactage. Il est donc nécessaire d'en tenir compte. D'où la nécessité d'utiliser un indice synthétique :

$$S_s = S_c \frac{\gamma_d^M}{w^c}$$

Celui-ci présente l'avantage d'intégrer l'ensemble des points particuliers de la courbe Proctor ( $S_c$ ,  $w^c$  et  $\gamma_d^M$ ).

- T R O I S I È M E P A R T I E -



DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES

CHAPITRE VI : Documents cartographiques.

## VI - DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES

---

### INTRODUCTION

Pour répondre aux différents types de questions qui se posent à l'aménageur, il convient de lui fournir sous forme cartographique les informations sur le milieu physique qui lui permettent (à partir des caractéristiques de laboratoire), par exemple :

- De choisir le site dont le comportement est compatible avec l'activité qu'il souhaite développer.
- De mieux répartir les activités humaines (S.D.A.U. ; P.A.R. ; P.O.S...).

Quand le pédologue réalise sa carte de sols, il établit une hiérarchisation de l'information qui n'est pas nécessairement celle qu'il utiliserait pour répondre à un problème particulier. C'est pourquoi, nous avons établi des cartes monofactorielles où sont utilisées des valeurs seuils plus pertinentes dans une optique géotechnique :

- Carte des matériaux (hors texte 1)
- Carte des pentes (hors texte 2)
- Carte de susceptibilité au compactage (hors texte 4)
- Carte d'hydromorphie (hors texte 5).

Cependant, autant ces cartes conviennent dans les cas les plus habituels où les prises de décisions se font sur des thèmes précis et bien localisés dans l'espace (réalisation d'une route...), autant il convient de fournir une carte synthétisant tous ces éléments quand il s'agit de réaliser des schémas d'aménagement (carte de synthèse, hors texte 6).

Tous les documents cartographiques ont été élaborés à l'échelle du 1/25 000<sup>e</sup>.

## 1. - CARTE DES MATERIAUX PARENTAUX ET LEURS APTITUDES GEOTECHNIQUES

Nous entendons par matériaux parentaux celles des formations à partir desquelles se développent les profils pédologiques.

L'utilité de la carte est double :

- elle sert à juger de l'aptitude des terrains à supporter des fondations,
- elle permet de localiser les matériaux utiles pour la construction ou la fabrication de produits industriels.

### 1.1. - Reconnaissance des matériaux

Plus de 650 sondages pédologiques nous ont d'abord permis d'avoir une idée globale de la répartition des matériaux. Cependant, un inconvénient majeur de ce type de sondage réside dans le fait qu'il n'atteint pas toujours le matériau originel ; la tarière utilisée ne permet l'observation que jusqu'à 1,20 m de profondeur. C'est ainsi que l'exploitation de près de 200 sondages profonds nous a permis de préciser la nature des matériaux. Il en est résulté l'élaboration d'une carte des matériaux.

L'examen de la carte hors texte 1 permet de constater que six matériaux de nature et de propriétés différentes ont été inventoriés. On y distingue : les marnes, les cailloutis du Sundgau, les lehms anciens, les vieux loess, les loess récents et les produits de remaniements (Chap. I).

### 1.2. - Quelques considérations sur l'aptitude aux fondations

L'interprétation des résultats d'essais mécaniques pour des fins géotechniques doit être prudente, à cause de l'hétérogénéité des formations et des erreurs imputables aux conditions expérimentales. Par conséquent, il serait souhaitable de procéder à une étude fine de terrain pour déceler l'importance des hétérogénéités, la nature et le sens de l'écoulement d'éventuelles nappes d'eau, ainsi que la présence des fentes d'écoulement préférentiel de l'eau au travers du matériau.

Un aspect important lié à la construction est le ruissellement intense qu'elle occasionne par l'imperméabilisation partielle ou totale des sols. Celle-ci est fonction de la densité des habitations, de l'importance de la voirie. Deux conséquences majeures peuvent être induites par cette imperméabilisation des sols. L'une serait l'intensification de l'impact de l'érosion hydrique, l'autre serait la réduction de l'alimentation hydrique des nappes. Une technique de plus en plus mise en oeuvre pour remédier aux problèmes engendrés par l'imperméabilisation des sols consiste à mettre en place des plans d'eau régulateurs.

### 1.3. - Les marnes et leurs aptitudes géotechniques

Nous avons fait état au chapitre IV de l'hétérogénéité granulométrique et minéralogique de cette formation. La marne non contaminée renferme 95 % de particules de taille inférieure à 50  $\mu\text{m}$ , alors que les passages sableux peuvent n'en contenir que très peu.

La densité apparente sèche varie avec la composition granulométrique, la profondeur de prélèvement et le degré de fissuration de la marne. La valeur moyenne est 1,80  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Le degré de saturation est proche de 100 %. Le coefficient de perméabilité K de la marne non fissurée est  $1,2 \cdot 10^{-10}$  m/s. Dans cet état, elle est très peu perméable.

Les qualités mécaniques de la marne sont amoindries par son hétérogénéité granulométrique, par sa fissuration et par son degré d'altération quand elle affleure. On pourrait, par conséquent, y craindre des circulations d'eau et des tassements différentiels.

Le dessèchement en fond de fouille pourrait y entraîner des retraits et des fissurations de ce matériau argileux. Il faudrait donc éviter l'exposition prolongée à l'air des fonds de fouilles établis sur marnes. Il est déconseillé de creuser des puits sous les fouilles lorsque celle-ci traverse des couches sableuses qui, par boulanges, peuvent endommager sinon, compromettre la construction.

Il semble important d'éviter de construire des maisons d'habitation ou des voies de circulation sur marne en position de pente, car des déplacements par glissement y sont fréquents.

Les marnes du Sundgau sont exploitées à des fins industrielles. Elles sont mélangées aux limons pour la fabrication des tuiles, briques et divers produits de terre cuite. Nous reviendrons en fin de chapitre sur les problèmes liés à cette exploitation.

#### 1.4. - Les cailloutis du Sundgau et les problèmes géotechniques liés à la formation qu'ils constituent

Les cailloutis plio-quadernaires recouvrent les marnes d'une partie des départements du Haut-Rhin et du territoire de Belfort.

Comme les marnes, les cailloutis apparaissent généralement sur pente forte. Les surfaces concernées par l'affleurement des cailloutis sont très limitées. Nous n'avons pas fait d'étude géotechnique particulière sur cette formation, néanmoins, nous savons que les galets qui la constituent sont très altérés puisqu'ils se désagrègent sous la simple pression des doigts. Nous retiendrons que cette formation pourrait subir sous faible contrainte un tassement important.

D'autres problèmes géotechniques sont liés aux cailloutis, tels le creusement de tranchées et la stabilité des conduites souterraines. La proximité de la marne sous-jacente y fait redouter les problèmes liés à une stagnation prolongée de l'eau.

#### 1.5. - Les lehms anciens et leurs aptitudes géotechniques

Les lehms anciens recouvrent les cailloutis du Sundgau et occupent les surfaces du Sud-Ouest du périmètre. Les caractéristiques physiques et mécaniques de cette formation ont été évoquées au chapitre IV. Elles ne seront pas reprises ici.

Plusieurs problèmes géotechniques importants paraissent liés à cette formation :

- L'un est lié à la compacité naturelle du matériau qui s'oppose à la circulation rapide de l'eau ( $K \approx 7,8 \cdot 10^{-7}$  m/s). De ce fait, il en résulte une hydromorphie marquée, aggravée par la proximité du plancher imperméable ou par une position topographique "en dépression".
- Il a été vu aussi que les veines déferrisées, fonctionnant comme des couloirs de cheminement préférentiel de l'eau, pourraient constituer sur le plan géotechnique des plans de glissement et de rupture du terrain.
- De la même manière, la présence de fragipan (horizon compacts) constitue une discontinuité de niveaux aux propriétés différentes et pourrait être à l'origine d'éventuels décrochements de terrain.
- Enfin, le pH de ce matériau est bas, surtout en surface, et on pourrait y redouter la corrosion des conduites métalliques non traitées.

Quand ils sont sains et en dehors de la zone d'influence de la nappe d'eau, ces matériaux pourraient convenir aux fondations superficielles et aux constructions légères. Ils sont très exploités pour les besoins des briquetteries et des tuileries. Leur exploitation excessive pourrait mettre en surface les cailloutis du Sundgau ou les marnes.

#### 1.6. - Les vieux loess et leurs aptitudes géotechniques

Nous avons mentionné au chapitre I que ce matériau occupe, sur une faible épaisseur, la partie centrale du périmètre d'étude. Il recouvre généralement le lehm de façon très discontinue.

La zone délimitée concernant cette formation semble avoir subi des remaniements de telle sorte que l'on y observe des variations rapides, décimétriques, des matériaux lehm et vieux loess. De ce fait, les unités délimitées concernant cette formation ne sont pas toujours pures, elles peuvent renfermer des lehms anciens sous une faible couche de loess.



Les caractéristiques géotechniques, déterminées au laboratoire à partir des matériaux représentant cette formation, montrent qu'elles sont intermédiaires entre celles des lehms et celles des loess récents. Les résultats obtenus doivent être pris à titre indicatif et ponctuel.

Le remaniement et l'hétérogénéité lithologique de cette formation pourraient compromettre la stabilité des ouvrages géotechniques. Dans cette zone, l'épaisseur des limons est plus grande sur les pentes orientées nord-est et s'avèrent plus aptes à supporter des constructions de type pavillonnaire. Dans tous les cas, la réalisation d'un projet géotechnique doit être précédée d'une étude fine à l'emplacement de l'ouvrage.

#### 1.7. - Les loess récents et leurs aptitudes géotechniques

Ce matériau recouvre une zone quasiment plate (carte hors texte 2), au nord-est du périmètre.

Les caractéristiques physiques et mécaniques indiquent que ce loess est très sensible à l'action de l'eau. La limite de liquidité moyenne est 30,2 %. La limite de plasticité, très proche de  $w_L$ , est de ce fait difficile, voire impossible à déterminer. La perméabilité moyenne est  $\approx 4,8 \cdot 10^{-6}$  m/s. La compressibilité de ce matériau est relativement élevée.

En dehors des vallées et des fonds de vallons, l'impact de l'hydromorphie sur cette formation est réduite. De ce fait, elle s'adapte généralement à la construction légère et superficielle.

#### 1.8. - Les produits d'accumulation et leur aptitude géotechnique

Nous avons signalé la difficulté d'affecter des caractéristiques propres et précises aux formations d'alluvionnement, et colluvionnement de la vallée de la Largue. Néanmoins, trois principaux problèmes semblent se dégager :

- L'importance relative de la matière organique et l'âge: les matériaux "jeunes" constituant ces formations sont à l'origine d'une compressibilité importante.

- L'hydromorphie, présente à moins de 1 m de profondeur.
- L'hétérogénéité spatiale et verticale des matériaux.

Pour ces trois raisons, il nous paraît prudent d'éviter la construction sur cette formation.

#### 1.9. - Remarque sur l'utilisation géotechnique et l'exploitation industrielle des matériaux

Les ouvrages géotechniques imposent la réalisation des fouilles, la création ou l'élargissement des voies de communication. Dans tous les cas, les travaux de déblayage et de remblayage seront entrepris.

Le degré de modification du paysage est fonction de la topographie du site. Ainsi, si l'on urbanise une zone vallonnée, les déblais et remblais permettent d'aboutir à des tracés plus ou moins réguliers. Ces modifications perturbent et peuvent détruire l'équilibre du paysage naturel.

##### a) Problèmes liés aux déblais

Les déblais consistent à modifier en baisse la topographie d'un paysage. Les talus délimitant ces déblais doivent être protégés contre l'érosion hydrique qui tendra à produire des ravines et fluages. Un engazonnement associé à des rigoles peut suffire à annuler ces risques (COLAS, 1973). Par ailleurs, les déblais provenant de l'exploitation des lehms et des marnes recoupent les nappes phréatiques. De ce fait, ils en modifient la continuité d'écoulement et la géométrie de la nappe. Cette situation pourrait, si l'on n'y remédie pas, contribuer à "vidanger" la nappe pour aboutir à un tarissement des sources et des puits situés à l'aval de la carrière. D'un point de vue géotechnique, on pourrait alors enregistrer un tassement des terrains compressibles. Pour pallier cet inconvénient, il conviendrait d'éviter d'arriver à la nappe et de recombler la carrière au fur et à mesure que l'on avance dans l'exploitation. Quant aux talus de déblais des voies de communication, il existe plusieurs techniques minimisant les pertes d'eau par la mise en place d'un mur de soutènement imperméable ou un cuvelage. Les chargements en tête ou les déchargements en pied de talus (ou versant de schéma VI.1) tendent à provoquer des mouvements

Nature de la modification	Risques hydrologiques	Risques d'instabilité	Autres risques (climatiques...)	Traitement observations
1) Dégagement des surfaces	Ravinements Erosion		Nuisance et destruction de la faune et de la flore Evaporation	Durée réduite
2) Déblais	Ravinement, décharge et vidange de nappe, renard, dissolution	Stabilité des talus, tassement fondis	Dépérissement de la végétation	Engazonnement drainage, tranchée étanche
3) Remblais	Hausse du niveau piézométrique, inversion d'écoulement de la nappe	Stabilité du versant	Dépérissement de la végétation et de la faune	Remodelage du versant, soutènement, drainage colmatage des berges
4) Structure souterraine	Fluctuation de la nappe, dissolution des minéraux solubles	Tassement, effondrement		
5) Imperméabilisation	Ruissellement, crues, érosion, inondation non alimentation de la nappe	Tassement	Dépérissement de la végétation et de la faune	Etangs régulateurs, alimentation directe des nappes
6) Charges des sols	Fluctuation de la nappe Ravinement des talus et remblais	Tassement, glissement, poinçonnement		Idem 3 et 5

TABLEAU VI.1.  
Quelques risques géotechniques liés aux modifications résultant de l'urbanisation.

compromettant la stabilité des ouvrages.

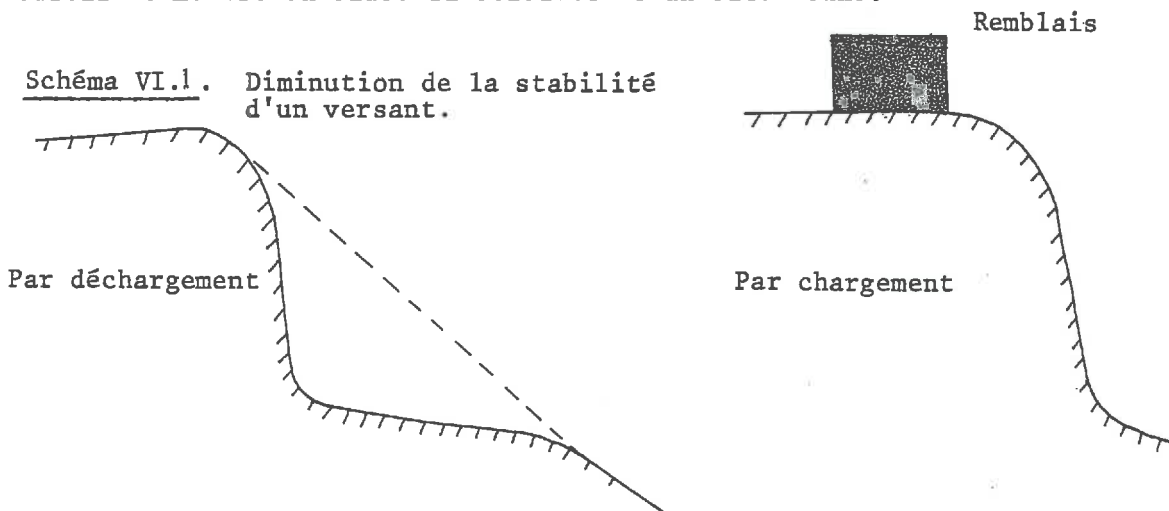
Enfin, des carrières d'exploitation des sols tendent à devenir dans le Sundgau le lieu de dépôt des déchets industriels. On pourrait redouter que les produits ainsi rejetés contaminent et polluent par échanges inter-nappes les nappes inférieures.

b) Problèmes liés aux remblais

Les travaux de régularisation d'une surface, de comblement d'une dépression, de construction d'une digue ou de berges d'un canal, nécessitent des remblais. Ces travaux modifient l'écoulement superficiel des eaux qui, de ce fait, sont canalisées ou retenues par ces levées de terre.

Les retenues d'eau, par exemple au fond d'un vallon, pourraient donner lieu à une inversion du sens de l'écoulement des nappes et à l'apparition de nouvelles sources (schéma VI.2). En outre, elles pourraient provoquer l'effondrement des formations contenant des minéraux solubles. De tels minéraux sont présents au nord du périmètre. Il pourrait aussi en résulter une déstabilisation des versants avoisinant la retenue d'eau. Les rectifications permettant de pallier cet inconvénient consisteraient, soit à drainer le versant, soit en la mise en oeuvre d'une technique de soutènement. La première solution nous semble préférable.

En somme, l'ensemble des travaux de déblais, de remblais et de mise en place des superstructures modifient l'équilibre du sol. Elles pourraient mettre en cause la stabilité d'un site donné.



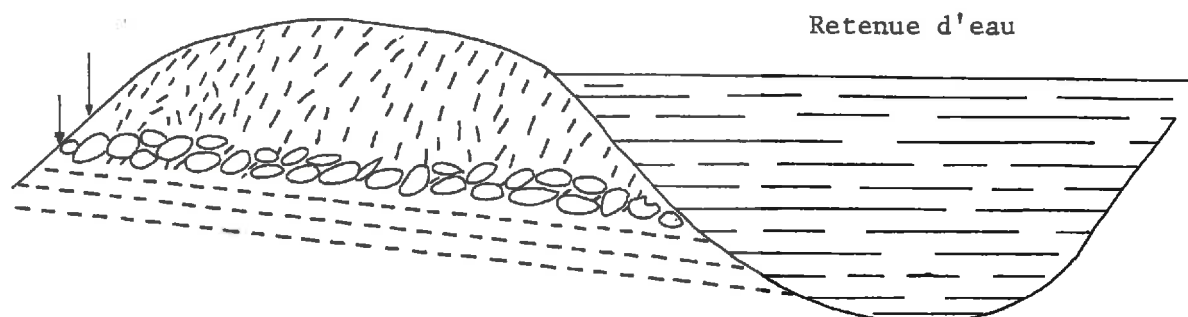



Schéma VI.2. Exemple d'inversion du sens d'écoulement d'une nappe par la création d'une retenue d'eau.

 Limons

 Cailloutis du Sundgau

 Marnes

 Apparition de nouvelles sources

### Conclusion

Les caractéristiques mécaniques des matériaux originels inventoriés dans le périmètre étudié montrent qu'ils présentent un certain nombre d'inconvénients vis-à-vis de leurs usages géotechniques (constructions lourdes). En effet, les risques du tassement différentiel, d'instabilité des versants et la nuisance des nappes d'eau, sont tels qu'il nous paraît préférable de retenir exclusivement les constructions superficielles et légères. L'encastrement des fondations ne devrait pas dépasser 1 m de profondeur, surtout en zone de lehms, afin de limiter la charge au sol et de mettre les constructions en dehors de l'influence de la nappe phréatique. Dans ce cas, les apports de la pédologie aux géotechniciens sont considérables. Dans la zone de lehms, l'imperméabilisation des sols par l'urbanisation pourrait augmenter les risques d'érosion et de la non alimentation des nappes.

## 2. - LA CARTE DES PENTES

### Réalisation

La carte des pentes a été réalisée à partir de la carte topographique de l'IGN à l'échelle du 1/25 000<sup>e</sup>. Nous y avons figuré les unités d'isopente déterminées par les mesures des écartements entre les courbes de niveaux.

Le but recherché en réalisant cette carte est de faire ressortir la morphologie du périmètre étudié afin d'appréhender le fonctionnement des versants. La carte des pentes constitue un document de travail devant permettre de prévenir l'érosion, d'évaluer la plus ou moins grande difficulté à réaliser les travaux agricoles, d'aider à la recherche d'un site pour une activité spécifique donnée.

Le choix des limites de classes a été fait sur la base d'observations de terrain et de mesures établies par ailleurs par des praticiens. Les classes retenues ont une signification à la fois pour les agronomes et géotechniciens: 2-5-10 % sont des seuils reconnus pour les contraintes qu'ils apportent en agriculture mécanisée, ou pour des aménagements hydrauliques (drainage, irrigation).

Nous avons pu, par ailleurs, reconnaître que ces limites de classes correspondent à des degrés différents de troncature par érosion du manteau pédologique (cf, à titre indicatif, le tableau VI.2. où sont consignées des observations faites sur lehms anciens). Cette carte apporte donc, en même temps, une information complémentaire à la carte des matériaux. Mais alors qu'il s'agissait précédemment de matériaux au sens "géologiques", ici, il s'agit en quelque sorte de matériaux "pédologiques" (les horizons pédologiques sont assimilés à des matériaux). Ce sont eux qui sont principalement concernés par des constructions superficielles.

Pentes (%)	0	1	2	5	10
Surfaces (ha)	3657,81	723,44	1148,44	643,75	246,88
Surfaces (%)	56,97	11,27	17,89	10,03	3,85
Classes	I	II	III	IV	V
Erosions des sols sur lehms anciens	Sols non érodés Attérissement de colluvions en bas de pente	Erosion active. Attérissements importants de colluvions	Tronqués	Les sols sont tronqués au sommet du C	Affleurement fréquent de la marne et du cailloutis

TABLEAU VI.2.

L'observation du tableau montre que la majorité des terres (57 % de la surface totale) ont une pente inférieure à 1 %. La classe V, de pente supérieure à 10 %, ne concerne que 3,85 % des surfaces recensées. On peut constater que les pentes les plus fortes sont essentiellement concentrées au centre et au sud-ouest du périmètre. La physiographie générale du périmètre d'étude est celle d'un paysage à relief assez plat, disséqué par les cours d'eau à débit faible ou moyen. On peut également remarquer que les versants exposés au sud et au sud-ouest sont généralement plus raides que ceux qui leur sont opposés. De cette façon, les lignes de crêtes ne sont pas équidistantes des thalwegs des vallons qui les bordent. La direction des versants est généralement est-ouest, exception faite de la vallée de l'Ill orientée nord-est à sud-ouest.

S.O.

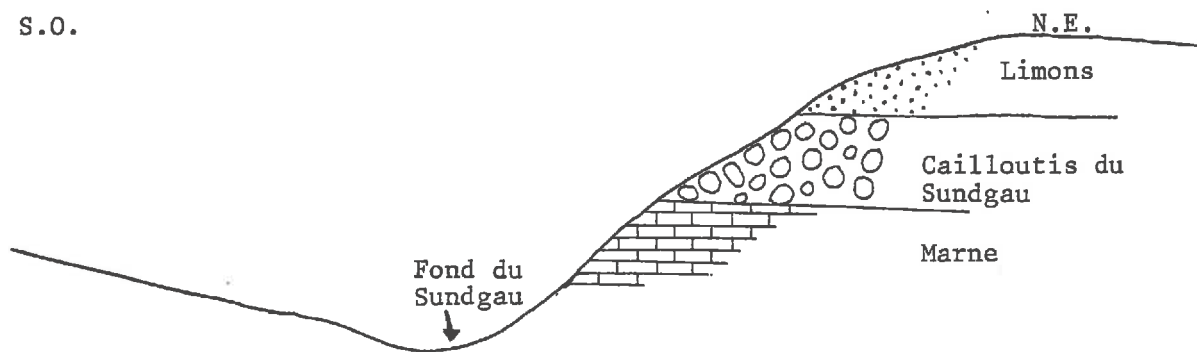


Schéma VI.3.

Dissymétrie de versants.

L'orientation des versants les plus raides varie d'une région à l'autre. Elle est ouest-sud-ouest en Belgique, sud-ouest dans le centre du Bassin de Paris (GLORIOD et TRICART, 1952) ; GRIMIBERIEUX, 1955 ; TRICART et CAILLEUX, 1967) ; LAFORE, 1977).

De nombreuses hypothèses pourraient être émises pour expliquer la dissymétrie de versants. L'hypothèse communément admise est que la dissymétrie se serait effectuée durant la période périglaciaire. Schématiquement, et selon cette hypothèse, le mécanisme d'évolution des versants en pente douce aurait été la solifluxion, et celui des pentes raides le ruissellement.

Certains auteurs ont noté l'existence d'un seuil de 7-8 m d'encaissement par rapport au sommet des croupes encadrantes, en dessous duquel la dissymétrie des versants est réduite (GLORIOD et TRICART, 1952). Ce seuil varierait avec la lithologie des sols. Dans le cas qui nous intéresse directement, la marne et les cailloutis du Sundgau affleurent le plus souvent sur les pentes raides.

### 3. - CARTE PEDOLOGIQUE (carte hors texte N°3)

L'étude est réalisée, à la demande de la D.D.A. du département du Haut Rhin, par le Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France (I.N.R.A.). La carte pédologique a été publiée à l'échelle du 1/25 000<sup>e</sup>, au niveau des séries de sols. Une série de sol regroupe les sols développés sur un même matériau originel, ayant le même degré d'évolution (même succession d'horizons) et affectées au même degré par l'excès d'eau.

### 4. - CARTE DE SUSCEPTIBILITE AU COMPACTAGE

Outre la difficulté d'extrapoler les résultats de laboratoire au comportement des sols en place, rappelons les principales difficultés liées à l'établissement de cartes de sensibilité au tassement :

- Dans le contexte limoneux du Sundgau, la pédogenèse tend à homogénéiser la granulométrie des horizons superficiels. De ce fait, beaucoup d'unités pédologiques tendent à avoir la même texture en surface. Toutefois,



Les modifications engendrées par le climat (érosion) et par l'homme (mise en culture, apports organiques) induisent des comportements différenciés (Chap. V).

- Dans le chapitre sur le compactage des horizons de surface, nous avons fait état de l'importante modification engendrée par la matière organique dans le comportement au tassement des sols. Or, les sols d'une même unité pédologique sont inégalement riches en cette substance, en raison essentiellement de la diversité des façons culturales. A partir de ces considérations, nous avons donc pris le parti suivant pour l'établissement d'une carte de sensibilité au compactage :

- Pour les couches de surface, nous n'avons retenu que les résultats obtenus à partir des horizons  $A_2$  et  $A_3$ , très proches au plan textural des horizons de labour  $A_p$ , mais nettement moins riches en matière organique ; ce qui permet d'estomper l'effet de cette dernière.

- Dans le cas de sols érodés, où l'horizon  $B_t$  affleure, nous faisons abstraction des modifications que l'homme a pu provoquer dans la couche travaillée (apports de matière organique, travaux culturaux). On peut d'ailleurs justifier ces choix en soulignant que les risques de compactage sont souvent beaucoup plus dangereux au contact de la couche travaillée et du matériau sous-jacent.

- Quand les loess affleurent en surface, nous considérons que leur aptitude au compactage serait celle des matériaux originels.

Nous aboutissons ainsi à une carte potentielle de sensibilité au compactage, qui doit être nuancée, éventuellement, par la prise en compte de la matière organique. Nous avons formulé, à cet effet, la modification engendrée par celle-ci sur  $\gamma d^c$  et sur  $\gamma d^M$  (chap. V). Ces données intéressent à la fois les praticiens de l'agriculture (travail du sol, enracinement, réserves hydriques, fertilité...) et le génie civil (remblais, barrages, et digues en terre...).

#### Légende de la carte

##### Unité 1

Cette unité regroupe l'ensemble des horizons superficiels de texture limoneuse ( $A \% < 20$ ), entièrement décarbonatés et dont le rapport  $MO/A < 3 \%$

Les courbes Proctor concernant cette unité cartographique sont caractérisées par les valeurs extrêmes suivantes :

TABLEAU VI.3.

Seuil de sensibilité au compactage		Maximum Proctor		S <sub>c</sub>	S <sub>s</sub>
w <sup>c</sup> (%)	γ <sub>d</sub> <sup>c</sup>	w <sup>M</sup> (%)	γ <sub>d</sub> <sup>M</sup> (%)		
7,5	1,51	18,3	1,66	1,39	0,31
8,5	1,59	16,7	1,69	1,22	0,24

### Unité 2

Celle-ci regroupe l'ensemble des horizons B<sub>t</sub> issus des lehms anciens "ramenés" en surface par l'érosion. Leur texture est limono-argileuse (22 % d'argile). Leur aptitude au tassement est assimilée à celle des B<sub>t</sub> des sols lessivés. Nous retenons, pour de tels matériaux, les caractéristiques de compactage minimal (limite inférieure) et maximal (limite supérieure) obtenues à partir des B<sub>t</sub> compactés :

TABLEAU VI.4.

Seuil de sensibilité au compactage		Maximum Proctor		S <sub>c</sub>	S <sub>s</sub>
w <sup>c</sup> (%)	γ <sub>d</sub> <sup>c</sup>	w <sup>M</sup> (%)	γ <sub>d</sub> <sup>M</sup> (%)		
7,7	1,55	18,5	1,71	1,48	0,33
7,5	1,50	20,0	1,64	1,12	0,24

### Unité 3

Elle concerne les horizons B<sub>t</sub> sur loess "ramenés" en surface par l'érosion. Leur texture est limono-argileuse. Ci-après, les caractéristiques minimales et maximales des principaux points des courbes Proctor :

TABLEAU VI.5.

Seuil de sensibilité au compactage		Maximum Proctor		S <sub>c</sub>	S <sub>s</sub>
w <sup>c</sup> (%)	γ <sub>d</sub> <sup>c</sup>	w <sup>M</sup> (%)	γ <sub>d</sub> <sup>M</sup> (%)		
11,5	1,50	20,7	1,63	1,41	0,20
10,4	1,46	20,2	1,60	1,43	0,22

Unité 4

L'unité concerne les horizons superficiels encore carbonatés. Nous avons distingué les loess récents des vieux loess. Aussi, aurons-nous deux sous-unités cartographiques :

- Les horizons superficiels provenant des vieux loess de texture LM à LA. La teneur en  $\text{Ca CO}_3$  est voisine de 8 %. Leur compactibilité est assimilée à celle du matériau originel (HEC), caractérisée par :

TABLEAU VI.6.

Seuil de sensibilité au compactage		Maximum Proctor		$S_c$	$S_s$
$w^c$ (%)	$\gamma_d^c$	$w^M$ (%)	$\gamma_d^M$		
7,15	1,61	18,0	1,73	1,11	0,27

- Les horizons de surface à texture limoneuse et dont la teneur en carbonates de calcium est nettement plus importante que précédemment (25 à 35 %). Il s'agit de loess récents en place, ou remaniés lorsqu'ils sont en position d'interfluve. L'aptitude au compactage de tels matériaux est supposée proche de celle des loess récents. Les caractéristiques des courbes Proctor retenues sont les suivantes :

TABLEAU VI.7.

	Seuil de sensibilité au compactage		Maximum Proctor		$S_c$	$S_s$
	$w^c$ (%)	$\gamma_d^c$	$w^M$ (%)	$\gamma_d^M$		
Vieux loess	7,15	1,61	18,0	1,73	1,11	0,27
Loess récents	10,5	1,57	18,0	1,68	1,47	0,23

Unité 5

Cette unité regroupe l'ensemble des horizons superficiels de la vallée de la Largue. Sa texture est limono-argileuse ou argileuse. S'agissant des produits de remaniement constitués par un mélange en proportion variable de limon et de marnes, nous supposons que leur aptitude au compactage est intermédiaire entre celles des marnes et des  $B_t$  sur lehms. Les caractéristiques résultant du compactage de ces matériaux sont les suivantes :

TABLEAU VI.8.

Seuil de sensibilité au compactage		Maximum Proctor		$S_c$	$S_s$
$w^c$ (%)	$\gamma_d^c$	$w^M$ (%)	$\gamma_d^M$		
15,5	1,51	22	1,62	1,69	0,18
7,7	1,55	18,5	1,71	1,48	0,33

Unité 6

Elle concerne les sols constitués par l'affleurement des marnes. Le tableau ci-après comprend les caractéristiques de courbes de compactage de telles formations :

TABLEAU VI.9.

Seuil de sensibilité au compactage		Maximum Proctor		$S_c$	$S_s$
$w^c$ (%)	$\gamma_d^c$	$w^M$ (%)	$\gamma_d^M$		
15,5	1,51	22,0	1,62	1,69	0,18

Remarques

Les résultats présentés doivent être modérés par la teneur des sols en matière organique et l'état structural des couches superficielles. Un essai de classement des unités (carte hors texte 4) vis-à-vis du compactage à été tenté sur la base du coefficient  $S_s$ , en tenant compte de la pente de la courbe de compactage ( $S_c$ ), de la densité au maximum du Proctor et de la teneur en eau critique ( $w^c$ ).

5. - CARTE D'HYDROMORPHIE

Si elle est indispensable pour la vie, l'eau peu causer, lorsqu'elle est en excès, des dégâts et des dommages aussi bien aux cultures qu'aux ouvrages de génie civil.

Dans le domaine de la construction, lorsque la nappe phréatique est présente à faible profondeur, l'eau peut apparaître dans les fouilles. Cette situation a de fortes chances de se produire lorsque les marnes ou les cailloutis du Sundgau sont à faible profondeur, ou encore dans les dépressions et les vallées mal entretenues. Un drainage s'avère alors indispensable pour un rabattement de la nappe autour de la fouille. Plusieurs techniques permettent dans ce cas de résorber l'excès d'eau : puits, rideaux, drainage autour de la semelle ou du radier... Quand la nappe est à faible profondeur (1 à 3m) et que la construction projetée exige des fondations semi-profondes, il est recommandé d'utiliser des pieux courts de 2 à 3 m de longueur de fort diamètre. En effet, de tels pieux travaillent plus par leur frottement latéral que par leur résistance de pointe.

En fonction de sa constitution, le sol peut évacuer avec plus ou moins de rapidité l'eau pluviale (ou d'irrigation). Un engorgement excessif du sol se marque souvent par des taches et concrétions furrugineuses, et par une décoloration de la matrice. La présence et l'ampleur de ces manifestations augmentent évidemment avec la durée d'engorgement, mais dépendent aussi de la présence dans le sol des éléments pouvant traduire cette "hydromorphie". Ainsi, les sols pauvres en fer extérioriseront mal leur engorgement. Par ailleurs, certains sols peuvent être perméables à l'eau, mais cependant hydromorphes : c'est le cas des sols sableux en position de dépression ou sous l'influence d'un substrat imperméable. En outre, la présence des concrétions de fer (et de manganèse) peuvent être héritées d'un climat ou/et d'une topographie ancienne. Il est alors difficile de distinguer l'hydromorphie actuelle de l'ancienne (Chap. II).

Traditionnellement, on parle de phénomènes de pseudogleyification et d'horizon à pseudogley pour décrire les horizons de sol présentant des taches d'oxydes de fer, par opposition à gleyification et horizon de gley, qui caractérisent un état de réduction généralisé du fer avec des teintes vert-bleu caractéristiques...

### Réalisation

Lors de la prospection pédologique, chaque sondage permet de noter la classe d'hydromorphie à laquelle appartient le sol représenté par

le sondage. Dans le document "Bases et techniques d'une cartographie des sols" (1967), JAMAGNE définit 9 classes d'hydromorphie qui ont servi de base à la notation du degré d'hydromorphie des sols.

Classe 0 - Ecoulement rapide de l'eau à travers le profil. Elle est caractéristique des sols filtrants ne présentant aucun signe d'hydromorphie.

Classe 1 - Drainage favorable. Le sol est "sain", l'engorgement d'eau est inexistant ou éphémère.

Classe 2 - Drainage modéré. L'engorgement saisonnier de l'eau est de faible durée. Quelques taches rouille de pseudo-gleyification apparaissent dans la bas du profil, au-delà de 80 cm.

Classe 3 - L'écoulement de l'eau est imparfait. La durée d'engorgement du sol est prolongée. Les phénomènes de pseudogleyification, modérément marqués, apparaissent à moyenne profondeur. On note l'apparition de taches rouille entre 40 et 50 cm.

Classe 4 - Le drainage est faible. L'engorgement saisonnier est très prolongé. Il peut être provoqué par une nappe temporaire à moyenne profondeur. L'hydromorphie est marquée par des phénomènes de pseudo-gleyification à moins de 40 cm de profondeur.

Classe 5 - Le drainage est très faible. Cette classe caractérise les sols dont l'engorgement est semi-permanent. Les phénomènes de pseudo-gleyification, nettement marqués, se manifestent dès la surface. La couleur de la matrice est grise à verdâtre.

Classe 6 - Le drainage est pauvre, le sol est très souvent saturé d'eau. La pseudogleyification est très fortement marquée dès la surface. Le gley est présent au delà de 80 cm de profondeur.

Classe 7 - Le drainage est très pauvre. La pseudogleyification des horizons supérieurs est très fortement marquée dès la surface. Le gley, de couleur vert-gris bleuté, d'odeur nauséabonde, apparaît entre 40 et 80 cm.

Classe 8 - Le drainage est très pauvre. En plus des caractéristiques de la classe précédente, on note ici la présence du gley à moins de 40 cm de profondeur.

Dans la pratique, on module souvent cette note de l'intensité de l'hydromorphie en affectant le numéro de la classe par un indice supérieur + ou - , par exemple : 3<sup>+</sup>.

Le Soil Survey Staff (1974) et les experts de la F.A.O. considèrent que l'aptitude des sols pour la construction est: -médiocre si l'excès d'eau se manifeste dans les 40 premiers centimètres -moyenne entre 40 et 80 cm - bonne au delà de 80 cm.

Aussi, les classes d'hydromorphie présentant des conséquences et des caractéristiques voisines ont-elles été regroupées en 5 unités en tenant compte de leur incidence sur la géotechnique et l'agriculture.

Unité 1 - Regroupant les classes où l'hydromorphie ne se manifeste pas au-dessus de 80 cm de profondeur.

Cette unité concerne les sols sains n'opposant aucune contrainte majeure d'hydromorphie pour leurs usages agricole et géotechnique de surface.

Unité 2 - Regroupant les sols dont l'hydromorphie se manifeste par des taches rouille ou des concrétions entre 60 et 80 cm de profondeur.

Cette unité est considérée comme ne présentant qu'une contrainte d'hydromorphie faible pour l'usage agricole, et moyenne à modérée pour l'utilisation géotechnique de surface.

Unité 3 - Regroupant les sols dont les taches et/ou concrétions de pseudo-gley apparaissent entre 40 et 60 cm.

La contrainte d'hydromorphie est moyenne pour l'utilisation agricole et l'usage géotechnique de surface.

Unité 4 - Regroupant les sols dont les signes d'hydromorphie (pseudogley) sont observables à partir des 10 premiers centimètres de profondeur. La contrainte excès d'eau est forte pour l'usage agricole, sévère pour la géotechnique de surface.

Unité 5 - Regroupant les classes d'hydromorphie 5, 6,7 et 8 précédemment définies. Le gley peut y apparaître à moins de 40 cm. Cette unité présente une contrainte d'hydromorphie très sévère pour leurs usages aussi bien agricole que géotechnique de surface.

Unités	1	2	3	4	5
Nombre d'ha	1 715,63	1 810,94	1 401,56	1 084,38	370,31
Nombre en %	26,88	28,37	21,96	16,99	5,80

TABLEAU VI.10.

La carte de l'hydromorphie révèle un certain nombre de faits que nous allons essayer de relater. D'abord, nous constatons que les sols de l'unité 1, considérés comme étant sains, sont localisés dans le nord-est du périmètre occupé par les loess et les sols qui en dérivent.

Les unités 5 et 4 sont localisées essentiellement aux fonds de vallées et les bas de pentes. Leur fréquence est plus élevée dans le centre et dans le sud ouest du périmètre. Dans le secteur sud-ouest (lehms), les sols les moins hydromorphes sont sur pentes généralement supérieures à 2 %.

Dans le périmètre étudié, l'origine de l'hydromorphie peut être imputée à quatre causes possibles, chacune agissant seule ou simultanément :

- 1 - Zone d'influence du substrat marneux imperméable ou de la nappe du cailloutis du Sundgau.
- 2 - La compacité du matériau limoneux, ou présence d'un horizon compact tel un fragipan.
- 3 - La position topographique de dépression.
- 4 - L'influence des cours d'eau mal entretenus.



Les quatre causes prévalent dans la zone des lehms, mais les deux premières leur sont plus spécifiques.

Les causes 3 et 4 sont pour l'essentiel responsables de l'hydromorphie observée dans la zone des loess récents.

## 6. - CARTE DE SYNTHÈSE

### 6.1. - Introduction

Ce travail se situe dans le cadre de l'aménagement régional. Le but recherché ici est d'orienter le choix d'un site entre plusieurs activités possibles à partir des résultats et données dont nous disposons. Cette synthèse tentera de faire ressortir les principales zones d'aptitude et potentialité différentes.

Les critères pris en compte dans notre démarche sont :

- la lithologie superficielle,
- la pente,
- le développement pédologique,
- l'hydromorphie,
- les caractéristiques géotechniques,
- les contraintes géotechniques,
- les contraintes agronomiques.

En fait, notre démarche tente de concilier les préoccupations diverses des utilisateurs du milieu physique. La carte de synthèse a pour objectif de répondre à un grand nombre de finalités.

Les zones ainsi déterminées sont répertoriées dans le tableau synoptique (tableau VI.11.), puis exprimées sous forme cartographique (carte hors texte 6).

## 6.2. - Présentation de la carte

Les caractéristiques géotechniques des marnes, qui constituent le substrat de tout le périmètre d'étude, sont telles qu'il nous semble préférable d'en exclure les ouvrages lourds pouvant engendrer des tassements ou effondrements.

L'examen de la carte rend compte de l'existence de 4 principales formations aux vocations différentes :

- Au nord-est, le secteur des loess, relativement plat, présente les sols les plus aptes aux fonctions aussi bien agricoles que géotechniques ou industrielles. Toutefois, certaines zones de ce secteur nécessitent une intervention de type drainage, afin d'y réduire la durée de la stagnation de l'eau.

- A l'opposé, au sud-ouest du périmètre, la zone des lehms est constitué de sols plus hydromorphes et nettement plus acides que précédemment. La compacité naturelle de cette formation constitue un atout pour l'usage géotechnique (pourvu que l'on maîtrise l'excès d'eau), mais demeure un handicap pour l'activité agricole. Les pentes sont ici plus raides et plus fréquentes que dans le secteur déjà cité ; compte tenu de la susceptibilité des limons à l'érosion, il nous paraît préférable de maintenir les sols des pentes supérieures à 10 % par l'implantation ou le maintien des prairies ou des bois. Ces derniers seraient à préconiser chaque fois que la marne ou les cailloutis apparaissent à faible profondeur.

- Le secteur de transition entre les deux secteurs évoqués présente des caractéristiques géotechniques et pédologiques intermédiaires entre les deux secteurs précédemment évoqués.

- Enfin, les formations de vallées ou de talwegs constituent une entité à part du fait de leur nature, de leur âge et de leur position topographique.

### REMARQUE

Si l'on tient compte des préventions de risques mentionnés au chapitre VI.1, les étangs et retenues d'eau peuvent jouer un rôle fondamental dans la régulation des eaux et dans l'équilibre naturel de la région. En effet, ils peuvent intercepter les eaux de ruissellement des pentes et des zones imperméabilisées (urbanisme, voiries). Ils pourront

aussi assurer une réalimentation en eau des nappes phréatiques et d'atténuer la compressibilité des matériaux contraints. Actuellement, on note un grand nombre d'étangs dans le secteur des lehms où le substrat imperméable est proche de la surface du sol. Ces étangs servent à l'activité piscicole, et plus particulièrement à l'élevage de la carpe.

La création des retenues d'eau devra être entreprise en connaissance de cause pour ne pas nuire à l'activité agricole ou engendrer des problèmes géotechniques dont les conséquences peuvent être redoutables.

CLASSEMENT LOCALISATION	LITHOLOGIE SUPPLÉMENTAIRE	TYPLOGIE	HYDROMORPHIE	CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES	CONTRAINTES GÉOTECHNIQUES	APTITUDES GÉOTECHNIQUES	CONTRAINTES AGRONOMIQUES	APTITUDES AGRICOLES	OBSERVATIONS
1 Pente 0 - 1% < 2% Coteur des plateaux	Sols dérivés des loess récents - Meubles sur plus de 1, 50 m	Sols bruns à sols lessivés	Unité 1	- Texture LM à LA - Moyennement compressible - Limites d'Atterberg moyennes à faibles	- Risque de tassement sous fortes contraintes - Microravinement - Béton de propreté nécessaire pour fond de fouilles en saison humide.	- Très bonne aptitude pour fondations superficielles et ouvrages légers	- Structure instable - Risque de battance - Mauvaise portance, si les sols ne sont pas ressuyés.	- Très bonne aptitude pour la gamme de cultures actuellement pratiquées.	- Restructuration des horizons de surface nécessaire. - Convientrait éventuellement à l'épandage de résidus liquides ( $K = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ). - Possibilité d'intensification de l'activité agricole.
1b Pente 0 - 1% < 2% Sommet de butte et interfluve de 1, 50 m	Loess récents et dérivés - Meubles sur plus de 1, 50 m	Sols peu évolués d'érosion ou d'apport Sols bruns calcifiés et calciques	Unité 1	- Texture LM - $\text{CaCO}_3 < 35\%$ - Pas ou peu plastique - Moyennement à assez compressible	- Risque de tassement sous fortes contraintes surtout en position d'interfluve - Très sensibles à l'eau - Ruissellement diffus - Béton de propreté nécessaire pour fond de fouilles - Travaux de terrassement en période sèche.	- Très bonne à bonne aptitude pour les fondations superficielles et ouvrages légers.	- Mauvaise structure - Risques de battance - Difficillement praticable pour des teneurs en eau > CR.	- Bonne aptitude pour plantes ne craignant pas le calcaire ( $\text{pH} > 7,5$ )	- Travaux de terrassement en période sèche. - Convientrait à certaines plantes maraichères ou horticoles. - Restructuration des horizons de surface souhaitée. - Risque de déficit hydrique en année sèche.
2 Pente 0 - 1% < 2% Bordure de plateau	Sols dérivés des loess récents - Meubles sur plus de 1, 50 m	Sols bruns Sols lessivés	Unité 2	- Texture LM à LA - Peu à moyennement plastique - Moyennement compressible	- Risque de tassement sous fortes pressions. - Ravinement des talus. - Béton de propreté nécessaire pour un fond de fouilles - Présence d'eau entre 0, 80 et 1 m de profondeur en périodes pluvieuses.	- Bonne moyenne pour fondations superficielles et ouvrages exerçant de faible à moyenne pression.	- Structure peu stable. - Risque de battance - Ornières, embourbement d'engrais en conditions humides. - Durée de ressuyage plus longue que 1	- Bonne à moyenne	- Si drainé, pourrait atténuer la productivité proche de celle du 1. - Murs de soutènement, quelage, engazonnement des talus.
3 Pente 1 - 2%	Loess récents et dérivés Meubles sur plus de 1, 50 m	Sols peu évolués d'érosion et d'apport - Sols bruns	Unité 1	- Texture LM à LA - $\text{CaCO}_3$ à faible profondeur - Pas ou peu plastique - Moyennement à assez compressible.	- Risque de tassement sous fortes pressions - Très sensible à l'eau - Ravinement et fluage des talus. - Béton de propreté nécessaire pour fond de fouilles en saison humide.	- Bonne pour fondations superficielles et ouvrages légers.	- Instabilité structurale - Risque d'encroûtement superficiel. - Chloroses. - Ruissellement diffus - Microornières - Ornières et embourbement pour des humidités > C. R.	- Bonne pour plantes ne craignant pas $\text{CaCO}_3$ ( $7 < \text{pH} < 8,3$ ).	- Protection des talus (cf. 2). - Restructuration des horizons superficiels. - Plantes calcicoles.
4 Pente 2 - 5%	Sols dérivés des loess récents Meubles sur plus de 1, 50 m	Sols bruns à sols lessivés	Unité 1	- Texture LM/LA à LA - Limites d'Atterberg faibles à moyennes	- Ravinement - Fluage des talus - Béton de propreté pour fond de fouilles en périodes pluvieuses	- Bonne à très bonne pour usages n'exerçant pas de fortes pressions.	- Horizons superficiels peu stables. - Risques d'érosion important. - Ravines.	- Bonne à moyenne.	- Protection contre l'érosion des surfaces. - Restructuration des couches superficielles.
5 Pente 0 - 1% < 2% Meubles sur plus de 1, 50 m	Sols dérivés des loess récents Meubles sur plus de 1, 50 m	Sols bruns à sols lessivés	Unité 3	- Texture LM - LA - Moyennement compressible - Peu à moyennement plastique	- idem 2 - Apparition d'eau autour de 50 cm de profondeur en saison pluvieuse.	- Bonne à moyenne. idem 2.	- idem 2 - Exès d'eau pouvant retarder l'entrée dans parcelle pour travaux culturaux.	- Moyenne.	- Protection des talus contre l'érosion. - Drainage périphérique autour des fondations. - Restructuration des horizons de surface. - Drainage nécessaire pour cultures intensives.
6 Pente 2 - 5%	idem 5	idem 2	Unité 3	idem 3	idem 3 - Erosion - ravines - Fluage des talus	- Bonne à moyenne pour construction et ouvrages superficiels.	- idem 3 - Erosion moyennement importante.	- Moyenne	- Protection contre l'érosion des sols et des talus. - Restructurer les couches superficielles. - Drainage nécessaire pour cultures intensives
7 Pente de 5 - 10%	idem 3	Sols peu évolués d'érosion et sols lessivés tronqués	Unité 3	Texture LM à LA idem 3	idem 3 - Erosion plus importante.	- Idem 5	- idem 5 Erosion importante	- Moyenne	- idem 6.

9	Pente 0 - 1 % hors de pente	Sols dérivés des loess récents	Sols bruns	Unités 3 - 4	- Texture LM à LA - Compressibilité - Peu à moyennement plastique.	- Risque de tassement de profondeur en période pluvieuse. - Présence d'eau probable à partir de 0,10 cm de profondeur en saison pluvieuse.	- Mauvaise	- Horizons superficiels instables. - Hydromorphie.	- Cammes de cultures limitées par l'excès d'eau	- Souvent en prairie. - Drainage indispensible pour les prairies cultures.
10	Pente 1 - 2 % < 5 %	Vieux loess et dérivés	Sols bruns à sols lessivés érodés	Unité 2	- Texture LM à LA - Moyennement compressible. - Limites d'attribution faibles à moyennes	- Tassement sous fortes pressions. - Ravinement et fluage des talus. - Présence d'eau entre 0,80 m et 1 m de profondeur en saison pluvieuse. - Béton de propreté en fond de fouilles.	- Bonne	- Structure des horizons de surface faible - Ravinement. - Onibets pour des teneurs en eau supérieures à la C. R.	- Bonne - Protection des talus contre l'érosion.	
11	Pente 1 - 2 % < 5 %	Idem 10	Bruns calciques à sols bruns.	Unités 2 - 3	- Texture LM à LA Idem 10	- Idem 10 - Présence d'eau possible entre 0,60 et 0,80 m pendant les saisons pluvieuses - Béton de propreté en fond de fouilles.	- Bonne à moyenne	- Idem 10	- Bonne à moyenne - Drainage nécessaire pour une intensification de l'agriculture.	
12	Pente 2 - 5 % < 10 %	Idem 10 éventuellement ichm en dessous	Idem 11	Unité 3	- Idem 11 - Pente assez forte - Ravinement et érosion importants	- Idem 11 - Ravinement important.	- Bonne à moyenne	- Idem 11 - Erosion importante.	- Entendre toutes les mesures nécessaires contre l'érosion des talus. - Drainage périphérique autour des fondations.	
13	Pente 5 - 10 %	Idem 10	Idem 10	Unités 2 A 3	- Idem 10 - Mauvaises caractéristiques mécaniques.	- Moyenne à bonne.	- Moyenne	- Pente - Erosion - Structure superficielle	- Idem 6	
14	Pente 0 - 1 % Pourcours des ruisseaux secondaires.	Dépôts de vallées	Sols d'apport colluvial	Unités 2 et 3	- Texture LM à LA - Mauvaises caractéristiques mécaniques.	- Tassement - Matière organique - Hydromorphie sensible à l'eau.	- Moyennes à faibles	- Structure - Excès d'eau temporaire - Praticabilité réduite en période humide	- Convient pour les prairies, mais drainage nécessaire pour cultures	
15	Pente 0 - 1 % Pourcours des ruisseaux secondaires	Dépôts de vallées	Sols d'apport colluvial	Unités 4 et 5	- Texture LM à LA - Mauvaises caractéristiques mécaniques	- Tassement - Matière organique - Hydromorphie	- Mauvaise à très mauvaise	- Structure de surface - Excès d'eau et engorgement prolongé. - Enlèvement d'engrais.	- Convient au prairie permanente, mais drainage nécessaire pour les prairies temporaires et obligatoires pour les cultures céréalières.	
16	Pente 0 - 1 % < 2 %	Lehm anciens et sols dérivés meubles sur plus de 1,50 m	Sols bruns d'érosion	Unité 3	- Texture LM à LA - Assez compressible. - Peu plastiques en surface.	- Hydromorphie - Erosion des talus - Béton de propreté nécessaires pour fond de fouilles.	- Moyenne à mauvaises.	- Instabilité structurale - Excès d'eau - Enlèvement d'engrais pour teneur en eau > C. R. - Risque d'apophyse.	- Protection de talus contre l'érosion - Drainage nécessaire. - Densification souhaitée.	
17	Pente 0 - 1 % hors de pente	Lehm anciens éventuellement cuifiés par les vieux loess Meubles sur plus de 1,50 m	Sols bruns	Unité 4	- Texture LM à LA - Assez compressible. - Peu plastiques en surface. - Compact en profondeur.	- Hydromorphie dans les 0,10 cm de profondeur en période humide. - Erosion des talus.	- Mauvaise.	- Instabilité structurale - Excès d'eau - Enlèvement d'engrais pour teneur en eau > C. R. - Risque d'apophyse.	- Moyenne à faible pour cultures céréalières. - Protection des talus contre l'érosion. - Drainage indispensible.	

18	Pente 1-2%, hauteur de plateaux	Lehms anciens et soils dérivés meubles sur plus de 1,50 m	Soils dégradés tron- qués	Unités 3 - 4	- Texture LM à LA - peu compressibles - compact	- Engorgement possi- ble dans les 0,40 cm de profondeur. - Imperméabilisation des talus. - Béton de propreté en période humide.	- Moyenne à mauvaises.	- idem 17 - Asphyxie - Erosion hydrique	- idem 17	- idem 17 Aération du sol. - Drainage indispensable.
19	Pente 1 - 2 % ≤ 5 %	Lehms anciens et dérivés, meu- bles sur plus de 1,50 m	Soils bruns	Unités 1 - 2	- idem 18	- Béton de propreté en saison humide	- Bonne	- idem 17	- Moyenne à bonne	- Aération du sol - Eventuellement drainage.
20	Pente 2 - 5 % Bas de pente	Lehms anciens et dérivés, meu- bles sur plus de 1,50 m	Soils bruns	Unité 3	- Texture LM - LA - moyennement com- pressible en surface - compact en profondeur.	- Erosion des talus - Imperméabilisation des talus - Béton de propreté en période pluvieuse - Hydromorphie	- Bonne à moyenne	- idem 18	- Moyenne	- Aération du sol - Drainage nécessaire.
21	Pente 5 - 10 %	Lehms anciens et dérivés, meubles sur plus de 1,50 m	Soils bruns Soils bruns lessivés Soils bruns d'éro- sion	Unité 3	- Texture LM - LA - moyennement com- pressible en surface - limites d'Atterberg faibles	- Erosion - sensible à l'eau - Plan d'eau à 40 cm en saisons pluvieuses.	- Moyenne	- Erosion - Structure de surface - Engorgement - Asphyxie	- Moyenne	- Structures à améliorer - Protection contre l'éro- sion - Drainage nécessaire - Décompactage
22	Pente > 10%	Lehms anciens meubles sur plus de 1,50 m	Soils bruns d'érosion	Unité 1	- Texture LM - LA	- Erosion - Béton de propreté pour fond de fouilles en période pluvieuse.	- Moyenne	- Erosion - Structure des couches au- perficielles. - Forte résistance pénétration racinaire. - Désaturé en surface.	- Bonne à moyenne	- Protection contre l'érosion. - Décompactage.
23	Pente 0 - 1 %	Dépôts de vallées	Soils peu évolués d'apport	Unités 2 - 3	- Texture LM à LA hétérogène - Mauvaises caracté- ristiques mécani- ques	- Compressible - Matière organique - Tassement.	- Mauvaises	- Structure superficielle - Excès d'eau - Engorgé pendant saison pluvieuse. - Enlèvement d'engrais.	- Très faible pour cultures céréalières.	- Abaisser niveau de la nappe par assainissement (fossés). - Drainage obligatoire.
24	Pente 0 - 1 %	Dépôts de vallées	Soils peu évolués d'apport	Unités 4 - 5	- Texture hétérogène - Mauvaises caracté- ristiques mécani- ques.	- Compressible - Matière organique - Engorgement.	- Très mauvaises	- Excès d'eau - Enlèvement	- Très mauvaises pour prairies.	- Drainage obligatoire.
25	Pente variable	Cailloutis du Sundgau	Association de soils.	Unités	- Texture hétérogène - Mauvaise caracté- ristiques mécaniques	- Tassement - Difficultés de creu- ser canalisations - Stabilité des condui- tes souterraines - Engorgement.	- Très mauvaises	- Charge en cailloux importantes. - Usure matériel. - Erosion différentielle.	- Mauvaise.	- Prairie ou bois sur pente forte.
26	Pente forte	Marnes	Soils bruns calcitrans Soils bruns calci- ques.		- Plastique - Bonnes caractéris- tiques mécaniques quand pure.	- Fluage sur pente > 5 % - Eviter de laisser les feuilles se sécher - Pente souvent forte.	- Très mauvaises sur pente < 2 %	- Humide - Erosion - Forte traction.	- Moyenne pour prairie.	- Bois en pente > 10 % - Nécessité d'assainisse- ment.

## CONCLUSION

Le domaine de la géotechnique s'est élargi considérablement avec l'affirmation d'une politique d'aménagement du territoire. Le souci, notamment, de préserver le milieu physique de toute dégradation irréversible, tend à compléter la notion de risque géotechnique (risque pour l'ouvrage) par celle d'impact sur le milieu.

Dans le même esprit, on prend aussi en compte les risques de dégradation des sols liés à la culture mécanisée.

Le sol, considéré plus largement comme un support et un espace pour les activités humaines (on doit plutôt parler de terrain), devient lui-même un bien rare qu'il convient d'utiliser au mieux dans l'intérêt de la collectivité.

Une attitude très générale est de préserver, dans la mesure du possible, l'espace agricole. Mais on doit prévoir d'autres utilisations possibles. Le spécialiste est donc conduit à estimer, pour chaque terrain, son degré d'aptitude à satisfaire à diverses destinations (on parlera ainsi de l'aptitude d'un terrain à la construction).

Si les géotechniciens pouvaient négliger les apports de la pédologie dans le domaine des constructions lourdes, qui "portent" surtout sur les couches géologiques profondes, il pourrait en être autrement pour les ouvrages et les travaux intéressant les deux premiers mètres du sol. Ainsi, par exemple :

- les constructions légères,
- les travaux de terrassement (déblais, remblais),
- la voirie et les canalisations,
- les aires de loisir.

A cet effet, la pédologie est en mesure de fournir un certain nombre d'informations utiles sur les propriétés et comportement des sols, ainsi que sur leur fonctionnement.

Ces caractéristiques sont déterminées autant par la nature des matériaux originels, dans lesquels les sols se sont développés, que par l'histoire de ces sols. C'est pourquoi nous avons porté notre choix sur un secteur géographique (le Sundgau) où l'importance et la diversité des matériaux limoneux nous ont permis de retrouver sur ceux-ci tous les stades "d'une séquence évolutive" particulièrement étudiée en France.

Dans le Sundgau, ce sont deux variantes de cette séquence que nous avons pu mettre en évidence. L'une, sur loess récents, où le stade le plus évolué est le sol lessivé. Les arguments à la fois morphologiques et analytiques ont permis de distinguer plusieurs stades intermédiaires entre les sols peu évolués et les sols lessivés. Les stades de transition observés sont en relation directe avec leur position géomorphologique, mais ils peuvent être considérés aussi comme des témoins successifs de l'évolution pédologique suivie par ces loess depuis leur mise en place.

Dans l'autre séquence, développée sur les lehms anciens, le terme de l'évolution est un sol lessivé dégradé qu'on observe essentiellement sur des pentes faibles ou nulles, dans un contexte de forte hydromorphie. La compacité élevée de ce matériau, sa tendance à l'acidification, et une pluviosité supérieure à 1000 mm, sont probablement responsables de cette dégradation. Les autres stades de la séquence correspondent à des situations géomorphologiques où la dynamique de l'érosion a joué de façon plus ou moins intense.

\* \*

L'étude géotechnique porte sur l'ensemble des formations inventoriées dans le Sundgau : les matériaux géologiques comme les formations superficielles. Elle rend compte d'un certain nombre de faits :

- Les propriétés de l'argile constitutive des marnes les rend instables en position de pente. De ce fait, on observe souvent des décrochages et des glissements. Par ailleurs, l'hétérogénéité granulométrique et minéralogique des faciès de cette formation laissent présager des comportements mécaniques différentiels, si celle-ci était fortement sollicitée. Ces deux arguments excluent donc les ouvrages lourds sur marnes, du moins en position de pente.



- Le degré d'altération et de fragilité des cailloutis du Sundgau sont tels que, soumis à de fortes pressions, ils pourraient s'écraser et donner lieu à des tassements importants. Ce qui limite les possibilités de construction. En outre, la difficulté de creuser des tranchées dans les formations caillouteuses présente une gêne certaine (canalisations, déblais...).

- Concernant les formations limoneuses, nous retiendrons qu'elles sont généralement assez sensibles à l'eau, et plus particulièrement les loess. On peut y craindre également une compressibilité importante, surtout pour les limons remaniés et les loess.

Par ailleurs, les langues déferrisées, spécifiques des lehms anciens, fonctionnent comme des "couloirs" de cheminement préférentiel de l'eau et constituent donc des plans sensibles aux ruptures.

Nous avons porté un intérêt particulier à la sensibilité au compactage des matériaux originels et des formations pédologiques du Sundgau. Ainsi, cette étude comporte-t-elle trois niveaux d'investigation :

- Le premier niveau concerne les matériaux originels.

Nous avons pu mettre en évidence l'influence de l'argile et des carbonates de calcium sur des matériaux très pauvres par ailleurs en matière organique, et comparer nos résultats à ceux obtenus par d'autres auteurs. Il ressort de cette analyse que les carbonates de calcium influent nettement, même présents en faible quantité, sur le comportement au tassement des matériaux. Lorsque ceux-ci en sont dépourvus, leur comportement est alors régi essentiellement par les argiles.

- Le second niveau se rapporte aux horizons  $B_t$ .

Nous y comparons ceux des sols lessivés sur loess et ceux des sols dégradés développés sur lehms anciens. Les unités pédologiques de la carte des sols sont homogènes vis-à-vis du comportement au tassement de ces  $B_t$  (notamment pour les paramètres :  $w^C$  ;  $w^A$  ;  $S_c$  ;  $\frac{\gamma_d^M *}{\gamma_w^M}$ ), avec deux populations bien différenciées correspondant aux deux matériaux loess et lehms anciens.

---

\*  $\gamma_d^C$  : densité au point d'entrée en plasticité ;  $\gamma_d^M$  : densité au maximum Proctor.  
 $w^C$  et  $w^M$  : teneurs en eau correspondantes ;

$w^A = \frac{w^C}{A}$  (A = teneur en argile) ;  $S_c = \frac{\Delta \gamma_d}{\Delta w}$  : susceptibilité au tassement.

Toutefois, allant plus loin, les  $B_t$  de sols dégradés sur lehm ancien présentent une hétérogénéité de comportement qui se traduit dans les valeurs de  $\gamma d^C$ ,  $\gamma d^M$  et  $S_c$ . Cette hétérogénéité pouvant s'expliquer par le rôle plus ou moins grand que peuvent avoir les oxydes de fer suivant le degré d'hydromorphie des sols.

- Enfin, le troisième niveau a trait aux horizons superficiels soumis aux façons culturales et au roulage des machines agricoles.

Nous mettons ici en évidence le rôle déterminant de la matière organique. Plus le rapport MO/A est élevé, moins les "couches superficielles" ont tendance à se tasser.  $\gamma d^C$  et  $\gamma d^M$  varient simultanément, dans le même sens, et diminuent quand MO/A augmente. La corrélation qui les lie entre eux et celle qui les lie au rapport  $\frac{MO}{A}$  sont hautement significatives.  $w/A$  aussi (c'est-à-dire  $w^C/A$ ) augmente avec MO/A. La relation n'est ici que moyennement significative ( $r = 0,43$ ), moins que ce que l'on pouvait penser a priori, certainement parce que la matière organique n'intervient pas seulement par son taux, mais aussi par sa qualité.

En effet, matière organique libre et matière organique liée jouent différemment vis-à-vis de l'eau et des énergies appliquées. Les qualités mécaniques des couches superficielles sont donc nécessairement très contingentes des pratiques culturales.

Il en résulte une grande dispersion des valeurs obtenues. On ne peut pas caractériser une unité-sol de la carte pédologique par une valeur (ou une fourchette de valeurs) du rapport MO/A. Cependant, ce rapport sera d'une grande utilité pour l'agronome qui travaille à l'échelle de la parcelle.

Au demeurant, si on multipliait les mesures, nous pensons qu'on verrait se dessiner des sous-ensembles au niveau régional suivant les grandes familles texturales : argiles, limons, sables. Il serait très utile que de telles relations ( $\gamma d = f(\frac{MO}{A})$ ) soient établies dans divers contextes régionaux.

Une signification pédologique des caractérisations géotechniques de la couche des sols travaillés par l'homme nécessiterait donc des études beaucoup plus fines.

En fait, si l'on considère le problème uniquement dans une optique agronomique, les plus grands risques de tassement (semelles de labour) se produisent dans les couches de sol situées immédiatement au dessous de la couche travaillée (Ap).

- C'est là que joue le plus l'effet des interventions culturales (surtout s'agissant de textures limoneuses).
- C'est également là que les conditions hydriques propices à un tassement risquent le plus de se manifester (l'agriculteur ne prenant en compte que l'état d'humidité de la couche travaillée).
- Enfin, c'est là que se situent les horizons pédologiques de type A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub>..., nettement moins pourvus en matière organique que le Ap. En même temps, leur teneur en argile est voisine de 20 %, valeur critique à laquelle se situe le maximum de compacité.

Pratiquement, la susceptibilité au tassement de ces horizons intermédiaires dépend à la fois : de la façon dont ils se situent par rapport à cette valeur critique de 20 %, des conditions hydriques du moment, du degré de tassement des horizons situées immédiatement au-dessous. Ceux-ci peuvent jouer un rôle bénéfique en absorbant une partie de l'énergie appliquée au sol, ou, au contraire, aggraver les effets de celle-ci s'ils jouent le rôle d'un plancher rigide.

Au plan cartographique, la dispersion des mesures est moins grande que précédemment. Le comportement géotechnique de ces horizons intermédiaires est davantage relié à l'histoire et au fonctionnement du sol. Il peut donc être déduit, jusqu'à un certain point, de la carte des sols.

\* \* \*

Au plan de l'expression cartographique, cette étude du Sundgau nous permet de tirer un certain nombre d'enseignements.

Une carte pédologique levée à l'échelle 1/25 000<sup>e</sup> a une précision qui permet déjà d'apporter à l'aménageur un grand nombre d'informations d'ordre géotechnique. Le sol est caractérisé au niveau de la série, c'est-à-dire que sont indiqués :

- le matériau dont il est issu,

- la succession des principaux horizons pédologiques (dont on précise la texture, la pierrosité, la teneur en carbonates et matière organique).
- le régime hydrique, c'est-à-dire la qualité du drainage,
- le "type génétique", qui résume tout un ensemble de propriétés physico-chimique, (pH, T...) liées au fonctionnement et à l'histoire du sol.

C'est-à-dire qu'une telle carte permet au praticien de moduler ses appréciations suivant le type d'aménagement auquel il s'intéresse :

- Les constructions lourdes à fondations profondes, et certains grands ouvrages, sollicitent surtout les substrats géologiques.
- Les constructions plus légères, qui exercent des pressions moyennes, ne sollicitent pratiquement que le sol.
- Les interventions qui n'affectent que les couches superficielles du sol (la "terre végétale"). Sont à considérer ici non seulement les risques de tassement dus aux engins de chantier lors de la réalisation d'un ouvrage, mais aussi les risques de tassement dus aux engins agricoles, puisque l'on doit appréhender dans sa totalité le problème de la conservation des sols.

Les possibilités de représentations graphiques sont cependant limitées sur une carte de sols à 1/25 000<sup>e</sup>.

On sait, d'autre part, que le dessin des limites des unités pédologiques résulte forcément d'un compromis et qu'elles ne correspondent pas à une discontinuité de répartition spatiale pour toutes les caractéristiques du sol.

C'est pourquoi, nous pensons qu'il est nécessaire de fournir au technicien de terrain, outre la carte des sols, un jeu de "cartes factorielles" qui donnent à part certaines informations. C'est ainsi que nous avons établi :

Une carte des pentes, en choisissant des intervalles de classe qui rendent compte des degrés d'érosion du manteau pédologique et qui permettent d'estimer les risques de stabilité des ouvrages géotechniques.

- une carte des matériaux géologiques, affleurant indique leur emplacement, ceci intéresse les utilisateurs de matériaux (argiles, sables et limons

- une carte de la facilité de ressuyage des sols

- une carte de susceptibilité au tassement des couches affleurantes, un indice ( $S_g$ ) est proposé pour classer les sols viv-à-vis du compactage. Cet indice a un intérêt particulièrement important pour les praticiens de l'agriculture car il intègre à la fois  $S_c$ ,  $\gamma_d^M$  et  $w^c$ .

Cependant, pour tenter de répondre de manière plus globale aux besoins de responsables de l'aménagement de l'espace rural, il nous a fallu, au contraire, concevoir une carte synthétique.

Allant plus loin, nous posons le problème d'une utilisation à des fins géotechniques des cartes des sols à moyennes échelles (1/50 000 à 1/100 000), couramment utilisées dans les programmes d'inventaires au niveau national et régional. A ce niveau, les cartes géologiques et de risques géotechniques publiées au 1/50 000 apportent l'essentiel de l'information nécessaire au technicien. On pourrait seulement suggérer que figurent sur les cartes pédologiques à petite échelle certaines caractéristiques géotechniques ( $C$ ,  $C_c$ ,  $P_c$ ,  $w_L$ ,  $w_p$ ) pour les principales unités-sols.

Au demeurant, il ressort de cette étude que les variations spatiales des propriétés géotechniques (au sein de la couverture pédologique) sont corréliées d'abord avec des différences reconnaissables de nature, d'âge, et de mode de mise en place des matériaux originels. D'une façon générale, le degré de différenciation pédogénétique du sol n'intervient qu'en second lieu au niveau de sous-ensembles :

- Un sol lessivé sur loess récent est différent d'un sol lessivé sur lehms anciens du point de vue de son comportement géotechnique.

- Il existe aussi une différence, moindre cependant, entre un sol brun lessivé et un sol lessivé développés tous les deux dans le loess récent.

Ces faits ne doivent pas étonner puisque l'histoire du sol que le pédologue arrive à appréhender (et qui lui permet de classer le sol) n'est en fait, le plus souvent, qu'une partie de l'histoire complète du matériau. Cette histoire, en effet, a probablement été déterminante pour conférer au matériau des qualités particulières (notamment dans le contexte périglaciaire de l'histoire récente du Sundgau).

Ceci doit donner à réfléchir au pédologue sur l'importance à donner au matériau originel dans la définition des unités cartographiques ; à réfléchir, parallèlement, sur le mode de représentation graphique de ses cartes qui traduit nécessairement un choix dans la hiérarchisation de l'information.

En l'état des choses, les quelques problèmes soulevés ici nous confirment qu'une analyse complète ne peut être conduite qu'au sein d'une équipe pluridisciplinaire où le pédologue serait amené à oeuvrer avec le géologue-géotechnicien et le spécialiste en mécanique des sols.

ANNEXE II

-----

Photo 1 - Erosion par ravine sur pente de 2 à 5 %.

Photo 2 ; 3 ; 4 - Erosion sur pente d'environ 2 %.





1



2



Photo 3 -



Photo 4 -

PROFIL 43 ; SOL PEU EVOLUE D'EROSION

HORIZONS	Granulométrie				MO (%)	pH eau	Bases échangeables meq/100 g de terre				100 S ... T	
	A (%)	L F (%)	L G (%)	S T (%)			Ca	Mg	K	Na		T
Ap	16,1	34,9	45,5	3,1	1,55	8,1	35,3	0,98	0,223	0,028	28,5	saturé
C <sub>1</sub>	11,1	37,1	47,8	3,1	-		34,9	0,89	0,095	0,029	6,1	-
C <sub>2</sub>	10,2	37,7	47,3	3,9	0,28	8,5	34,1	0,93	0,068	0,029	5,2	-

Horizons	Log 10 Is	Humidité équivalente
Ap	1,88	20,8 %
C <sub>2</sub>	2,85	18,9 %

PROFIL 14 ; SOL BRUN CALCAIRE

HORIZONS	Granulométrie				MO %	pH eau	Bases échangeables meq/100 g de terre				100 S T	
	A (%)		L G (%)				Ca	Mg	K	Na		T
	LF (%)	LG (%)	ST (%)	T								
AP	18,8	34,7	44,5	2,0	1,4	8,1	34,6	0,90	0,32	0,034	10,0	saturé
(B)	18,5	36,1	42,7	2,7	1,4	8,1	35,6	0,89	0,315	0,035	10,0	-
C	13,9	38,2	44,5	3,4	0,52	8,4	34,6	0,94	0,092	0,034	6,7	-

	Log 10 Is	Humidité équivalente	Densité apparente
Ap	1,19	22,1	1,5
(B)	2,04	22,2	1,5
C	2,41	21,2	

HORIZONS	Granulométrie					MO(%)	pH eau	Bases échangeables meq/100 g de terre				100 S	
	A (%)	LF (%)	L G (%)	ST (%)	Ca			Mg	K	Na	T	T	
												saturé	
Ap	21,2	36,8	39,2	2,8	2,13	8	33,8	1,03	0,185	0,068	12,6	saturé	
(B)	19,4	39,6	39,5	1,5	0,60	8	21,0	0,96	0,125	0,059	11,1	-	
C <sub>1</sub>	12,9	43,4	41,2	2,5	-	8,3	-	-	-	-	-	-	
C <sub>2</sub>	12,0	42,9	41,7	3,0	-	9,2	34,5	0,96	0,058	0,044	6,4	-	

Horizon	Log 10 Is	Humidité Equivalente
Ap	1,46	26,5
(B)	1,77	24,9
C <sub>2</sub>	2,48	23,5

P.437; Sol brun lessivé

Horizons	Granulométrie			MO %	pH eau	Bases échangeables méq./100 g				100 $\frac{S}{T}$	
	A (%)	LF (%)	IG (%)			ST (%)	Ca	Mg	K		Na
Ap	14,0	37,4	44,2	4,4	1,37	5,2	0,81	0,107	0,063	8,2	72,93
B <sub>21t</sub>	24,1	37,5	36,1	2,3	0,63	5,5	1,39	0,161	0,091	11,3	87,88
B <sub>22t</sub>	25,4	37,2	35,6	1,8	0,46	5,8	1,78	0,191	0,086	12,1	S
B <sub>31(g)</sub>	25,9	35,2	37,1	1,8	0,42	6,0	1,72	0,203	0,094	12,3	S
B <sub>32(g)</sub>	26,2	34,3	37,7	1,8	0,44	6,3	1,46	0,184	0,098	11,8	S
BC	12,5	41,9	41,8	3,8	-	8,2	0,79	0,074	0,047	6,9	S

Horizons	Densités apparentes g/cm <sup>3</sup>	Log 10 Is 2,18	Humidité équivalente
Ap*	1,5		22,8
B <sub>22</sub>	1,53		25,9
B <sub>31</sub>	1,51		27,0
B <sub>32</sub>	1,46		26,9
C	1,53		22,1

\* w<sub>L</sub> = 31 % ; w<sub>p</sub> = 26 % ; I<sub>n</sub> = 5.

Horizons	Granulométrie			MO (%)	pH(eau)	Bases échangeables méq./100g de terre					100 $\frac{S}{T}$	
	A (%)	LF (%)	LG (%)			ST (%)	Ca	Mg	K	Na		T
AP <sub>1</sub>	14,1	38,1	44,8	3,0	1,74	6,0	0,83	0,519	0,036	8,3	89,0	
AP <sub>2</sub>	19,0	37,2	41,2	2,6	1,11	5,7	1,11	0,403	0,030	9,3	77,9	
B <sub>p</sub>	-	-	-	-	0,63	-	-	-	-	-	-	
B <sub>2t</sub>	29,5	33,2	34,8	2,5	0,51	9,6	1,91	0,273	0,044	12,4	95,4	
B <sub>31</sub>	28,5	32,0	37,2	2,3	-	11,0	1,98	0,232	0,062	12,4	Sat.	
B <sub>32</sub>	25,4	32,7	39,7	2,2	-	10,2	1,75	0,184	0,067	11,1	Sat.	
B/C	20,2	34,9	42,9	2,0	-	10,3	1,51	0,143	0,061	10,6	Sat.	
C	9,6	38,8	49,8	1,8	-	32,3	1,12	0,077	0,039	6,2	Sat.	

Horizons	Log. 10 Is	Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Humidité équivalente
AP <sub>1</sub> *	1,99	-	22,4
EP	1,78	1,50	25,2
B <sub>2t</sub>	1,83	1,43	26,2
B <sub>32</sub>	2,02	1,53	24,8

\* w<sub>L</sub> = 30,5 ; w<sub>p</sub> = 25,3 ; I<sub>p</sub> = 5,2.

PROFIL 47 ; SOL LESSIVE DEGRADE

HORIZONS	Granulométrie					pH eau	MO(%)	Basés échangeables meq/100 g					100 S ... T	Fe libre %	Fe Tot. %	Mn %/..
	A	LF	LG	S Tot.x				Ca	Mg	K	Na	T				
Ap	10,8	42,6	41,3	5,3		5,9	1,40	4,3	0,68	0,286	0,023	7,2	74	-	-	-
A <sub>2</sub> g	14,3	43,0	37,4	5,3		6,2	0,39	4,4	0,95	0,135	0,032	6,9	80	1,04	1,97	0,862
(A et B) <sub>2</sub> g	20,1	41,6	33,8	4,5		6,3	0,29	7,2	1,61	0,130	0,058	9,2	98	1,47	2,76	0,696
B <sub>2</sub> tgx	23,0	39,5	34,0	3,5		6,0	0,26	8,4	2,13	0,149	0,066	10,8	99	1,62	3,17	0,401
B <sub>3</sub> gx	23,7	38,5	34,7	3,1		5,1	0,21	8,3	2,91	0,156	0,074	13,1	88	2,10	3,63	-

x le plus souvent constituées de fragments de concrétions ferrugineuses.

Horizons	Densités apparentes	Log 10 Is	Humidité équivalente
Ap <sup>x</sup>	1,40	1,88	23,4
A <sub>2</sub> g	1,53	2,11	22,2
(A et B)g	1,55	2,06	25,0
B <sub>2</sub> tgx	1,58	2,17	26,2

x w<sub>L</sub> = 1,30 ; w<sub>p</sub> = 25,6 ; I<sub>p</sub> = 4,5.



HORIZONS	Granulométrie					pH eau	MO %	Bases échangeables meq/100 g				100 $\frac{S}{T}$	
	A %	L G %			S T %			Ca	Mg	K	Na		T
		L F %	L G %	S T %									
AP	17,9	42,1	34,2	5,8	5,9	2,26	7,6	0,85	0,191	0,029	9	96	
(A et B) g	20,4	39,7	31,2	8,7	6,5	0,95	-	-	-	-	-	-	
B <sub>2</sub> tg	22,8	40,0	28,0	8,5	6,5	0,64	8,4	1,11	0,136	0,049	10,1	96	
B <sub>31</sub> g	29,5	39,0	26,7	2,8	6,0	0,35	10,0	1,71	0,145	0,083	12,4	96	
B <sub>32</sub>	-	-	-	-	5,1	-	6,8	1,92	0,133	0,069	13,7	65	
B/C	36,6	39,3	22,7	1,4	4,9	-	5,5	1,94	0,153	0,067	14,5	53	

	Densités apparentes g/cm <sup>3</sup>		Log 10 Is	Humidité équivalente
AP	1,45		1,39	25,1
B <sub>31</sub>	1,60		1,62	27,2

PROFIL 180 :

HORIZONS	Granulométrie				MO (%)	pH eau	Bases échangeables méq/100 g de terre					100 S. T
	A (%)	L.F (%)	LG (%)	ST (%)			Ca	Mg	K	Na	T	
Ap	14,4	44,3	32,2	9,4	2,52	5,6	0,81	0,287	0,029	9,8	69	
(A et B) <sub>g</sub>	18,5	43,7	31	5,90	0,49	5,9	1,17	0,151	0,041	8,5	79	
(B et A) <sub>g</sub>	19,8	45,8	29,8	4,6	-	1,1	-	-	-	-	-	
B/C <sub>g</sub>	18,5	45,1	30,6	5,8	-	6,0	1,59	0,149	0,054	9,5	-	
C <sub>g</sub>	17,1	41,8	26,4	14,7	-	5,3	2,26	0,089	0,072	10,6	64	

	Log 10 Is	Humidité Equ.
Ap	1,33	27,0
(A et B) <sub>lg</sub>	1,69	25,5

PROFIL 408 ; SOL HYDROMORPHE

HORIZONS	Granulométrie				MO (%)	pH eau	Bases échangeables méq/100 g de terre				100 S ... T	
	A (%)	LF (%)	LG (%)	ST (%)			Ca	Mg	K	Na		T
A <sub>1</sub> B	18,4	45,4	33	3,2	3,25	5,1	4,6	0,50	0,063	0,078	10,3	50,89
A <sub>2</sub> B	13,9	47,1	35,7	3,3	0,73	5,8	4,3	0,79	0,039	0,065	7,0	74,2
B <sub>2</sub> B	19,6	40,6	34,0	5,6	0,28	5,8	8,0	2,19	0,121	0,093	10,3	saturé
B <sub>3</sub> B	23,4	38,9	30,3	7,4	-	5,8	10,5	2,98	0,132	0,120	12,6	-
G <sub>1</sub> F	19,1	45,7	32,4	2,8	-	5,5	8,9	2,17	0,123	0,121	10,6	-
G <sub>0</sub> I	-	-	-	-	-	-	9,9	2,88	0,140	0,148	12,6	-
G <sub>0</sub> Z	-	-	-	-	-	-	10,2	2,94	0,118	0,038	12,8	-

HORIZONS	Log 10 Is	Humidité équivalente
A <sub>1</sub> B	1,12	
A <sub>2</sub> B	2,03	32,3
(A et B) g	2,17	24,2

ANNEXE IV

=====

Photos des fractions < 2  $\mu$ m

Photo 1 et 2 - Marnes

Photo 3 - Lehm ancien

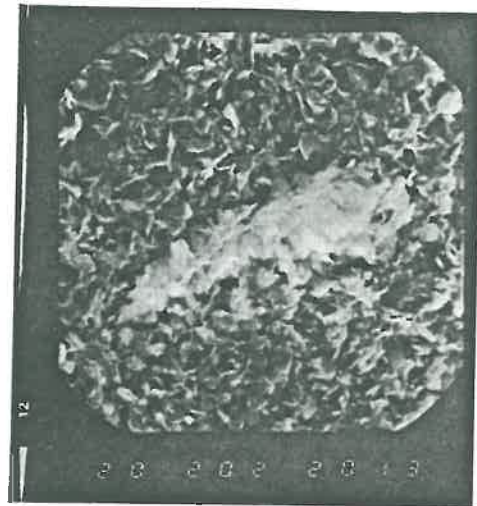
Photo 4 - Vieux loess

Photo 5 - Loess récent

Photo 6 - B<sub>t</sub> sur loess



1



2



3



4



5



6

\* Photo 7 et 8 - Avant et après glissement de terrain sur la formation marneuse.



Photo 7

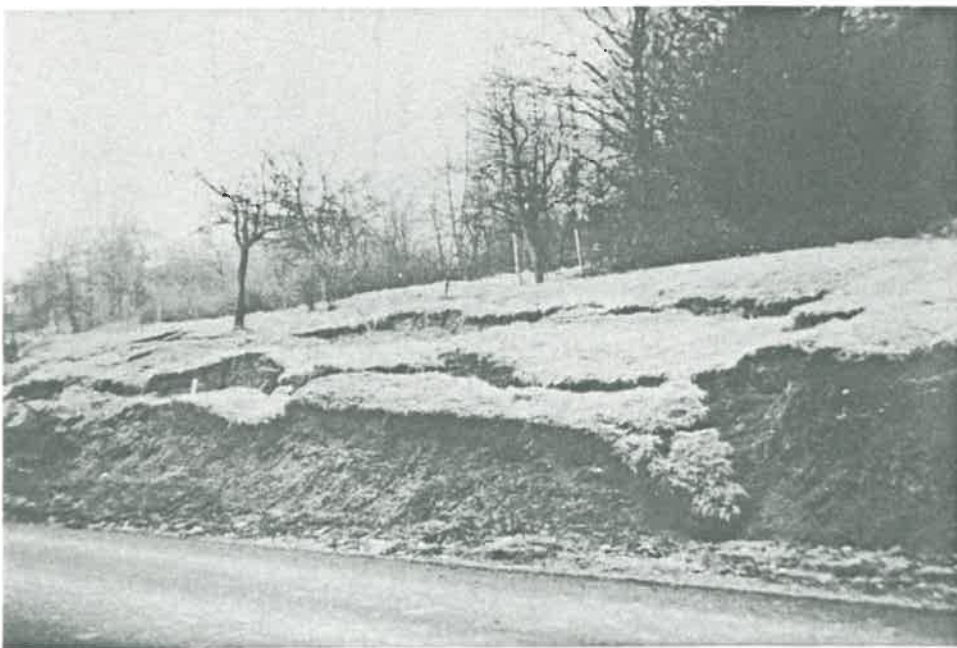


Photo 8



MARNES (GIL)	w %		8,2		11,6		13,5		15,3		16,0		17,7		20,15		22,0		23,8		25,2	
	γd		1,49	1,56	1,55	1,54	1,53	1,51	1,53	1,54	1,53	1,53	1,54	1,54	1,59	1,62	1,60	1,62	1,60	1,60	1,54	
			4,0	5,7	8,2	11,6	13,5	15,3	16,0	17,7	20,15	22,0	23,8	25,2								

LEHMS (LEH)	w %		7,1		8,0		10,3		12,2		14,5		16,0		18,5		21,6		25,1	
	γd		1,56	1,55	1,58	1,61	1,65	1,66	1,70	1,74	1,73	1,64	1,55							
			4,1	6,1	7,1	8,0	10,3	12,2	14,5	16,0	18,5	21,6	25,1							

VIEUX LOESS (HEC)	w %		5,9		8,3		9,9		11,8		14,3		15,9		19,6		20,3		22,3		24,3	
	γd		1,53	1,59	1,62	1,63	1,65	1,67	1,70	1,71	1,73	1,68	1,63	1,59 <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>								
			2,0	4,3	5,9	8,3	9,9	11,8	14,3	15,9	19,6	20,3	22,3	24,3								

LOESS RECENTS (Sp)	w %		5,2		7,2		9,5		10,5		13,3		15,4		17,3		19,4		21,5		23,4	
	γd		1,49	1,52	1,55	1,57	1,59	1,57	1,62	1,63	1,66	1,65	1,60	1,55 <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>								
			1,5	3,9	5,2	7,2	9,5	10,5	13,3	15,4	17,3	19,4	21,5	23,4								

P <sub>1</sub>	w %	3,8	5,6	7,7	9,8	11,6	13,7	15,8	18	19,9	22	24,1	27
	Y <sub>d</sub>	1,49	1,49	1,49	1,50	1,49	1,53	1,57	1,60	1,63	1,62	1,58	1,50

P <sub>2</sub>	w %	2,6	5,1	7,4	9,5	11,3	13,4	17,5	19,8	22,2	25,9
	Y <sub>d</sub>	1,46	1,47	1,46	1,45	1,47	1,49	1,57	1,60	1,52	1,51

P <sub>3</sub>	w %	4,2	6,	8,3	10,7	12,4	14,3	16,4	18,4	22,4	24,7
	Y <sub>d</sub>	1,50	1,50	1,48	1,49	1,52	1,55	1,57	1,59	1,59	1,52

P <sub>4</sub>	w %	3,2	4,3	7,2	8,75	10,4	12,2	18,	20,8	22,8	25,2
	Y <sub>d</sub>	1,48	1,50	1,51	1,47	1,46	1,49	1,58	1,59	1,57	1,53

Loess	w %	1,5	3,9	5,2	7,2	9,5	10,5	13,3	15,4	17,3	19,4	21,5	23,2
	Y <sub>d</sub>	1,49	1,52	1,55	1,57	1,59	1,57	1,62	1,63	1,66	1,65	1,60	1,55

V3	w %	2,4	4,6	6,6	8,8	10,7	11,4	14,8	16,8	22,3
	d	1,52	1,56	1,57	1,59	1,61	1,67	1,70	1,70	1,62

V4	w %	2,5	4,3	5,8	7,6	8,7	10,8	12,4	14,8	18,8	18,7	20,8	22,8
	Y <sub>d</sub>	1,50	1,51	1,49	1,46	1,49	1,56	1,60	1,65	1,69	1,70	1,65	1,60

V5	w %	2,9	5,1	6,9	9,2	13,2	17,3	19,4	21,5	25,5
	Y <sub>d</sub>	1,51	1,51	1,50	1,51	1,55	1,60	1,62	1,65	1,58

V6	w %	4,6	5,6	8,3	10,4	12,3	14,5	16,6	20,2	22,4
	Y <sub>d</sub>	1,52	1,51	1,50	1,53	1,55	1,58	1,60	1,64	1,60

V7	w %	3	5,7	7,8	9,2	13,4	15,5	17,3	21,5	23,4
	Y <sub>d</sub>	1,48	1,53	1,50	1,52	1,57	1,60	1,62	1,63	1,58

Lehm (LEH)	w %	4,1	6,1	7,1	8,0	10,3	12,2	14,5	16,0	18,5	21,6	25,1
	Y <sub>d</sub>	1,56	1,55	1,58	1,61	1,65	1,66	1,70	1,74	1,73	1,64	1,55

N° Horizons		w %																	
		γd																	
72	Ap	5,07 1,35	7,21 1,41	8,21 1,39	9,22 1,43	10,01 1,41	11,14 1,43	13,29 1,47	15,17 1,49	17,59 1,51	19,74 1,53	21,00 1,53							
	B et A	4,90 1,52	7,83 1,52	9,53 1,52	10,56 1,53	13,17 1,56	15,32 1,59	17,05 1,62	18,90 1,65	21,29 1,62	23,35 1,58								

353	Ap	5,22 1,45	7,25 1,48	9,37 1,51	11,11 1,50	13,13 1,55	15,23 1,56	16,90 1,59	19,3 1,60	21,29 1,58									
-----	----	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--------------	---------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

237	Ap	4,54 1,46	6,59 1,46	8,54 1,49	9,76 1,52	10,71 1,52	12,36 1,52	15,81 1,56	18,75 1,58	20,97 1,59	22,73 1,55	24,79 1,51							
-----	----	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--	--	--	--	--	--	--

165	A et B	6,08 1,53	8,22 1,52	9,89 1,54	12,34 1,56	13,21 1,56	15,26 1,59	17,20 1,64	19,21 1,67	21,23 1,63	23,48 1,58								
-----	--------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--	--	--	--	--	--	--	--

80	Ap	4,96 1,40	7,12 1,41	8,88 1,43	10,89 1,41	13,15 1,46	15,12 1,47	17,73 1,48	19,30 1,49	21,74 1,51	24,34 1,51	25,35 1,48							
	A31	4,27 1,51	7,21 1,52	9,07 1,54	10,14 1,54	11,13 1,56	12,14 1,58	13,14 1,59	15,22 1,62	17,44 1,66	19,75 1,65	21,25 1,62	23,51 1,58						

437	Ap	4,47 1,45	6,54 1,48	8,65 1,50	9,55 1,51	10,47 1,51	12,42 1,54	14,48 1,55	16,54 1,57	18,73 1,60	20,53 1,59								
-----	----	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--	--	--	--	--	--	--	--

431	Ap	5,20 1,44	7,11 1,47	9,15 1,50	11,22 1,51	12,31 1,52	13,09 1,54	13,78 1,55	14,77 1,55	16,93 1,59	20,10 1,61	23,15 1,55	26,19 1,49						
-----	----	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--	--	--	--	--	--

N° Horizons		w %																		
		Yd																		
187	AP1	4,48 1,43	6,46 1,45	8,48 1,45	9,55 1,48	10,32 1,50	12,29 1,51	13,92 1,55	16,04 1,56	18,35 1,59	20,36 1,57									
	AP2	4,80 1,50	6,69 1,51	7,72 1,52	8,69 1,53	9,45 1,54	10,59 1,55	11,69 1,56	13,65 1,59	15,65 1,60	17,74 1,63	19,76 1,63	21,82 1,60							

261	AP	4,08 1,44	6,43 1,45	8,26 1,48	9,71 1,49	10,36 1,49	12,39 1,52	14,28 1,52	16,39 1,56	18,34 1,56	20,62 1,57	22,66 1,55	24,82 1,50								
-----	----	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--	--	--	--	--	--	--	--

261	AP	4,40 1,45	6,20 1,47	7,21 1,46	8,16 1,45	9,17 1,50	10,17 1,51	12,25 1,54	14,38 1,56	16,04 1,57	18,24 1,60	20,52 1,59	22,59 1,56								
	A2	4,00 1,54	5,93 1,56	6,91 1,58	7,98 1,59	8,87 1,59	9,96 1,61	11,85 1,63	13,70 1,66	15,57 1,69	17,81 1,69	19,83 1,65	21,83 1,61								

102	AP	4,25 1,40	6,22 1,43	7,23 1,44	8,08 1,45	9,55 1,44	10,25 1,45	12,35 1,45	14,28 1,47	16,24 1,49	18,42 1,50	20,36 1,55	22,67 1,53								
	A2	4,91 1,45	7,11 1,47	9,78 1,51	11,83 1,52	13,69 1,54	15,80 1,56	17,82 1,57	19,71 1,57	21,81 1,55											
A3		5,49 1,54	7,68 1,54	8,62 1,54	9,75 1,56	10,79 1,56	12,59 1,59	14,52 1,61	16,58 1,65	18,78 1,67	20,71 1,62	23,13 1,57									

482 Ap2	w % yd	7,77	1,45	1,48	1,51	1,52	1,54	1,58	1,61	1,59	1,52
---------	-----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

106 Ap	w % yd	5,37 1,40	7,42 1,41	9,44 1,42	10,40 1,45	11,44 1,44	13,42 1,47	15,49 1,50	17,57 1,52	20,72 1,55
--------	-----------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

38	w % yd	5,26 1,26	7,15 1,26	9,29 1,28	11,43 1,29	12,40 1,30	12,94 1,40	14,18 1,43	15,07 1,42	17,16 1,44	20,10 1,47	23,25 1,48	28,78 1,37
----	-----------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

## BIBLIOGRAPHIE

---

- ABELEV M. YU. (1973). "Construction d'ouvrages sur les sols argileux moux saturés" - Traduction par MAGNAN J.P. du Laboratoire Central des ponts et chaussées, 1977, PARIS.
- ANSTETT A. (1972). "Conditions physiques et chimiques des sols de terrains de sport" - Revue française de l'horticulture professionnelle - N°132, Décembre.
- ATTERBERG A. (1911). "Über die physikalisch bodenuntersuchung und über die plästizität der tone". Int. Mitt. für Bodenkunde, 1, 7-9, 10-43.
- AUBERT G. (1978). Classification et cartographie des sols cours DAA-DEA - Pédologie, PARIS.
- AZZI G. (1954). Ecologie Agricole, éd. Baillière, PARIS.
- BEGON J.C. (1979). "Aspects micromorphologiques de la genèse des sols de boubène" - Bull. Asso. Fran. Etude du sol, 1-2 ; 33-48.
- BLAKE G.R. et Al. (1961). "Effect of soil compaction on development and yield of sugar beets" - Journal of the American Society of sugar beets technologists, XI 1961.
- BLUM H.P. "Origine de la compacité des sols" - 22, Sonderheft zur zeitschrift Landwirtschaftliche.
- BOCQUIER G. (1978). Cours de l'organisation micromorphologique des particules - DAA-DEA Pédologie, PARIS.
- BONVALOT J. (1974). Les cailloutis de la forêt de chaux (Jura) - Leur rapport avec les matériaux détritiques du Sundgau et du Nord de la Bresse. - Thèse 3ème cycle, DIJON.

- BOULAIN J. (1978). *Cours de pédologie générale*, 240 pages, INA, PARIS.
- BOULAIN J. (1980). *Pédologie appliquée*, collect. science agronomique, PARIS.
- BOURGES F. *Cours de mécanique des sols - Université PARIS VI.*
- CHAUVEL A. ; PEDRO G. ; TESSIER D. (1976). "Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaoliniques" - Bull, A.F.E.S. N°2 1976.
- CHRETIEN J. (1971). "Essai de caractérisation des sables en tant que squelette minéral du sol" - Ann. agron. 1971 - 22(6) - 615-654.
- CODARCEA V. et Al. (1972). "Etude minéralogique de certains sols sur loess de la plaine de la MOLDAVIE" - Acta géologica Academiae Scientiarum Hungaricae 15 - pp 383-402 - 1972.
- COJEAN R. (1975). "Contribution à une cartographie géotechnique" - Thèse PARIS.
- COLAS G. (1973). "Protection végétale des talus" - Journée de mécanique des sols, NANCY 26-28 Juin 1973 - pp 105-119.
- COMBEAU A. (1960). "Quelques facteurs de la variation de l'indice d'instabilité structurale, dans certains sols ferrallitiques" - Acad. d'Agri. de France - pp 109-111.
- COMBEAU A. (1964). "Remarques sur la variation des limites d'ATTERBERG" - Cah. O.R.S.T.O.M. - Série pédologue - Vol. II.
- COSTET J. ; SANGLERAT G. (1969). *Cours pratiques de mécanique des sols*, DUNOD.
- CPCS (1967). *Commission de Pédologie et de Cartographie des sols.*



- DE PLOEY Jean (1973). *A soil mechanical approach of the erodibility of loess by solifluction* - *Revue de géomorphologie dynamique* - Vol 22, N°2.
- DUCHAUFOUR PH. ; SOUCHIER B. (1979). *Pédologie 1 et 2* édition MASSON, PARIS.  
DAS (1972).
- DUCLOS G. (1971). "Appréciation de l'aptitude à la mise en valeur des sols de Provence" - *Bulletin assoc. française de l'étude des sols*, N°6.
- DUTIL P. (1955). *Les glissements de terrain en Algérie. Essai de mise au point sur les données actuelles du phénomène. Travaux des sections Pédologie et Agrologie* - *Bulletin 1*.
- EGRI G. (1972). *Acta géologica academiae - Scientiarum Hungaricae*, t 16.
- EIMBERCK ; ROUX M. (1976). *Les sols lessivés glossiques à pseudogley de l'Argonne Méridionale* - thèse 3ème cycle - Université de DIJON.
- F.A.O. (1973). "France work of land evaluation" - *Soil Bull* - F.A.O. - ROME, 1973.
- F.A.O. (1974). "Interprétation des prospections pédologiques à l'usage de l'Ingénieur" - *Bulletin Pédologie*, 19 .
- FAURE A. ; FIES J.C. ; MONNIER G. (1973). "Comportement des sols soumis au roulage" - *Convention de recherche INRA-EDF, 1971/1973* - *Station d'Agronomie INRA-AVIGNON*.
- FAURE A. (1976). "Influence de la phase argileuse sur la susceptibilité au tassement des sols" - *Bulletin A.F.E.S.* N°2, 1976.
- FAURE A.(1978). "Comportement des sols au compactage : Rôle de l'argile et conséquence sur l'arrangement des grains" - *Thèse es Sciences* - Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

- FELLER et Al. (1980). "Application de la pédologie et la caractérisation géotechnique de quelques sols fin du Sénégal" - 26ème congrès géol. international - 7-17 Juillet 1980.
- FIES J.C. ; HENIN S. ; MONNIER G. (1972). "Etude de quelques lois régissant la porosité des matériaux meubles" - Ann. agron. 1972 - 236) - 621-653.
- FRANKLIN A.G. (1973). "Compaction and strenght of slighthy organic soils" - ASCE - July 1973.
- FREITAG. "Methods of measuring soil compaction" - USAE waterways Experiment sta ; Vicksburg, Mississipi.
- GLORIOD A. ; TRIEART J. (1952). "Etude stat. de vallées asymétriques sur la feuille de St Pol au 1/50 000<sup>e</sup> - Revue de géomorphologie dynamique N°2 pp 88-98, 1952.
- GRIN RE (1958). "Organisation of water on clay mineral surfaces and its implications for the properties of clay water systems. Water and its conduction in soils" - Highway Res. Bord. Spec. reps 40 - Nat. acad. Sci. Nat. res. Conorsil Pub. 629 - pp 17-23.
- GRIMALDI M. (1977). Etude au laboratoire du sol limoneux du Rheu (Ille et Vilaine) - DEA-ENSA-RENNES-INRA AVIGNON.
- GRIMBERIEUX J. (1955). "Origine et asymétrie des vallées sèches de la Hasbaye" - Annales Soc. géol. Belgique - t LXXVIII pp 267-286, 1955.
- HANUS S. "Augmentation de la compacité du sous-sol et façons culturales" - Landwirtschaftliche Forschung 22 - Sonderheft - pp 78-83.
- HARRIS W.L. (1970). "The soil compaction process" Associate Professor, Agri. Eng. Depart. - University of Maryland - College Park - Maryland.

HICKS W.I. (1944). "A method of computing urban run off" - *Transaction of the A.S.C.E.* - Vol 119 - pp 1227-1250.

Informations Scientifiques. "La cartographie au secours de l'écologie" - N°5 Décembre 1977.

JAMAGNE M. "Bases et techniques d'une cartographie des sols" - *Annales Agronomiques* volume 18, N° Hors série 1967.

JAMAGNE M. (1970). "Sur la mise en évidence d'une séquence d'évolution pédogénétique développée dans les formations limoneuses sous climat tempéré humide" - *CR Acad. Sc. PARIS* - t 270 - p 1773-75.

JAMAGNE M. (1973). "Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du nord de la France" - Thèse - Faculté des Sc. Agron. de l'Etat, GEMBOUX 445p.

JAMAGNE M. (1978). "Les processus pédogénétiques dans une séquence évolutive progressive sur formations limoneuses loessiques en zone tempérée froide et humide" - *CR Acad. Sc. PARIS* - t 286 - 9 Janvier 1978).

JANNE ERIKSON ; HAKAUSSON Inge ; DAUTORS Birger (1974). "The effect of soil compaction on soil - Structure and crop yields" - English translation 1973 - Swedigh.

JOHNSON A.W. ; SALLBERG J.R. (1962). "Factors influencing compaction results" - *Highway Research Board* - Bull. 319.

JOUVE PH. ; OUSSIBLE M. (1979). "Conséquences du tassement du sol sur l'enracinement et la production des plantations de canne à sucre dans les Ghrarb" - *Homme - Terre - Eau.*

KILLIAN J. (1974). "Etude du milieu physique en vue de son aménagement" - *Agronomie tropicale* - Vol. XXIX - N°2-3 Février Mars 1974.

LAFORE B. (1977). "Ville nouvelle de Marne la Vallée" - Thèse de Doct. Ing. PARIS.

LAUTRIDOU J.P. et Al. (1970). "Les minéraux lourds des loess du pays de Caux ; un nouveau critère stratigraphique" - CR Acad. Sc. PARIS - t 270 - Série D, 1879.

LCPC et SETRA. (Ministère de l'aménagement du territoire de l'équipement du logement et du tourisme) - Fondations courantes d'ouvrages d'art.

LEBEDEV. Cité par MANOJLOVIC.

LEE P.Y. et Al. (1973). "Compaction curves of soils" - *Transportation Research record* - H.S.U. - H.R.B. - N°438 - pp 1-9.

LOW P.F. "Mineralogical data requirements in soil physical investigations" in "Mineralogy in soil Science and engineering" - pp 1-34 - *Soil Sc. Soc. America spec. publ.* N°3.

LUGO LOPPEZ M.A. et PEREZ ESCOLAR R. (1968). "Fonctional relation ship between the content of particules smaller than 0,05 and 0,002 mm in size" - *Agric. Univ. P. Rico* - t 52,4, 343-350.

LUONG MINH Phong. *Cours mécanique des sols.* - Laboratoire de mécanique des solides E.P. - ENSMP.

MANOJLOVIE B. (1979). *Contribution à l'étude des caractéristiques méca. d'un matériau argileux non saturé* - Thèse Dor. Ing. 1979.

MARIN-LAFLECHE A. *Classement de terrains.*

MIT (1963). "Engeneering behaviour of Partially saturated soils" -  
Research Report - R 63-2b - pp 1-66.

MONNIER G. (1965). *Action de la matière organique sur la stabilité structurale des sols* - Thèse Doct. Ing. Université de PARIS.

MONNIER G. (1966). *Concept de sol* - Science du sol - N°1.

MONNIER G. (1973). "Paramètres définissant l'état physique du sol" -  
CNEMA - Etude N°3857 11.

MONNIER G. ; STENDEL P. ; FIES J.C. (1973). "Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux - Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol" - Ann. Agron. 1973 24(5) - 533-545.

MORI A. ; HARDY R. ; BEGON J.C. (1978). "Un système de classement des terres suivant leur aptitude à la production agricole, son application à une région de culture intensive dans le Bassin Parisien" - Académie d'agriculture de France - pp 1274-1285 (1978).

NIX H.A. (1968). "The assessment of biological productivity, land evaluations" - By G.A. Steqard, Melbourn, Machillan - p 81.

NOLIN B. (1963). "Etude hydrologique de la haute vallée de l'Ille" - Thèse de 3ème cycle - PARIS.

PEDRO G. (1976). *Cours de pédologie, "Les constituants secondaires des sols et couvertures pédologiques - Introduction cristallographique et cristalochimique"* - PARIS.

PONS L.Y. (1975). "Introduction to the approach to land suitability in Europe" - NITRA Czechoslovakia 1-6 Septembre 1975.

- REMENIERAS G. (1972). "Hydrologie de l'Ingénieur" - Ed. Eyrolles - 3<sup>ème</sup> Ed. PARIS.
- REMY J.C. et MATHIEU C. (1972). "Observations sur le sous-solage en sol de limon" - Bull. de l'assoc. française pour l'étude du sol - 1972 - N° 3.
- REYMON R. Rapport géologique ) section montbeliard-Niffer inédit.
- ROBERT M. (1975). "Principe de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X" - Ann. Agron. - 26(4) - 363-399.
- ROGNON P. (1977). "La dynamique des versants" cours DAA-DEA fédéral de pédologie, PARIS.
- ROMAN R. et NAVARRO. "Relation entre tassement, humidité et texture" - Instituts de edafologia y biologia vegetal del C.S.I.C. - Departamento de Fertilidad de suelos Serrano N° 113 - MADRID.
- ROQUE J. et Al. "Etude agro-pédologique du Sundgau" (à paraître).
- TOTH A. (1971). Etude bioclimatologique du Sundgau - I.N.R.A. S.E.I. de Colmar.
- Sanglerat G. et Al. "Problèmes pratiques de mécanique des sols et de fondations" tl, 1980 - DUNOD.
- SEED H.B. et Al. (1959). "Structure and strength characteristics of compacted clays" A.S.C.E. Proc. paper 221b, October 1959.
- Service d'Etude des Sols (1972). "Les sols dans le paysage et leurs aménagements" - S.E.S. N° 175 MONTPELLIER.

- SHERWOOD P.T. (1975). "Reproductibilité des essais de classification et de compactage des sols" - Bull. liaison L.P.C. Spéciaux - Mars 1975.
- SIMLER L. et MILLOT G. (1972). "L'hydrogéologie du département du Haut-Rhin" Sc. Géol. - Bull. 25 - 2-3 STRASBOURG.
- SKEMPTON A.W. and NORTHEM R.D. (1952). "The sensitivity of clays" - Géotechnique V.II - N°1 - pp 30-53 - 1952.
- SMALLEY J.J. "In situ" theories of loess formation and the significance of the calcium - Carbonate content of loess. Earth. Science Reviews 7(2) 167-85 - Elsevier Publishing company - AMSTERDAM.
- SOANE B.D. (1970). "The effects of traffic and implements on soil compaction" Jour. Proc. Inst. Agri. Engineers (1970) 25.
- Ste Géologique de France (1969). Colloque sur les limons du Bassin Parisien - Mémoire hors série N°5.
- Soil Science Society of America and American Society of Agronomy (1966) : "Soil surveys and land use Planning" - Ed. Bartelli.
- SOUTY N. (1978). "Première contribution à l'étude des propriétés physiques et mécaniques particulières des sols calcaires" - Ann. Agron. 1978 29(5) 421-438.
- STRANDBERG J.O. and WHITE J.M. (1979). "Effect of soil compaction on carrot Roots" - J. Amer. Soc. Hort. Sci. - 104 (3) - pp 344-349 - 1979.
- STENGEL P. et Al. (1979). "Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ" - Ann. Agron. 1979 30(1) 27-51.
- SUBBARAO (1972). "Compactage et mécanique des milieux continus" - Thèse Dr. Ing. GRENOBLE.

- TERZAGHI K. (1951). "Mécanique théorique des sols" Dunod PARIS.
- TERZAGHI K. et PECK R.B. (1961). "Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et aux bâtiments" - Dunod 561 p.
- TESSIER D. et BERRIER J. (1979). "Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols" - Bull. A.F.E.S. N°1 VERSAILLES
- TESSIER D. et PEDRO G. (1976). "Les modalités de l'organisation des particules dans les matériaux argileux - Evolution des principales argiles au cours du phénomène de retrait" - Sc. du sol, Bull. de l'A.F.E.S. N°2.
- TRICART J. (1956). *Cartes des phénomènes périglaciaires quaternaires en France.*
- TRICART J. et CAILLEUX A. "Le modèle des régions périglaciaires" - *Traité de géomorph.* - t.2 - S.E.D.E.S. PARIS.
- TURNBULL W.J. et MAXWELL A. (1961). "Strength requirements in unsurfaced soils for aircraft operation" - S.I.C.S.M. PARIS.
- VINK P.A. (1963). "Aspects de la pédologie appliquée" - Neuchatel - Editions de la baconnière.



## TABLE DES MATIERES

---

### INTRODUCTION

### PREMIERE PARTIE : LES SOLS DANS LE PAYSAGE

CHAPITRE I : PRÉSENTATION DU DOMAINE D'ÉTUDES .....	4
1. - LE CADRE GEOGRAPHIQUE .....	5
2. - LE CLIMAT .....	7
2.1. Précipitations .....	7
2.2. Températures .....	9
2.3. Vents .....	9
3. - LES MATERIAUX PARENTAUX .....	11
3.1. Formations tertiaires .....	11
3.2. Formations quaternaires .....	12
CHAPITRE II : EVOLUTION PEDOLOGIQUE ET CARACTERISTIQUES DES SOLS DU SUNDGAU .....	15
INTRODUCTION .....	15
1. - LES SOLS DEVELOPPES SUR LES LOESS RECENTS .	17
1.1. Sols peu évolués .....	17
1.2. Sols bruns calcaires .....	20
1.3. Sols bruns calciques .....	21
1.4. Sols bruns lessivés .....	22
1.5. Sols lessivés .....	24
1.6. Conclusion et discussion sur la séquence de sols présentée .....	26

2. - SOLS DEVELOPPES SUR LEHMS ANCIENS .....	28
2.1. Sols lessivés dégradés .....	31
2.2. Sols lessivés dégradés tronqués .....	32
2.3. Sols bruns d'érosion .....	35
2.4. Sols hydromorphe .....	37
2.5. Conclusion sur la séquence de sols développés sur lehms .....	39

## DEUXIÈME PARTIE : L'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

CHAPITRE III : TECHNIQUES UTILISÉES AUX LABORATOIRES .....	41
1. - ESSAIS DE RESISTANCE MECANIQUE .....	41
1.1. Le triaxial .....	41
1.2. Essai dans la boîte de cisaillement rectiligne de Casagrande .....	45
1.3. La compressibilité oedométrique .....	47
1.4. Limites d'ATTERBERG .....	48
1.5. Mesures de densités .....	52
1.6. Compactage Proctor .....	54
2. - IDENTIFICATION DES MINERAUX ARGILEUX AUX RAYONS X .....	58

CHAPITRE IV : CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES DU SUNDGAU .....	59
INTRODUCTION .....	59
1. - CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES MARNES DE L'OLIGOCENE .....	61
1.1. Nature chimique de la fraction < 2 µm	61
1.2. Paramètres physiques .....	61
1.3. Caractéristiques mécaniques .....	65
1.4. Problèmes géotechniques des marnes .....	67

2. - CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES LEHMS ANCIENS .....	68
2.1. Nature minéralogique de la fraction <2 $\mu$ m	68
2.2. Paramètres physiques .....	70
2.3. Caractéristiques mécaniques .....	72
2.4. Problèmes géotechniques des lehms anciens .....	73
3. - CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES VIEUX LOESS .....	75
3.1. Nature minéralogique de la fraction inférieure à 2 $\mu$ m .....	75
3.2. Paramètres physiques .....	75
3.3. Caractéristiques mécaniques .....	75
4. - LOESS RECENTS .....	77
4.1. Nature minéralogique de la fraction inférieure à 2 $\mu$ m .....	79
4.2. Caractéristiques physiques .....	79
4.3. Caractéristiques mécaniques .....	80
4.4. Exploitation et problèmes géotechniques des loess récents .....	81
5. - LES DEPOTS D'ACCUMULATION .....	82
5.1. Caractéristiques physiques .....	82
5.2. Caractéristiques mécaniques .....	83

## CHAPITRE V : ÉTUDE PARTICULIÈRE : LE COMPACTAGE 87

INTRODUCTION .....	87
1. - DEFINITION DU COMPACTAGE DES SOLS .....	87
2. - QUELQUES CONSIDERATIONS SUR L'ETAT DES SOLS	88
3. - INTERETS DU COMPACTAGE .....	90
4. - ÉTUDES DU COMPACTAGE AU LABORATOIRE .....	93
5. - QUELQUES REMARQUES CONCERNANT LA TECHNIQUE PROCTOR .....	95
6. - COMPACTAGE DES SOLS DU SUNDGAU .....	96
6.1. Le compactage des matériaux originels	96
6.2. Compactage des horizons B <sub>t</sub> développés sur lehms et sur loess récents .....	105

6.3. Le compactage des horizons superficiels du Sundgau .....	113
------------------------------------------------------------------	-----

TROISIEME PARTIE : DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES

CHAPITRE VI : DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES .....	127
INTRODUCTION .....	127
1. - CARTE DES MATERIAUX PARENTAUX ET LEURS APTITUDES GEOTECHNIQUES .....	128
1.1. Reconnaissance des matériaux .....	128
1.2. Quelques considérations sur l'aptitude aux fondations .....	128
1.3. Les marnes et leurs aptitudes géotechniques .....	129
1.4. Les cailloutis du Sundgau et les problèmes géotechniques liés à la formation qu'ils constituent .....	130
1.5. Les lehms anciens et leurs aptitudes géotechniques .....	130
1.6. Les vieux loess et leurs aptitudes géotechniques .....	131
1.7. Les loess récents et leurs aptitudes géotechniques .....	132
1.8. Les produits d'accumulation et leur aptitudes géotechniques .....	132
1.9. Remarque sur l'utilisation géotechnique et l'exploitation industrielle des matériaux .....	133
2. - LA CARTE DES PENTES .....	137
3. - CARTE PEDOLOGIQUE .....	139
4. - CARTE DE SUSCEPTIBILITE AU COMPACTAGE .....	139
5. - CARTE D'HYDROMORPHIE .....	143
6. - CARTE DE SYNTHESE .....	148
6.1. Introduction .....	148
6.2. Présentation de la carte .....	149
CONCLUSION GENERALE .....	157
ANNEXES .....	166