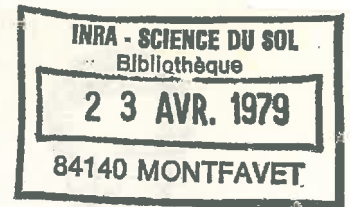


GC 2 TH M23



# Relations entre les propriétés physico-chimiques et les caractéristiques mécaniques des sols compressibles

Vases, tourbes, argiles molles

J.-F. VIDALIE

Docteur en géologie  
Boursier de recherche  
Département de Géotechnique  
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

- Action de recherche pluriannuelle (AR) : 03
  - Terrassements
- Fiche d'action élémentaire de recherche (FAER) : 03 02 6
  - Utilisation des sols de qualité douteuse en remblai.

*Cette étude, effectuée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a fait l'objet d'une thèse en vue de l'obtention du diplôme de Docteur de 3<sup>e</sup> cycle (spécialité : sédimentologie), soutenue en février 1976 devant la Commission d'examen présidée par M. le Professeur Rivière de l'Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay.*

TH 34



**Jean-François VIDALIE**  
*né le 3 avril 1949*

*Maître ès sciences - certificat de géochimie  
Diplômé du Génie industriel d'Orsay, option  
géologie-géophysique  
Docteur en géologie (sédimentologie)*

# Sommaire

---

Résumé	4
Présentation, par A. Le Roux	5
Introduction	7
<b>Chapitre I — Etude géotechnique</b>	<b>12</b>
I.1 Identification géotechnique	12
I.2 Etude du comportement mécanique	15
I.3 Conclusions	19
<b>Chapitre II — Etude sédimentologique</b>	<b>21</b>
II.1 Les méthodes d'étude	21
II.2 Les données sédimentologiques et leur interprétation	23
II.3 Conclusions	30
<b>Chapitre III — Etude texturale</b>	<b>31</b>
III.1 Caractères généraux	31
III.2 Apport de l'analyse texturale à l'étude du comportement mécanique	31
III.3 Conclusions	56
<b>Chapitre IV — Etude physico-chimique</b>	<b>57</b>
IV.1 La physico-chimie des systèmes argileux	57
IV.2 La physico-chimie des sols organiques	63
IV.3 Conclusions	76
Conclusions générales	77
Liste des principaux symboles et abréviations utilisés	78
Bibliographie	80
Résumé en anglais, allemand, espagnol et russe	87

---

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT  
LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES  
58, boulevard Lefebvre — 75732 PARIS CEDEX 15  
Tél. : (1) 532 31 79 — Télex : LCPARI 200361 F

JANVIER 1977

## résumé

*Nos lecteurs étrangers trouveront ce résumé traduit en anglais, allemand, espagnol et russe en fin de rapport.*

*Our readers will find this abstract at the end of the report.*

*Unsere Leser finden diese Zusammenfassung am Ende des Berichtes.*

*Nuestros lectores hallarán este resumen al final del informe.*

*Русский текст аннотации помещен в конце отчета.*

Ce travail s'appuie sur une étude aussi complète que possible d'une quarantaine de sols allant des vases aux tourbes en passant par les argiles molles.

Les techniques d'analyse que nous avons utilisées et adaptées aux problèmes posés font appel à la sédimentologie, la chimie, la microscopie électronique et la physico-chimie.

Le comportement géotechnique des sols est abordé sous l'angle physico-chimique au sens large, avec un double objectif :

- acquérir une meilleure connaissance, et partant, une plus grande maîtrise du comportement mécanique de ces types de sols,
- établir des corrélations entre des paramètres d'essais longs et coûteux et des caractéristiques facilement mesurables.

Les seules techniques sédimentologiques fournissent des renseignements sur la mise en place de ces sols et de là, sur leur caractéristique texturale. Mais c'est aussi par l'intermédiaire des phénomènes physico-chimiques que se font sentir les conditions de milieu. Les caractères sédimentologiques et physico-chimiques, en définissant un état textural - ou mode d'arrangement - conditionnent les propriétés mécaniques des sédiments.

C'est ainsi que nous avons pu mettre en évidence l'influence nocive sur le comportement géotechnique des sols, de la matière organique évoluée (colloïdes humiques). Cette incidence est d'autant plus forte que le sédiment est plus pauvre en colloïdes minéraux. Il est donc indispensable de détecter, non seulement, la présence de matière organique humifiée, mais aussi celle d'argile colloïdale telle que la montmorillonite.

Parallèlement à la mise en évidence d'un certain antagonisme entre colloïdes organiques et colloïdes minéraux, nous avons montré l'existence de corrélations entre la compressibilité et certains paramètres texturaux ; de même entre une caractéristique physico-chimique facilement déterminable : la capacité d'échange de cations, et un essai d'identification tel que l'indice de plasticité.

Enfin, une tentative de classification texturale est proposée.

Mots clés : 42 - Rapport de recherche - sol organique - vase - tourbe - argile - corrélations - physique chimie - mécanique des sols - géotechnique - sédiment - microscope électronique - texture - colloïde - compressibilité - plasticité - THESE - /Géotechnique (57), remblais autoroutiers, matières organiques.

## PRÉSENTATION

A. LE ROUX

Attaché de recherche  
Département de Géotechnique  
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

*Les matières organiques, bien que ne constituant pas systématiquement la phase essentielle des sols étudiés, jouent un rôle prépondérant dans leur comportement mécanique comme en témoigne l'abondante bibliographie relative à ce sujet.*

*Le travail effectué par J.-F. Vidalie se situe au confluent de deux actions de recherche menées au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.*

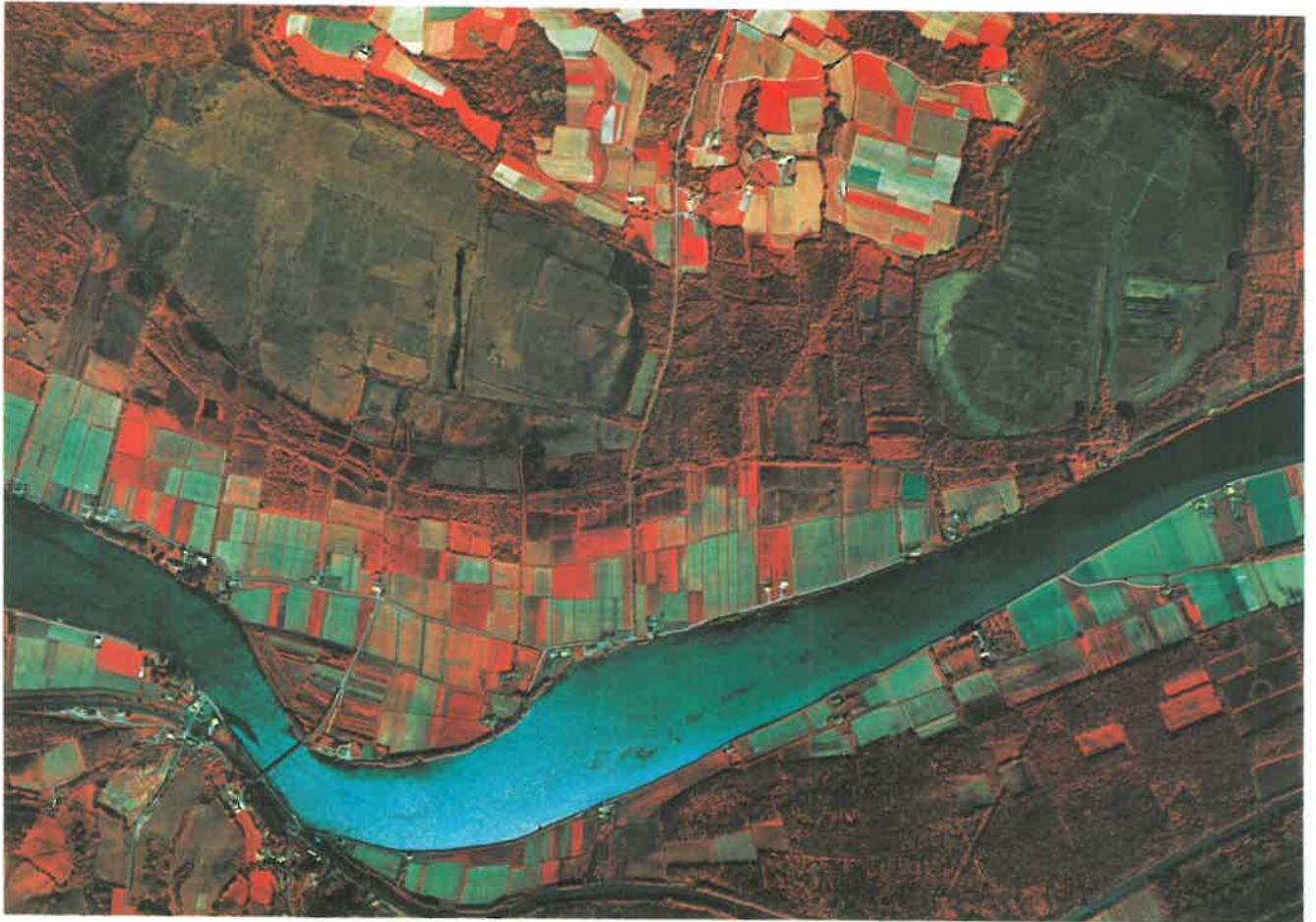
- *L'une vise à l'étude détaillée des sols : composition chimique et minéralogique, analyse granulométrique et texturale.*
- *L'autre cherche à déterminer les caractéristiques mécaniques (résistance au cisaillement, déformabilité) selon divers types de sollicitations (rapide = court terme ou lente = long terme) en vue de leur prise en compte dans le calcul des ouvrages.*

*Les études, les recherches et les publications concernant soit l'un soit l'autre de ces aspects sont extrêmement nombreuses. Par contre, peu d'études traitent simultanément des deux aspects. Ceci souligne l'intérêt du travail de J.-F. Vidalie.*

*Les sols compressibles (vases, tourbes, argiles molles) que l'on rencontre souvent comme sols de fondation des remblais sont étudiés au plan d'identification (teneur en eau, indice des vides, limites d'Atterberg...) et au plan mécanique (paramètre de résistance au cisaillement et paramètre de déformabilité). Pour être significative, l'interprétation nécessite de connaître la constitution du sol (minéralogie, physico-chimie, texture). Un tel travail avait déjà été réalisé au L.C.P.C. essentiellement sur des sols raides. Dans le domaine des sols mous tout était à faire d'autant que les sols de cette catégorie rencontrés en France possèdent généralement une fraction organique importante contrairement aux sols sensibles scandinaves et canadiens par ailleurs très étudiés.*

*L'étude de J.-F. Vidalie touche ainsi un sujet encore mal exploré et elle vient à point pour fournir aux géotechniciens des détails inédits sur la constitution des sols compressibles à un moment où l'étude du comportement mécanique s'affine également puisque les chercheurs ne se satisfont plus du seul paramètre à la rupture. Ils cherchent aussi à déterminer des lois de comportement qui ne peuvent qu'être éclaircies par la connaissance du rôle joué par les différents constituants du sol. C'est ainsi que la mise en évidence d'un certain antagonisme entre colloïdes minéraux et colloïdes organiques est particulièrement intéressante étant donné le rôle de la phase colloïdale dans les sols compressibles.*

*Enfin, la classification texturale proposée paraît très séduisante, elle méritera d'être testée et confirmée sur d'autres sols.*



Vallée de L'Adour

L'emploi de clichés infrarouges permet de préciser les conditions d'humidité en surface et grâce aux contrastes rendus par les propriétés spectrales des diverses espèces végétales, de délimiter ici les zones tourbeuses.



## INTRODUCTION

### LES PROBLEMES POSES ET LEURS ASPECTS ECONOMIQUES

Compte tenu des schémas directeurs d'aménagements, le Maître d'oeuvre doit de plus en plus composer avec des sols de fondations présentant des caractéristiques mécaniques relativement médiocres :

. L'urbanisation croissante, les grandes opérations d'aménagement restreignent considérablement les superficies disponibles, au profit de sites peu favorables,

. L'aménagement du domaine estuarien et de la frange littorale, zones de convergence d'activités économiques, implique la réalisation de travaux sur des sols de faible portance,

. L'implantation de grands axes autoroutiers nécessite très souvent la traversée de terrains ayant un comportement tel, qu'il peut occasionner des désordres importants ( cf. figure 15 ). On compte ainsi, parmi les autoroutes mises en chantier chaque année, plus d'une dizaine de kilomètres de traversée de zones maréca-geuses.

Sur le plan économique, bien qu'il nous soit difficile d'avancer des chiffres, nous pouvons dire que la reconnaissance géologique et géotechnique d'un site revient approximativement à 2-3 % du coût total de l'ouvrage, cependant, les difficultés rencontrées peuvent notablement accroître cette part : ainsi, le passage d'une zone "compressible" nécessite en moyenne un volume de travaux de reconnaissance dix fois supérieur à celui d'un terrain compact et homogène.

A ces derniers, il faut ajouter les travaux de confortation des sols; les techniques de substitutions ou de consolidation : excavations, compactage dynamique, injections, drains de sables, picots, pieux-colonnes ballastés, additifs de structure Bidim\*, électro-osmose, sont autant de procédés qui risquent de gréver lourdement le budget alloué aux travaux de fondations. Aussi convient-il, afin de prévoir avec plus de précision le comportement de sols "réputés compressibles" et d'adopter ainsi des solutions qui soient géotechniquement économiques, d'entreprendre conjointement avec l'étude mécanique, une analyse physico-chimique aussi complète que possible de ces sols.

### OBJET DE L'ETUDE

On a l'habitude de désigner sous les termes "sols organiques" ou sols compressibles, suivant que l'on spécifie la nature ou le comportement, un type de sol regroupant aussi bien des sols riches en matières organiques essentiellement végétales : les tourbes, que des sols dont les constituants colloïdaux tant organiques qu'inorganiques jouent un rôle prépondérant : les vases et argiles molles.

Si les problèmes propres à la tourbe franche se résument essentiellement à la compressibilité, nous verrons que les vases, au contraire, présentent une plus grande complexité dans leur comportement physico-mécanique; nous en donnons en première analyse, une définition inspirée de H. Calès (1968)

La vase se présente comme un matériau à la fois colmatant, cohérent bien que plastique, rigide, thixotropique, compressible mais non élastique, imperméable, pouvant avoir, en fonction de la granulométrie et de la nature des colloïdes associés, de fortes teneurs en eau (jusqu'à 200 %).

Les caractéristiques physiques de ces sols sont telles qu'elles méritent une attention toute particulière.

Cette catégorie de sols fait actuellement l'objet de nombreux travaux d'ordre géotechnique. C'est dans cette optique que s'inscrit l'étude d'un certain nombre de remblais sur sols compressibles.

Afin de porter une appréciation plus complète sur la stabilité d'une fondation de remblai, parallèlement aux essais mécaniques, des études physico-chimiques (au sens large) ont été réalisées. Elles offrent, en plus de l'identification sédimentologique et géotechnique, deux directions de recherches : (figure 1) :

. L'analyse texturale et la physicochimie des colloïdes.

Le travail que nous exposons ici est composé essentiellement de quatre chapitres précédés d'un paragraphe introductif destiné à présenter les "sites compressibles" qui ont fourni les matériaux de cette étude.

Le premier chapitre est consacré à la caractérisation géotechnique et mécanique des sols organiques étudiés.

Dans le deuxième chapitre sont abordés l'étude sédimentologique, l'interprétation concernant la mise en place des sédiments, et les rapports avec la géotechnique.

Dans le troisième chapitre, nous recherchons et mettons en évidence des corrélations entre caractéristiques mécaniques et paramètres texturaux. Un essai de classification des textures, basé sur la granulométrie et la microscopie électronique, est ensuite proposé.

Le quatrième chapitre est une approche physico-chimique du comportement des sols; une place importante est accordée aux colloïdes et aux phénomènes "superficiels" qu'ils engendrent.

Ces quatre parties sont suivies de conclusions générales, regroupant les divers enseignements tirés de cette recherche.

### SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DES SITES ETUDIES

L'objet de ce paragraphe est de replacer dans leur contexte, à la fois géographique, géologique et hydro-géologique, les zones de prélèvement des matériaux de notre étude.

Notre propos n'est pas de procéder à des synthèses régionales, aussi cette présentation sera-t-elle brève.

#### LE CHOIX DES SITES

Ce choix a, avant tout, été guidé par la diversité des problèmes géotechniques que chaque site posait.

Nous montrons à la figure 2 la localisation géographique de principaux sites étudiés, dont une identité sommaire est donnée dans le tableau 1.

\*Bidim : Produit mis au point par la Société Rhône-Poulenc textile ; il s'agit d'un "non tissé" de filaments-polyester continus et aiguilletés, dont les applications se développent dans le domaine des Travaux publics (Amélioration de la portance et maintien des conditions de drainages).

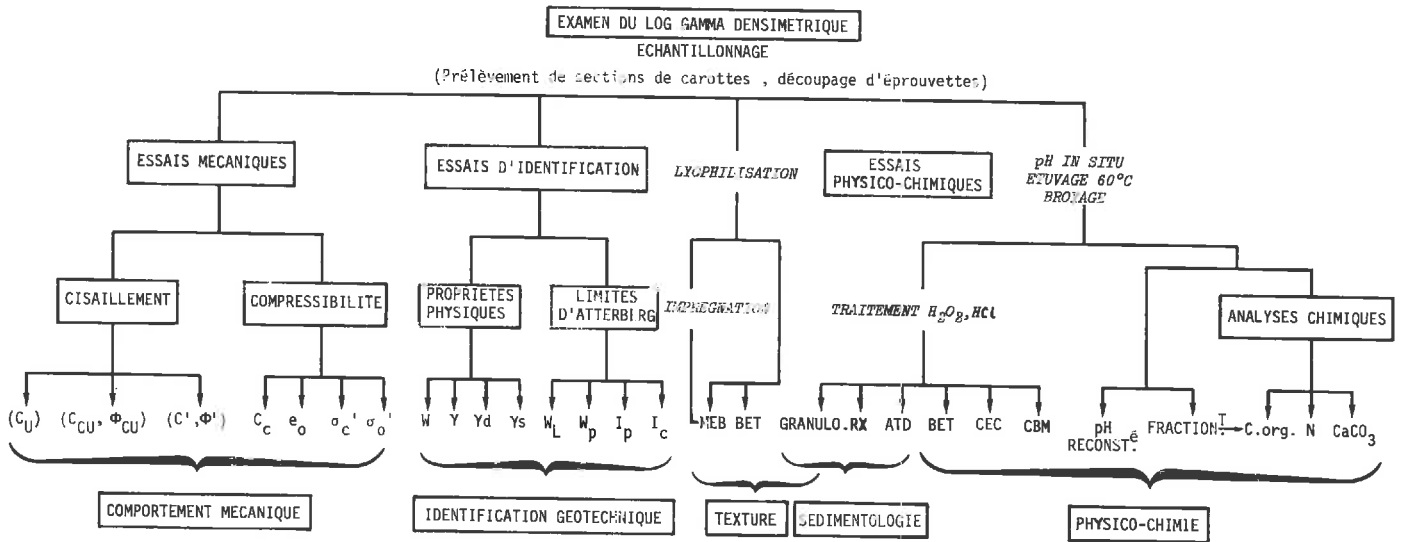


Fig. 1 - Caractérisation des sols organiques. Méthodologie et articulation des études.

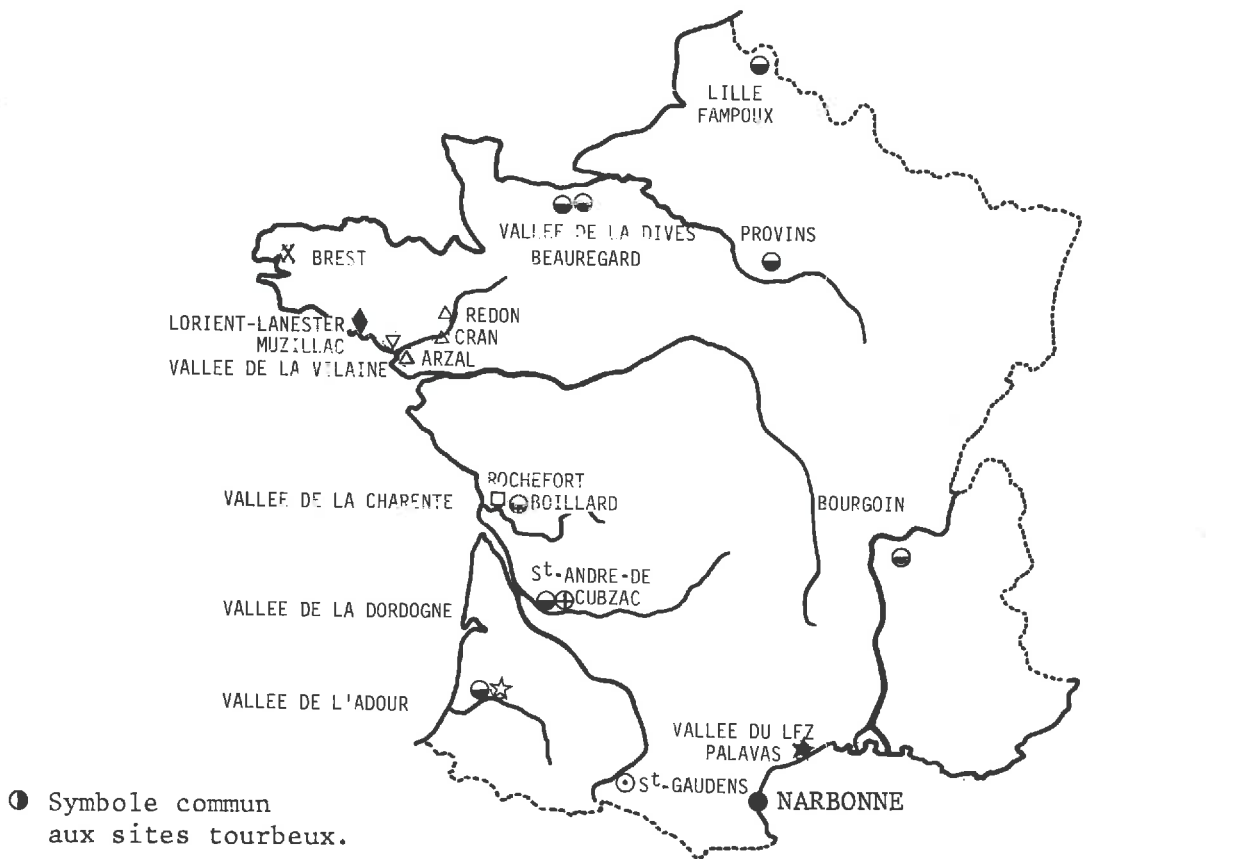


Fig. 2 - Les sites compressibles étudiés et leur symbole respectif.

- |   |   |   |                         |
|---|---|---|-------------------------|
| x | BREST                                       | ⊕ | VALLÉE DE LA DORDOGNE   |
| ◆ | LORIENT-LANESTER                            | ☆ | VALLÉE DE L'ADOUR       |
| ∇ | MUZILLAC                                    | ⊙ | SAINT-GAUDENS           |
| △ | VALLÉE DE LA VILAINE (Arzal - Cran - Redon) | ★ | VALLÉE DU LEZ-PALAVAS   |
| □ | VALLÉE DE LA CHARENTE                       | ● | NARBONNE (données LCPC) |



TABLEAU 1

LOCALISATION SITE, SONDAGES		EPAISSEUR ET NATURE DES ALLUVIONS	NATURE du SUBSTRATUM	NATURE DU PROJET
Région Lilloise	FAMPOUX S 1	2,50 m de tourbe	Craie	Défense des berges de la Scarpe Supérieure
Région de Caen	VALLEE DE LA DIVES SC 3	3,50 m de tourbe	Callovien argilo- calcaire	Franchissement de la vallée par l'Autoroute A 13, en remblai
	SITE DE BEAUREGARD SC 2	4,5 m de Tourbe	Soubassement calcaire	Déviaton du chemin départemental 515
BREST P4		Vase	Gneiss	Aménagement portuaire 3ème forme de Raicub
Vallées du Blavet et du Scorff	LORIENT ARSENAL S 2 bis	Vase	Micaschiste	Construction d'un terre-plein en bordure du Scorff, à proximité d'un quai fondé sur pieux.
	LANESTER	8,50 m de vase	Granite	Remblai sur sol compressible
Vallée de Pen Mur	MUZILLAC S 2 et S 3	17 m de vase	Gneiss	Déviaton de la RN 165 Remblai sur sol compressible
Vallée de la Vilaine	REDON S 4	8 m de vase		Recalibrage des berges (stabilité) en vue de la navigabilité
	CRAN A	17 m de vase	Schiste	Remblai sur sol compressible (remblai d'accès au pont franchissant la Vilaine)
	ARZAL	24 m de vase	Schiste	Ferrage-cluse : - constitution d'une réserve d'eau douce - maîtrise du régime des eaux - désenvasement de l'estuaire
Charente et Affluent	ROCHEFORT	20 m de vase et argile- sableuse	Cénomaniens argilo- calcaire	Installations portuaires
	CHARENTE APS 3	13 m de vase	Substratum calcaire	Tracé Autoroutier (A 10)
	VALLEE DU BOILLARD APS 6	10-15 m de vase, tourbe et Tuf	Substratum calcaire	Passage de la vallée compressible par l'autoroute A 10
Basse-vallée de la Dordogne	ST-ANDRE DE CUBZAC Ao, A3, A4	10 m de vase et tourbe	Marnes Sannoisiennes	Franchissement autoroutier (A 62) et remblai expérimental sur sol compres- sible (comportement à la rupture)
Vallée de L'Adour	LES BARTHES DE L'ADOUR APS 6 APS 8	3 à 6 m de tourbe et 6 m de vase	Substratum marneux	Tracé autoroutier A. 64 - reconnaissance des Tourbières * - Détermination de la hauteur maximale de remblai
Hte-vallée de la Garonne	ST-GAUDENS	14 m de limon et argile mol- le reposant sur une ancien- ne terrasse	Substratum argilo- marneux	Déviaton de la RN 117 Etude de tracé en sites successivement instables et compressibles à proximité d'un remblai S.N.C.F.
Littoral Languedocien	VALLEE DU LEZ	20 m de vase	Molasse	Aménagement du littoral Franchissement de la vallée du Lez Contournement de Palavas
	PALAVAS- les-FLOTS	25 m de vase	Argilo- Marneuse	Remblai expérimental Etude des tassements
Vallée de la Bourbre	BOURGOIN	2 m de tourbe	Calcaire et marno-cal- caire du Jurassique	Remblai expérimental Autoroute A 43 - section Lyon-Bourgoin
PROVINS		15 m de limon Tourbe et Tuf		Déviaton de la ville de Provins Remblai sur sol compressible

\* reconnaissance générale (extension des tourbières) par photographie aérienne infra-rouge dite 'fausses couleurs' (cf. figure hors-texte page 6)

## LE CONTEXTE GEOLOGIQUE

Vasières et tourbières sont des zones d'accumulation récente de matériaux à dominantes respectivement péritique et végétale.

Ces matériaux que l'on qualifie de sols organiques présentent des origines extrêmement diverses : lacustre, fluviale, fluvio-estuarienne et marine.

De par la localisation des principaux sites étudiés ici, nous sommes amenés à nous intéresser plus particulièrement à la paléogéographie et au remplissage sédimentaire des zones fluviales et estuariennes.

À la fin de la dernière glaciation Würmienne (- 13 000 ans), le niveau des mers est très bas = 120 mètres\*, le lit des fleuves, influencé par la "topographie" et la configuration tectonique des terrains sous-jacents, entaille profondément ces derniers.

La période flandrienne, caractérisée au contraire par un réchauffement climatique, marque une remontée du niveau marin consécutive à la fonte des glaces (transgression), et par là même, un relèvement du niveau de base des cours d'eau.

Il se produit tout d'abord un apport massif de sédiments détritiques grossiers, correspondant à cette débâcle sédimentaire.

La recherche d'un nouveau profil d'équilibre amène un remblayage de la partie aval. Il s'ensuit alors des modifications dans le régime d'écoulement. Les conditions hydrodynamiques du milieu de dépôt favorisent une sédimentation fine d'argiles organiques qui vient ainsi constituer les alluvions de la "plaine flandrienne".

La formation de tourbières est avant tout favorisée par des conditions à la fois morphologiques et climatiques. Les tourbières des sites étudiés sont essentiellement des tourbières de fond de vallées dont certaines ont subi l'influence fluvio-estuarienne. La connaissance du paléohydrodynamisme est essentielle à la compréhension de la mise en place de ce que nous appelons les zones mixtes, c'est-à-dire des zones constituées d'une alternance de couches de vases et de tourbes.

On peut penser que lors de l'établissement de telles tourbières, les vallées ne subissaient pas de crues violentes : le développement d'une abondante végétation limitait considérablement le ruissellement des eaux de surface et leur écoulement vers les rivières. Des changements dans le régime hydraulique, liés à une action climatique et peut-être humaine - le déboisement et les cultures intensifiant l'action du ruissellement - sont certainement intervenus pour stopper le développement végétal. Dès lors, occupant entièrement leur lit majeur, les cours d'eau provoquaient ainsi l'enfouissement de ces tourbières sous des alluvions limoneuses.

Témoin de cette reconstitution paléogéographique, la lithologie du remplissage sédimentaire de la basse vallée de la Dordogne nous est fournie par la coupe géologique (figure 3) dressée à partir d'une synthèse des indications de sondages (LPC, Bordeaux).

Une datation au  $^{14}\text{C}$  effectuée sur un sondage du site de Saint-André-de Cubzac (Ao), par le centre des faibles radioactivités de Gif-sur-Yvette (G. Delibrias) a donné pour un échantillon situé à 7,30 m un âge de  $5430 \pm 120$  ans B.P.\*\* et pour un niveau supérieur (2,62m) un âge contemporain du premier, compte tenu des fluctuations statistiques sur les mesures (2 x 120 ans); cela correspond, en supposant une certaine constance dans le dépôt, à un taux de sédimentation relativement élevé de  $1,95 \cdot 10^{-2}$  m/an. On ne peut alors qu'admettre un ensablement rapide dans cette partie fluvio-estuarienne.

## LE CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

La plupart des sites étudiés correspond à des zones facilement inondables.

Par ailleurs, les fluctuations de la nappe phréatique dont le niveau, même en dehors des périodes de crues, se trouve dans la majorité des cas tout près de la surface du sol, ont des amplitudes très inférieures à un mètre; les faibles variations piezométriques sont dues à un amortissement rapide, dans les sols organiques, des variations du niveau des rivières (crues, marnages).

En prenant l'exemple de la basse vallée de la Dordogne, nous montrons sur le schéma de la figure 4 qu'interviennent dans le régime hydraulique de la vallée, à la fois :

- des relations structurales (ou hydrogéologiques) : ce sont les relations qui existent entre le relief encaissant et le complexe alluvial,
- des relations hydrologiques : ce sont essentiellement à côté des infiltrations pluviales, les relations qui s'établissent entre la couche aquifère et la surface d'eau libre.

La couche de base sablo-graveleuse des alluvions flandriennes constitue un aquifère particulièrement transmissif en liaison avec la rivière. L'existence d'un substratum imperméable, et d'alluvions fines en couverture, permet fréquemment d'assimiler la nappe alluviale que l'on rencontre dans la grave à une nappe captive, du fait même des différences de perméabilité. Cet état de fait est mis en évidence lors des forages : on constate très souvent une remontée rapide de l'eau, dès la pénétration dans la grave.

\* Par rapport au niveau zéro actuel ( N.G.F. )  
\*\* B.P. "before present" la référence étant prise par rapport au carbone d'un échantillon étalon de l'année 1950.

COUPE GEOLOGIQUE DE SYNTHÈSE ET PROFIL EN LONG DE L'AUTOROUTE A 62

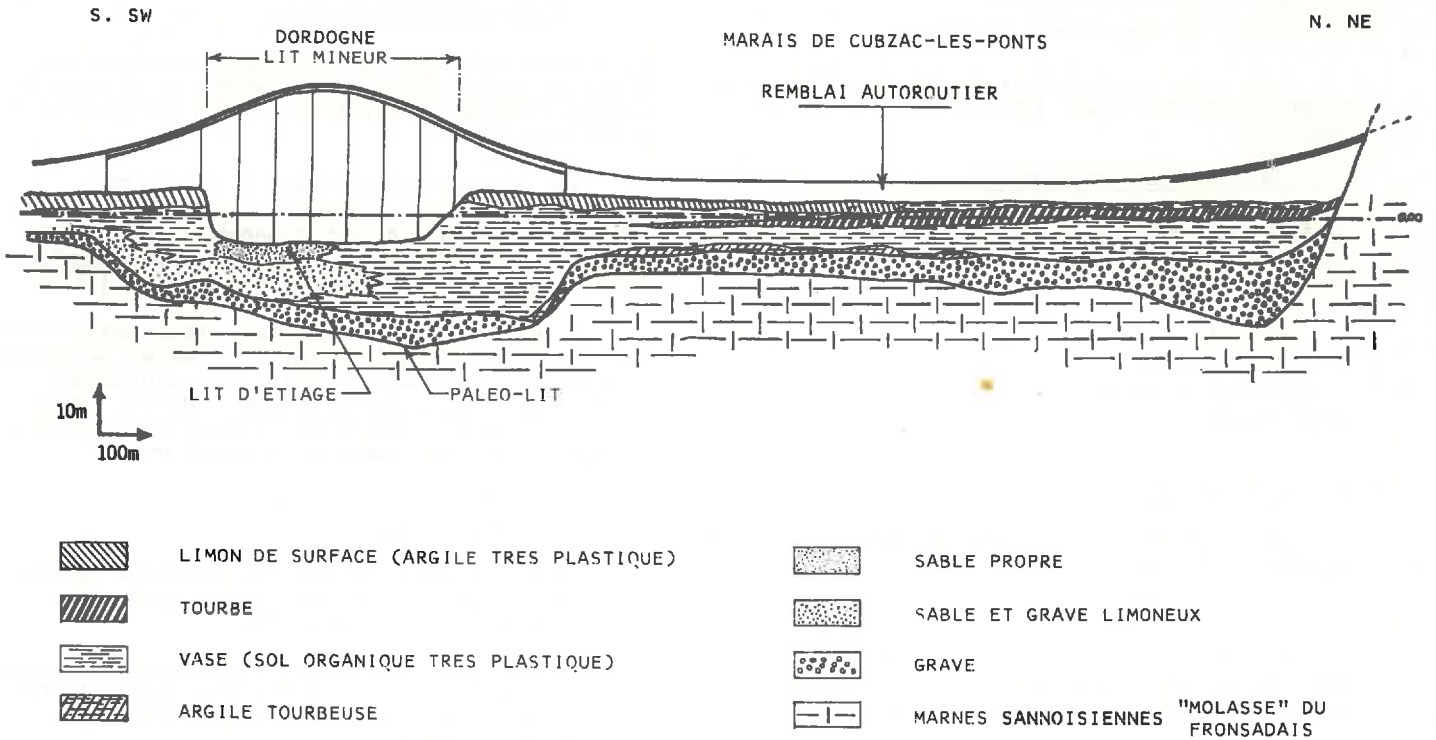


Figure: 3

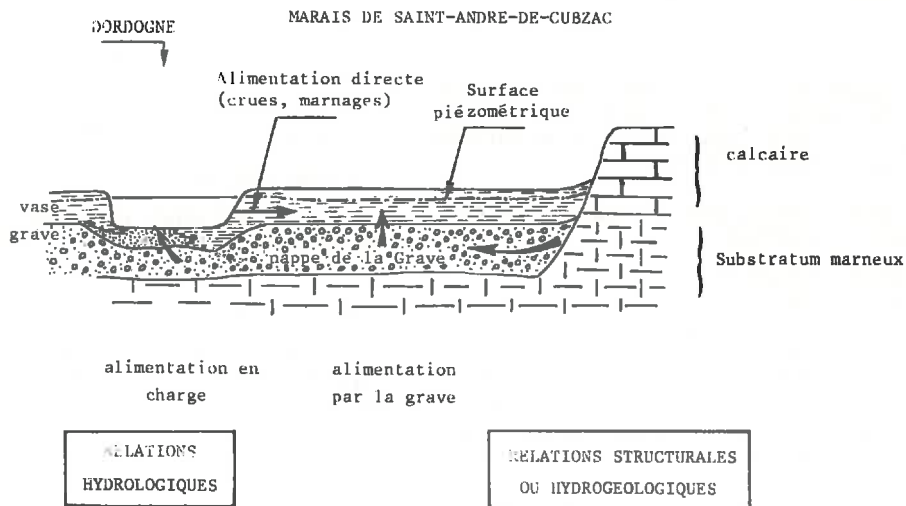


FIGURE N° 4 REGIME HYDRAULIQUE DE LA VASSE VALLEE DE LA DORDOGNE

## CHAPITRE I – ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

Ce chapitre comprend deux parties :

- l'identification géotechnique,
- l'analyse du comportement mécanique.

Nous avons consigné dans des tableaux, les principales caractéristiques des sols étudiés dans ce rapport.\*

### I.1. IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE

Nous regroupons dans ce paragraphe les essais géotechniques simples qui, avec les analyses sédimentologiques (cf. II.1.), permettent une identification et une classification des sols.

Ce sont :

- la teneur en eau,
- la densité ou masse volumique,
- les limites d'Atterberg.

#### A - LA TENEUR EN EAU

La teneur en eau est le pourcentage d'eau rapporté au poids du sol sec :

$$W = \frac{\text{poids d'eau}}{\text{poids du sol sec}} \times 100$$

Nous avons essentiellement procédé par étuvage à 60 °C, suivant le mode opératoire appliqué aux sols compressibles et jusqu'à obtention d'un poids constant.

Nous avons sur quelques échantillons seulement effectué un séchage à 110 °C; on constate des variations de l'ordre de 5-10 % attribuables au départ d'eau hygroscopique (cf. II.2. C).

Les teneurs en eau de la plupart des vases étudiées sont comprises entre 50 et 130 %; on trouve toutefois pour quelques échantillons des valeurs avoisinant 200 %. Les tourbes possèdent, quant à elles, des teneurs en eau variant depuis 300 % jusqu'à 1200 %.

#### B - DENSITE DES SOLIDES POREUX

En toute rigueur, la densité est un nombre sans dimension, définie par référence à la masse volumique de l'eau.

On parle fréquemment de poids spécifique et masse volumique que l'on exprime en KN/m<sup>3</sup> ou en g/cm<sup>3</sup>; nous employerons le plus souvent possible ici cette dernière expression qui est le terme normalisé.

On définit généralement, pour un matériau poreux, deux types de masses volumiques :

- une masse volumique apparente,
- une masse volumique réelle.

1. la masse volumique apparente s'exprime par le rapport de la masse d'une éprouvette d'échantillon, au volume apparent.

Elle se détermine d'un point de vue pratique à partir de section de carottes (éprouvette) de volume et de poids connus.

La masse volumique apparente peut elle-même se différencier, suivant que l'on se réfère à la masse

\*Les lecteurs intéressés par ces tableaux peuvent en faire la demande au département de géotechnique du L.C.P.C.

de l'éprouvette humide ou sèche en :

- . masse volumique humide  $\gamma$
- . masse volumique sèche  $\gamma_d$

2. la masse volumique réelle ou masse volumique des grains du sol s'exprime par le rapport de la masse de l'échantillon sec au volume de matière (volume absolu) et est noté  $\gamma_s$ .

Elle se mesure généralement au picnomètre.

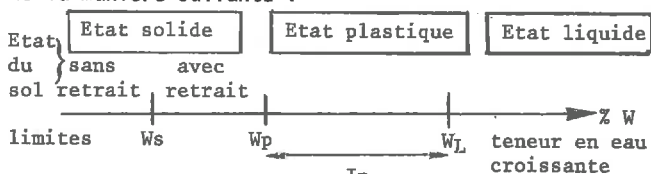
La connaissance de  $\gamma$  et  $\gamma_s$  permet de calculer la porosité  $n$  et l'indice des vides  $e$ , que nous considérerons comme des paramètres texturaux (cf. III.2.B).

La représentation volumétrique concernant certains des échantillons étudiés (figures 5,6) permet de mettre en évidence l'importance relative des trois phases : solide - eau - gaz, pour un volume  $V_T$  de sol. Par ailleurs, la figure 7, montre que la masse volumique apparente dépend étroitement de la teneur en eau.

#### C - LIMITES D'ATTERBERG

Suivant la teneur en eau, les propriétés mécaniques d'un sol argileux évoluent depuis celles d'un liquide jusqu'à celles d'un solide.

On distingue généralement en géotechnique, suivant la consistance d'un sol remanié en fonction de sa teneur en eau, quatre états que l'on peut schématiser de la manière suivante :



Les teneurs en eau correspondant aux limites qui séparent les différents états sont notées :

- W<sub>s</sub> = limite de retrait
- W<sub>p</sub> = limite de plasticité
- W<sub>L</sub> = limite de liquidité

#### 1. Définition des états

En allant vers des teneurs en eau décroissantes, on distingue successivement :

- l'état liquide

L'eau est alors la phase dispersante. La teneur en eau est telle que le sol, dépourvu de toute résistance au cisaillement, a un comportement de liquide.

- l'état plastique

Bien que facilement déformable, le sol se tient naturellement. Il ne s'étale pas dès qu'on lui applique un effort.

- l'état solide

Le sol se comporte comme un solide.

On distingue l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait suivant qu'il se produit ou non une diminution de volume au séchage.

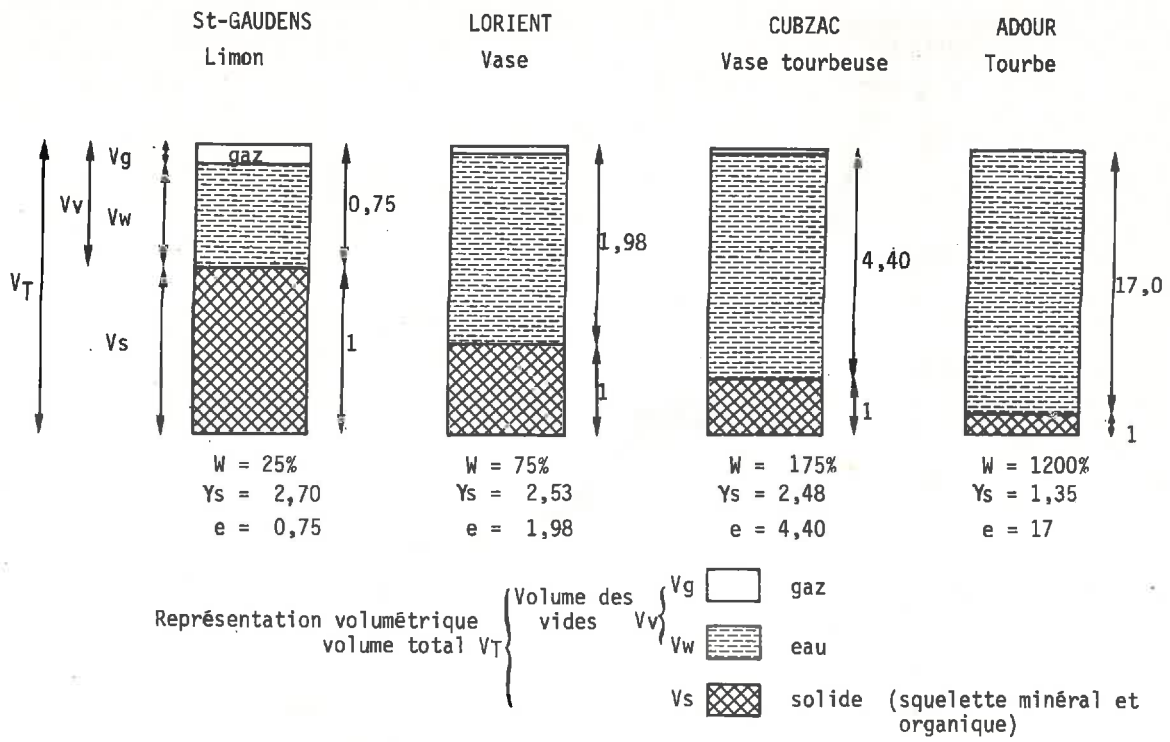


Fig. 5 - REPRESENTATION VOLUMETRIQUE

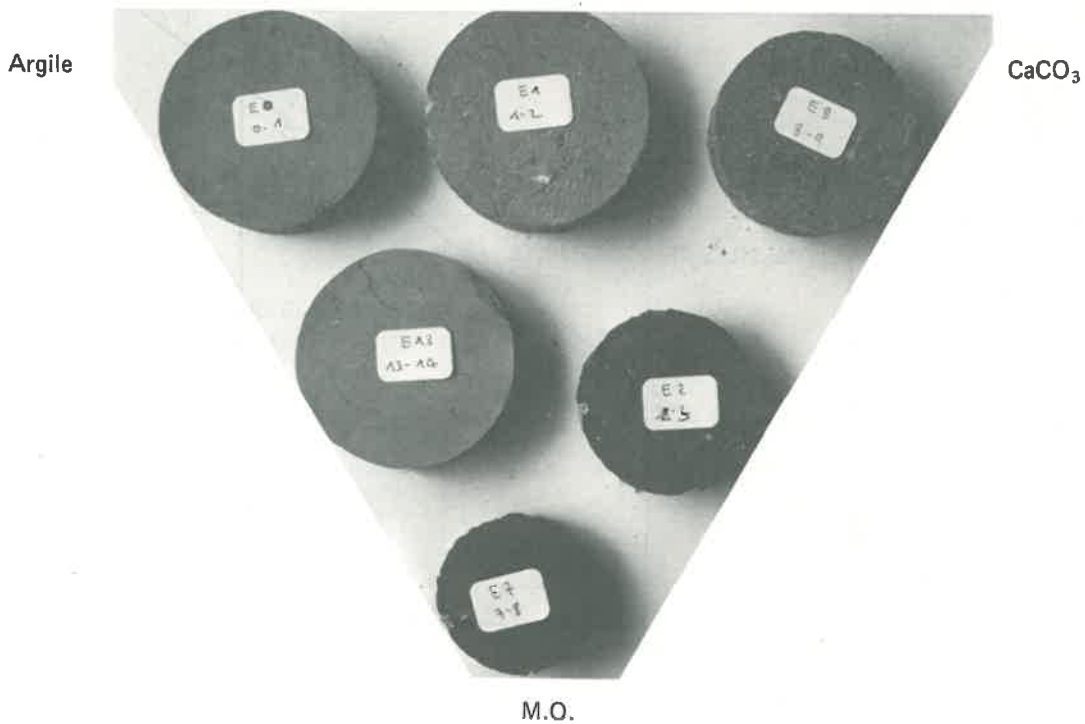


Fig 6 Eprouvettes de volume initialement identique compaction et séchage entraînent une densification qui est fonction de la nature et de la texture du matériau. Disposition tripolaire (argile, CaCO<sub>3</sub>, M.O.)



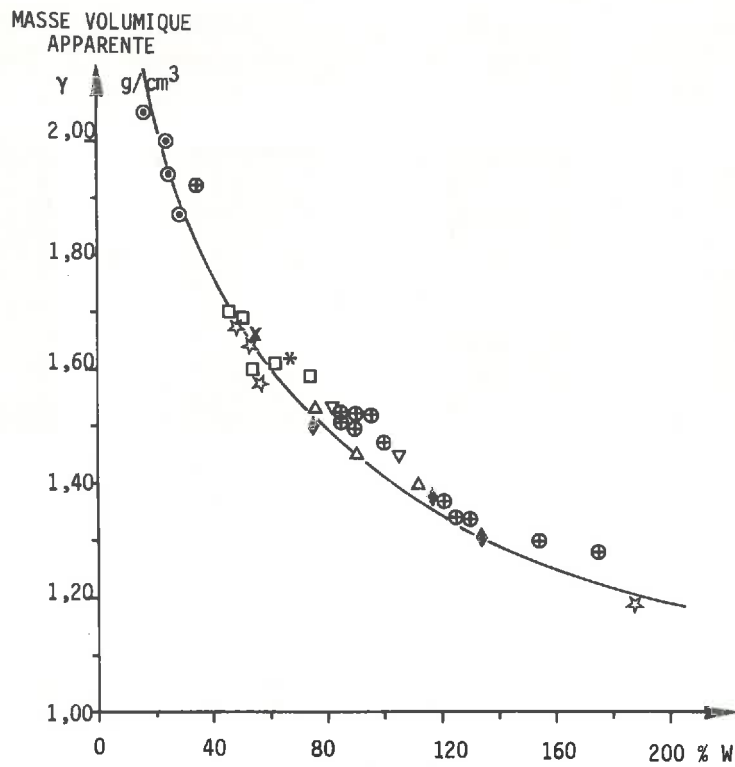


Fig. 7 - RELATION MASSE VOLUMIQUE - TENEUR EN EAU W

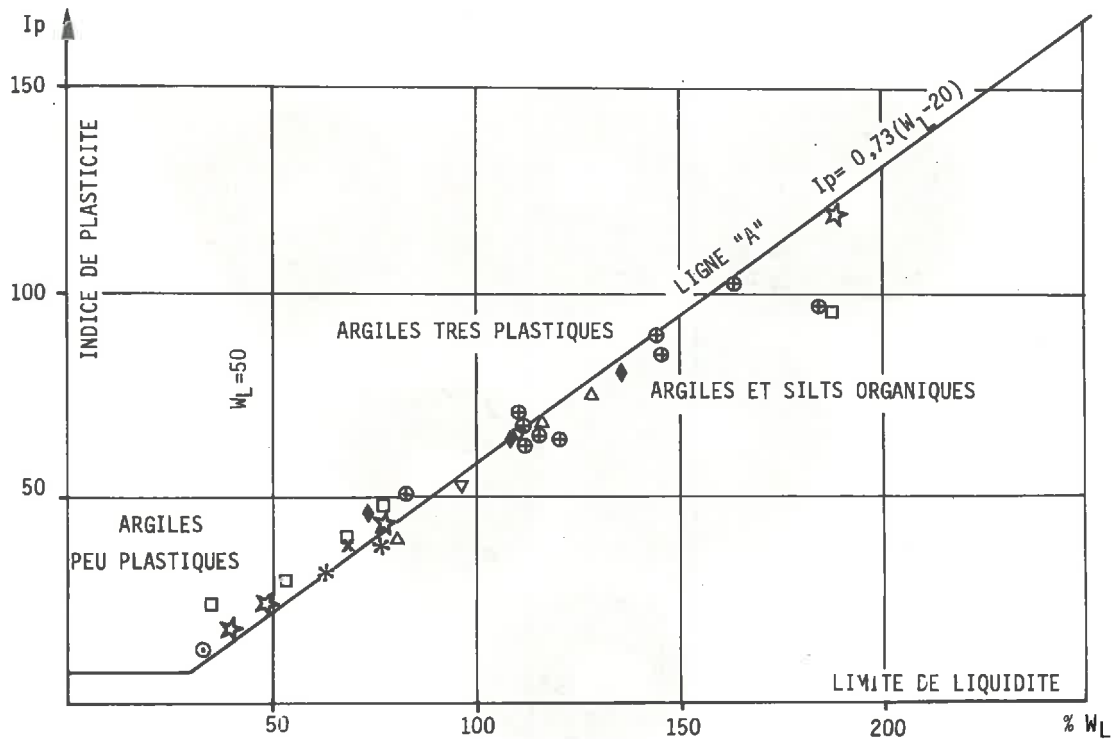


Fig. 8 - CLASSIFICATION DES SOLS ETUDIES. ABAQUE DE PLASTICITE

## 2. La définition des limites entre états

### - la limite de liquidité $W_L$

C'est la teneur en eau correspondant à la limite entre l'état plastique et l'état liquide. Elle est déterminée classiquement à l'aide de la coupelle de Casagrande.

### - la limite de plasticité $W_p$

Elle sépare l'état plastique de l'état solide avec retrait. C'est par définition la teneur en eau, en dessous de laquelle il n'est plus possible de confectionner avec le sol des rouleaux de 3 mm de diamètre sans qu'ils s'emettent.

### - la limite de retrait $W_s$

C'est la teneur en eau juste suffisante pour remplir les vides du sol au moment où il atteint par séchage son volume minimal.

## 3. Définition des indices

La connaissance des diverses teneurs en eau :  $W$ ,  $W_L$ ,  $W_p$ , permet de déterminer un certain nombre d'indices :

### - l'indice de plasticité $I_p$

$$I_p = W_L - W_p$$

en définissant un domaine de plasticité,  $I_p$  permet d'évaluer l'étendue de la zone pour laquelle le matériau est plastique.

### - l'indice de consistance $I_c$

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_p}$$

### - l'indice de liquidité $I_L$

$$I_L = \frac{W - W_p}{I_p}$$

L'indice de liquidité et l'indice de consistance sont reliés par la formule :  $I_c + I_L = 1$

Nous avons positionné sur l'abaque de plasticité les différentes vases étudiées dans ce rapport (figure 8). Nous constatons que la relation linéaire  $I_p = 0,73 (W_L - 20)$  définie par Casagrande (droite "A") et qui sert de base à la classification des sols plastiques, se trouve remarquablement vérifiée ici.

## 1.2. ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE

### A - LA COMPRESSIBILITE

#### 1. Généralités

Un sol compressible est un sol qui subit une forte diminution de volume sous l'action de la charge qu'on lui applique.

Expérimentalement, la compressibilité des sédiments est réalisée à l'oedomètre; soumis à une certaine pression, l'échantillon à l'état saturé subit un tassement dû à l'expulsion de l'eau interstitielle : ce processus constitue le phénomène de consolidation lequel est fonction du temps. Les courbes donnant le

tassement en fonction du logarithme du temps présentent deux domaines correspondant à deux phases :

- la consolidation primaire (dissipation totale des pressions interstitielles),
- la compression secondaire (réarrangement du squelette).

La détermination des caractéristiques oedométriques essentielles à la prévision des tassements s'effectue à partir de la courbe  $e = f(\log \sigma)$  qui exprime la variation de l'indice des vides  $e$  en fonction de la charge  $\sigma$  exercée sur l'échantillon (figure 9).

Tant que  $\sigma$  est inférieur à la pression de préconsolidation  $\sigma'_c$ , la variation de  $e$  est faible; au delà de cette valeur l'indice des vides diminue considérablement.

On définit l'indice de compression  $C_c$  (ou coefficient de compressibilité) comme la pente de cette deuxième portion de courbe,

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma}$$

la pression de préconsolidation  $\sigma'_c$  est déterminée ici suivant la méthode de Casagrande.

Une évaluation de tassement de consolidation primaire  $\Delta H$  peut être donnée par la formule (théorie de la consolidation unidimensionnelle de Terzaghi) =

$$\Delta H = H \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_c}$$

où :

- $H$  est l'épaisseur de la couche compressible du sol de fondation,
- le terme  $\log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_c}$  prend en compte la contrainte effective initiale  $\sigma'_0$  (poids des terres) et son accroissement  $\Delta \sigma$  (poids du remblai), ainsi que  $\sigma'_c$  la pression de préconsolidation qui correspond à la pression verticale maximale qu'ait supporté le sol au cours de son histoire.
- le terme  $\frac{C_c}{1 + e_0}$  qui est composé du coefficient de compressibilité  $C_c$  et de l'indice des vides initial  $e_0$ , est appelé rapport de compression.

#### 2. La compressibilité des sols organiques

Les vases étudiées ont des indices de compression relativement élevés et fréquemment compris entre 1 et 2.

L'évaluation de l'amplitude des tassements implique la connaissance de caractéristiques telles que

$$C_c, \frac{C_c}{1 + e_0};$$

or, la détermination de ces dernières nécessite, en ce qui concerne les sols organiques, des essais de longue durée.

L'éventuelle possibilité d'extrapoler les résultats nous a conduit à rechercher des corrélations avec des paramètres plus facilement déterminables; un premier essai de corrélation est présenté ici. La figure 10, montre la relation entre l'indice de compressibilité et la limite de liquidité  $W_L$  ( $R = 0,915$ ).

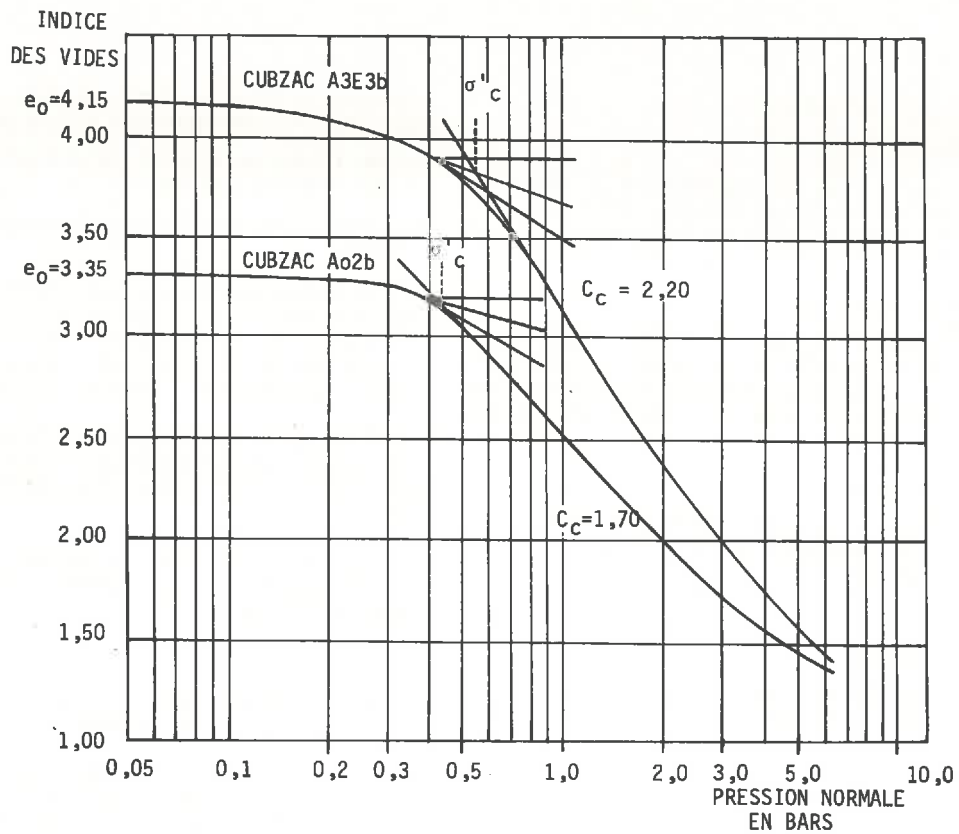


Fig. 9 - COURBES DE COMPRESSION DE DEUX VASES TOURBEUSES

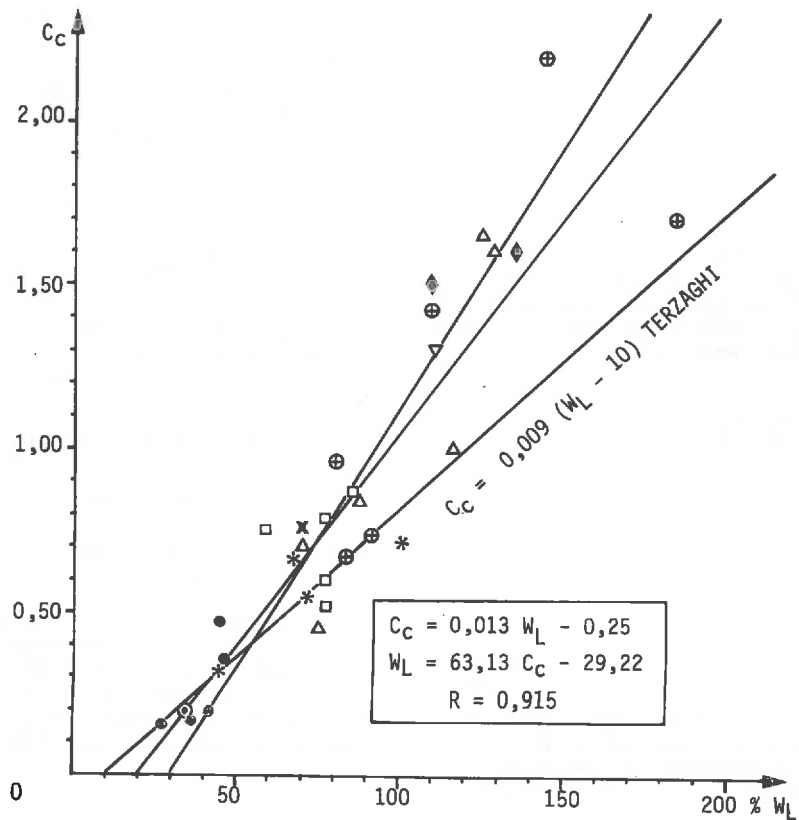


Fig. 10 - CORRELATION INDICE DE COMPRESSION  $C_c$   
LIMITE DE LIQUIDITE  $W_L$

Les droites de régression  $C_c/W_L$  et  $W_L/C_c$  ont été représentées, de même que la droite de l'équation globale définie par Terzaghi.

Les pentes des droites obtenus sont supérieures, ce qui semblerait montrer l'influence d'un autre paramètre que  $W_L$ .

Paute et Macé (1969) ont essayé de montrer l'influence de la consistance  $I_c$  sur la compressibilité : pour une même limite de liquidité, la compressibilité augmente lorsque la consistance diminue.

Par ailleurs, on sait que l'indice de compression rend compte de l'aptitude des particules d'un sol à se rapprocher sous l'action de la charge qu'on applique à ce dernier.

Les déformations que subit ainsi le sol, et que nous appellerons texturales, seront étudiées plus loin (cf. § III.2.B.)

## B - LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT

### 1. Généralités : notion de stabilité d'une fondation

En Génie civil, c'est la résistance au cisaillement qui détermine la stabilité des ouvrages. Cette résistance au cisaillement est généralement définie comme étant le maximum de la contrainte de cisaillement avant rupture. On l'exprime par la formule de Coulomb généralisée qui est l'expression algébrique de la droite intrinsèque de rupture :

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

avec  $\tau$  = contrainte maximale de cisaillement ou taux de cisaillement (en bar)

$c$  = cohésion (en bar)

$\sigma$  = contrainte normale appliquée (en bar)

$\phi$  = angle de frottement interne

ainsi la stabilité nécessite le non-dépassement de la valeur maximale de la contrainte de cisaillement.

- les essais au cisaillement :

Les essais de cisaillement poursuivent deux buts :

a) l'évaluation de la stabilité immédiate par la détermination de la cohésion non drainée initiale  $C_u$  ou cohésion apparente à l'aide de scissomètre de chantier ou des essais rapides de laboratoire (essais U.U.),

b) l'appréciation de la stabilité à long terme par la connaissance :

- de caractéristiques intergranulaires  $C' \phi'$
- de caractéristiques résiduelles  $C'_{res} \phi'_{res}$

- l'évolution de la résistance au cisaillement non drainé avec la pression de consolidation. Les essais de cisaillement consolidés non drainés (C.U.) fournissent une caractéristique supplémentaire  $\phi_{cu}$  qui per-

met de déterminer l'augmentation de cohésion  $\Delta C_u$  correspondant à un accroissement de pression de consolidation  $\Delta \sigma'_c =$

$$\Delta C_u = \Delta \sigma'_c \operatorname{tg} \phi_{cu}$$

la connaissance de la pression interstitielle  $u$  au moment de la rupture, permet de tracer les cercles de Mohr en contraintes effectives  $\sigma' = \sigma - u$ ,  $\sigma'$  étant la composante normale de contraintes intergranulaires, on obtient alors la courbe intrinsèque du squelette solide et les caractéristiques à long terme de la résistance au cisaillement du sol:  $C'$  et  $\phi'$

$$\tau = C' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (\text{cf. figure 11})$$

bien que dans la pratique les contraintes soient des contraintes totales, les paramètres de cisaillement d'un sol cohérent dépendent essentiellement de contraintes supportées par la matrice solide : ce sont les contraintes intergranulaires ou effectives.

Ces caractéristiques étant généralement déterminées :

. soit à partir d'essais triaxiaux consolidés non drainés (essais CU) qui par la mesure de la pression interstitielle permettent de travailler en contraintes effectives,

. soit à la boîte de cisaillement (boîte de Casagrande)

- l'évolution à long terme de caractéristiques de résistance. On sait que la courbe effort-déformation obtenue lors d'un essai de cisaillement présente tout d'abord un pic correspondant au taux de cisaillement maximum, suivi d'une décroissance, la valeur limite de la résistance au cisaillement est appelée cisaillement résiduel :

$$\tau_{res} = C_{res} + \sigma' \operatorname{tg} \phi_{res}$$

ces paramètres résiduels se mesurent à la boîte de cisaillement alterné et peuvent aussi s'exprimer en contraintes effectives. On considère généralement  $\tau_{res}$  après un déplacement relatif de 10 mm.

### 2. Résistance au cisaillement des sols organiques

Bien qu'il n'y ait pas de relation nettement définie entre la résistance au cisaillement non drainé et la teneur en eau naturelle d'un sol, une certaine corrélation apparaît sur un diagramme bilogarithmique (figure 12). On discerne deux domaines : l'un concernant la vase, l'autre la tourbe; cette dernière ayant, lors des essais de cisaillement, un comportement qui s'apparente à celui d'un "milieu frottant".

Nous pouvons dire, d'une manière générale, que la cohésion augmente lorsque la teneur en eau diminue.

Il faut y voir en premier lieu, en dehors d'une dessiccation superficielle, le phénomène de consolidation : la résistance au cisaillement dépend dans une certaine mesure de la pression de préconsolidation  $\sigma'_c$ .

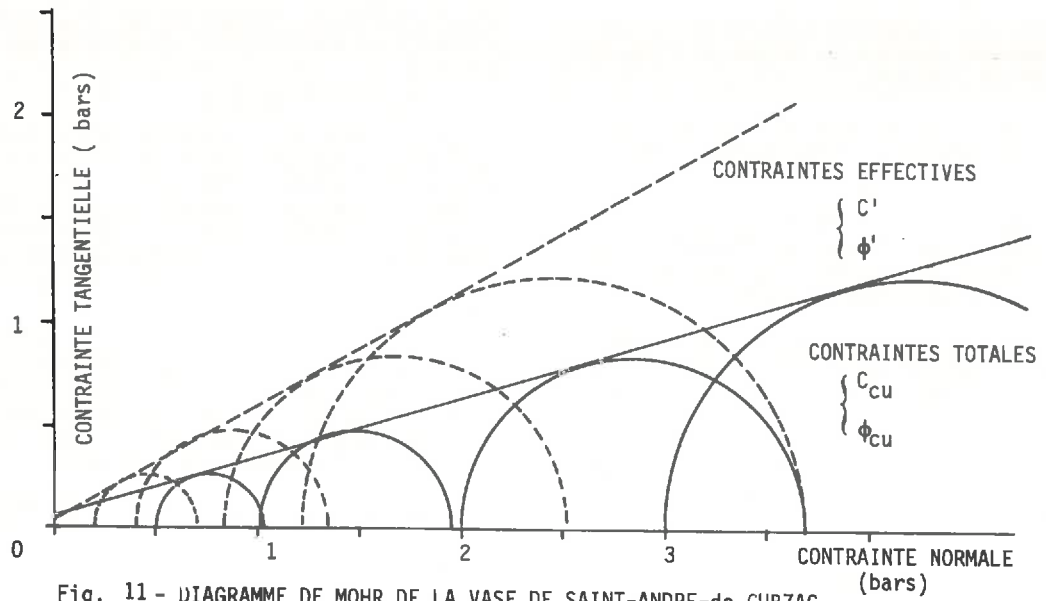


Fig. 11 - DIAGRAMME DE MOHR DE LA VASE DE SAINT-ANDRE-de-CUBZAC  
CONTRAINTES TOTALES ET EFFECTIVES

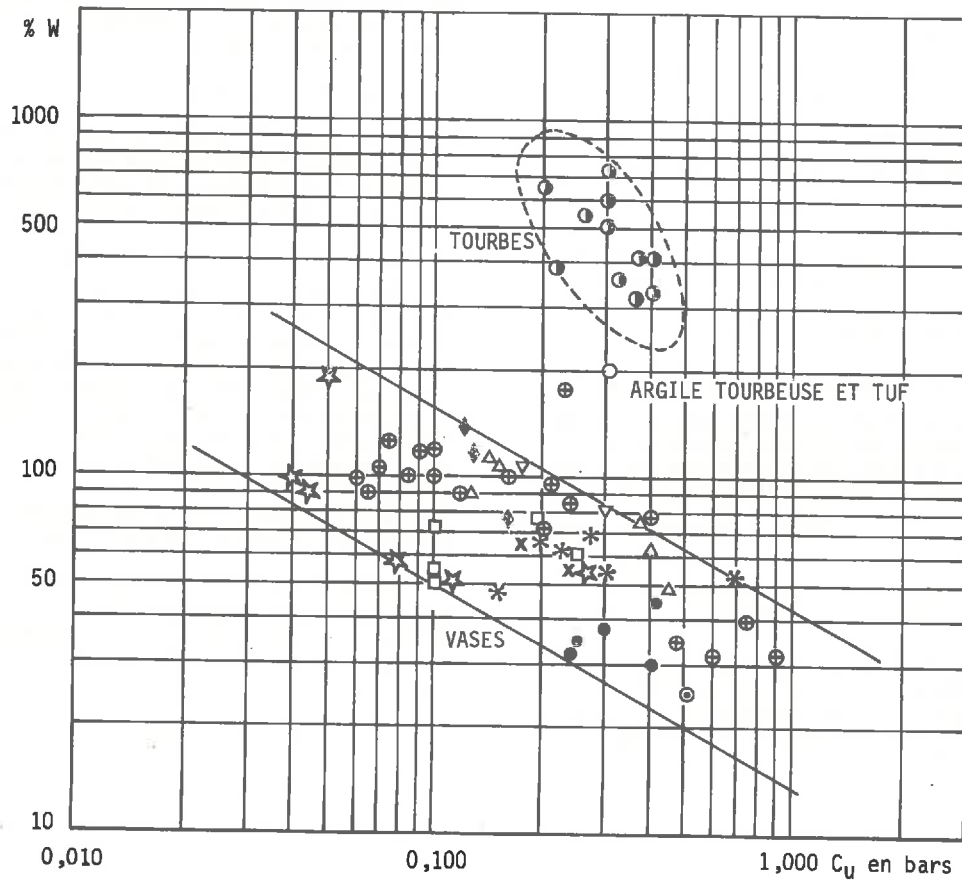


Fig. 12 - INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU SUR LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT



Cette corrélation traduit aussi la manifestation d'autres processus; nous verrons que la présence de colloïdes, par l'intermédiaire de l'eau liée, empêche une consolidation rapide et par conséquent maintient le matériau à l'état d'argile molle (faible consistance); la figure 13 exprime ainsi la relation positive entre la cohésion  $C_u$  et la consistance  $I_c$ .

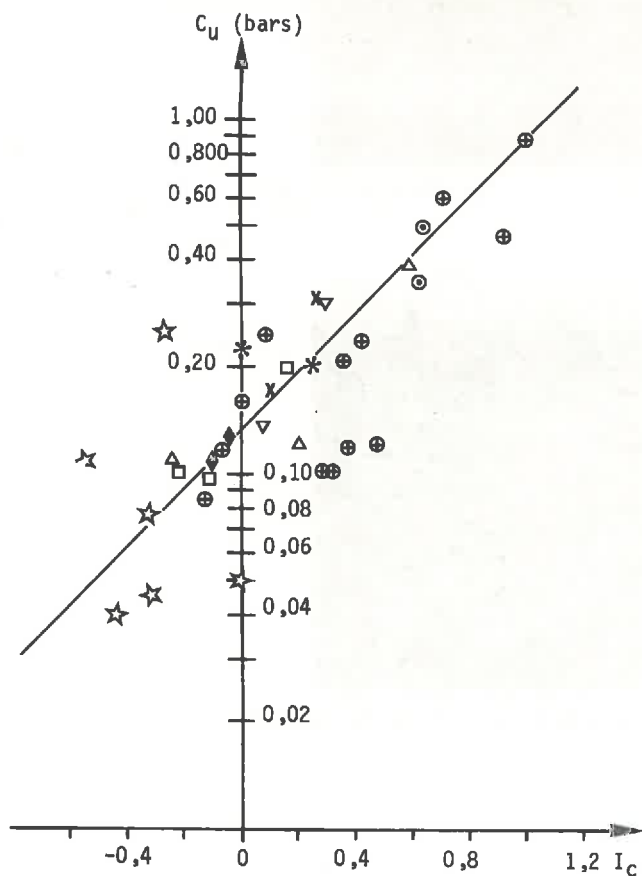


Fig. 13 - INFLUENCE DE LA CONSISTANCE SUR LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT.

### 3. Etude en vraie grandeur du comportement à la rupture

Un exemple d'application de la mécanique des vases à la stabilité des ouvrages nous est fourni par le remblai de Saint-André de Cubzac.

La traversée de la vallée de la Dordogne par l'autoroute A62 (cf. figure 2) a été projetée en deux ouvrages :

- en viaduc pour le franchissement de la Dordogne et l'accès à la falaise,
- en remblai dans la vallée elle-même.

Or, les problèmes posés par la conception et le dimensionnement de la partie en remblai, et dus à l'existence en sous-sol d'argile molle et de tourbe, ont conduit les Ponts et Chaussées à entreprendre,

dans le cadre d'un vaste programme de recherches, l'étude d'un remblai expérimental à proximité du tracé autoroutier et l'analyse de son comportement à la rupture.

Cette expérience de rupture nécessitait une édification rapide. Le remblai a été construit du 10 au 28 juin 1974, date à laquelle s'est produite la rupture, la hauteur totale du remblai étant alors de 4,50 m (figures 14 et 15).

La géométrie initiale du remblai est indiquée à la figure 16a, les banquettes latérales et arrière dont le rôle est celui de contre-poids ont permis d'orienter ainsi la rupture vers l'aval. L'apparition de fissures sur la plateforme a marqué l'amorce de la rupture, celle-ci s'est effectuée d'une manière quasi-circulaire. Au décrochement, apparu à la surface du remblai, correspondait la formation d'un bourrelet, en pied de talus, dû à la remontée du terrain naturel.

Le mécanisme de rupture se trouve résumé dans la coupe transversale de la figure 16, sur laquelle ont été positionnés les cercles de glissement calculé et "observé". Le cercle de rupture "observé" est en fait le cercle le plus vraisemblable : il est estimé à partir de la géométrie du remblai après rupture et des mesures de déformation en profondeur.

L'expérience de remblai construit jusqu'à la rupture a montré que sans une analyse très approfondie des vitesses de déformation, nécessitant la mise en place d'un grand nombre d'appareils de mesures et le dépouillement immédiat de ces dernières (Mieussens, Queyroi, Vogien, 1974), il est difficile de mettre en évidence l'imminence de la rupture et d'évaluer l'importance des volumes mis en jeu.

### 1.3. CONCLUSIONS

Tout d'abord, nous retiendrons de l'identification géotechnique des vases étudiées ici, les fortes valeurs des teneurs en eau (jusqu'à 200 %) ainsi que des indices de plasticité (fréquemment supérieurs à 100). Mais ce chapitre, dont le but était de présenter succinctement les problèmes que posent les sols organiques en matière de génie civil, met surtout l'accent sur deux aspects mécaniques :

- les très fortes compressibilités : elles peuvent conduire, lors du chargement de tels sols, à des tassements assez considérables,
- les faibles résistances au cisaillement : elles posent des problèmes de stabilité de fondations car elles entraînent inévitablement des risques de rupture.

Nous nous attachons dans la suite de ce travail à étudier sous l'angle physico-chimique au sens large les mécanismes qui président au comportement mécanique de ces types de sols.

Dans cette optique, nous aborderons successivement l'analyse sédimentologique, texturale et physico-chimique des sols organiques dont nous venons d'examiner les caractéristiques géotechniques.



Fig 14 Rupture du remblai expérimental de St André de Cubzac.



Fig 15 Détail de la rupture au niveau de la plateforme du remblai.

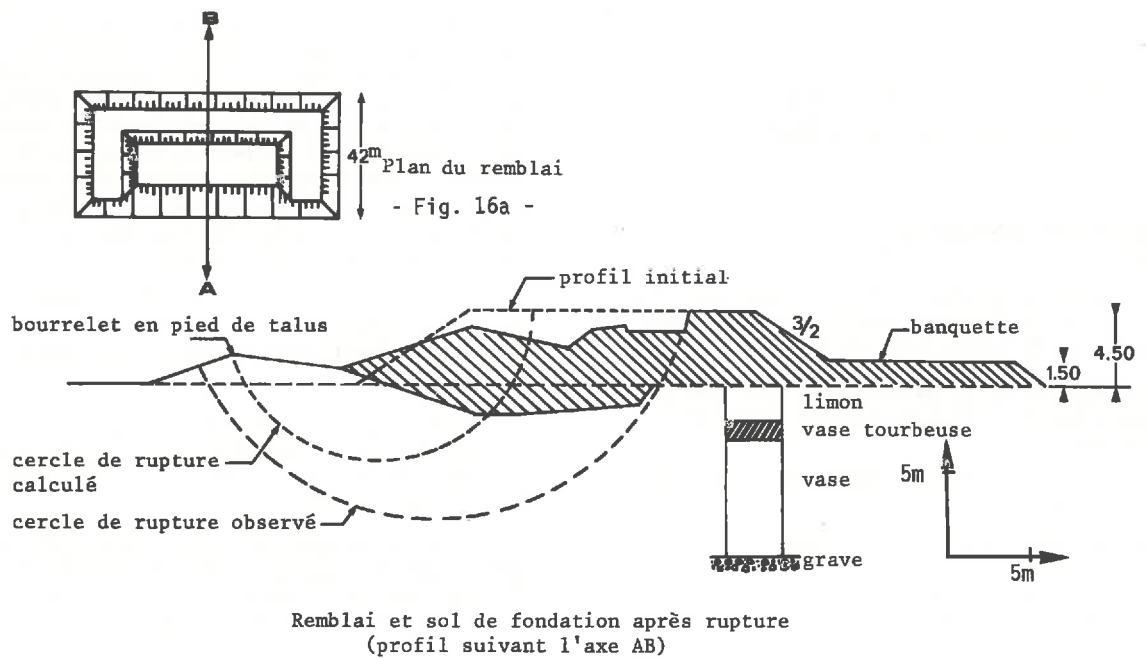


FIG. 16- REMBLAI EXPERIMENTAL DE SAINT-ANDRE-de-CUBZAC  
- COMPOTEMENT A LA RUPTURE -

## CHAPITRE II — ÉTUDE SÉDIMENTOLOGIQUE

### II.1. LES METHODES D'ETUDE

Les méthodes analytiques employées ici pour l'étude des sédiments comprennent :

- la mesure du pH,
- le dosage des matières organiques (C,N),
- le dosage des carbonates,
- l'analyse thermique différentielle (A.T.D.),
- l'analyse diffractométrique (R.X.),
- la granulométrie - Sédimentométrie,

En déterminant les caractéristiques sédimentologiques, ces méthodes contribuent à l'identification des sols.

#### A - LA MESURE DU pH

Le pH a été déterminé à l'aide d'un pH mètre électrique de type métrohm.

Quelques mesures ont été effectuées in situ, lors de l'ouverture des carottes, en utilisant une électrode blindée. De plus, pour chaque niveau échantillonné, nous avons mesuré le pH "reconstitué" en mettant en suspension 10 g de sédiment dans 100 cc d'eau distillée.

#### B - LE DOSAGE DES MATIERES ORGANIQUES

- dosage du carbone organique selon la méthode d'Anne

Le dosage du carbone organique est réalisé en oxydant, dans un ballon muni d'un réfrigérant ascendant, les M.O. du sédiment par un mélange sulfo-chromique (acide sulfurique concentré et bichromate de potassium) que l'on porte à ébullition durant 5 minutes.

L'excès de bichromate est dosé par le sel de Mohr (sulfate ferreux).

La quantité de matières organiques est calculé à partir de l'équation :

$$\% \text{ M.O.} = \% \text{ C}_{\text{Org.}} \times 1,724$$

1,724 est un coefficient moyen, généralement admis par les pédologues, qui tient compte du fait que la M.O. contient en moyenne 58 % de carbone; certains auteurs préconisent comme valeurs de coefficient 1,90 (Guyot et al., 1971) et même 2,00 (Rémy, 1970).

En toute rigueur, ce coefficient devrait être adapté au type de M.O. auquel on a affaire (ex. cellulose : C = 44 %; acide humique : C = 58-60 %). Nous avons conservé ici la valeur 1,724 car elle reflète assez bien, comme nous le verrons, la nature des matières organiques associées aux sols que nous étudions. Il est certain toutefois que pour des sols organiques peu humifiés on minimise ainsi leur teneur en M.O.

- dosage de l'azote organique selon la méthode de Kjeldahl

L'azote est minéralisé par attaque, dans un matras, à l'acide sulfurique concentré sous l'action catalytique de cristaux de sulfate de potassium et de cuivre. La solution obtenue est diluée et ensuite alcalinisée par de la soude 10 N en excès. L'amoniac qui se forme est entraîné par un courant de vapeur d'eau et absorbé

par un volume déterminé d'acide sulfurique. On dose en retour par la soude la quantité ainsi neutralisée. On détermine alors la quantité d'azote sachant que :

1 cm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> N/10 correspond à 1,4 g d'azote.

L'azote n'a été dosé que sur quelques échantillons.

#### C - LE DOSAGE DES CARBONATES

Le dosage des carbonates est effectué par la méthode du calcimètre Dietrich Frühling modifié L.C.P.C. (1974).

On obtient la teneur en CO<sub>2</sub>Ca d'un sol en mesurant le volume de gaz carbonique dégagé lors de l'attaque de l'échantillon de gaz carbonique par l'acide chlorhydrique pur et froid dilué au demi

#### D - L'ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE

L'analyse thermique différentielle (A.T.D.) consiste à mesurer la différence de température  $\Delta T$  entre deux corps (échantillon et un corps témoin inerte : l'alumine calcinée) soumis simultanément à une même loi de chauffe (vitesse de 10 °C/minute jusqu'à 1100 °C) sous courant d'oxygène. L'appareil utilisé est un micro-analyseur thermique différentiel équipé de sondes à thermocouples creux brevetés C.N.R.S.-ANVAR.

#### E - L'ANALYSE DIFFRACTOMETRIQUE

L'identification des minéraux argileux est effectuée par diffractométrie de R.X.

La préparation des échantillons est faite de la manière suivante :

- après destruction des matières organiques à l'eau oxygénée à 110 volumes et des carbonates par l'acide chlorhydrique N/10, la fraction fine inférieure à 2 $\mu$  est prélevée par sédimentation et déposée sur des lames de verre dépoli confectionnées selon la technique des agrégats orientés,

L'identification se fait à partir de trois diagrammes, suivant le traitement : (fig. 17).

- . brut
- . cuisson à 500 °C
- . traitement "glycérine"

un quatrième diffractogramme peut être nécessaire : le traitement à HCl.

L'approche quantitative est réalisée en comparant l'intensité des raies principales de diffraction (001) sur le spectre diffractométrique correspondant au traitement "glycérine".

#### F - L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

La granulométrie qui permet de déterminer la distribution dimensionnelle en poids de la phase silicatée des sédiments comprend :

- le tamisage de la fraction grossière,
- la sédimentométrie de la fraction fine (<35 $\mu$ ) par la technique de la pipette d'Andréasen-Rivière.

On exprime les résultats de cette analyse par une courbe cumulative en coordonnées semi-logarithmique. (cf. exemple de courbes obtenues p.28)

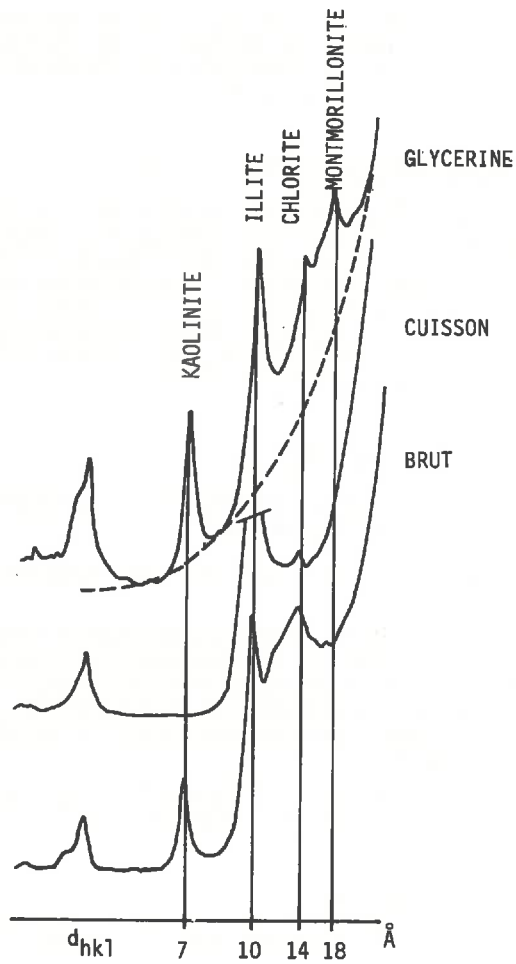


Fig. 17 - DIFFRACTOGRAMME DE LA VASE DE ROCHEFORT

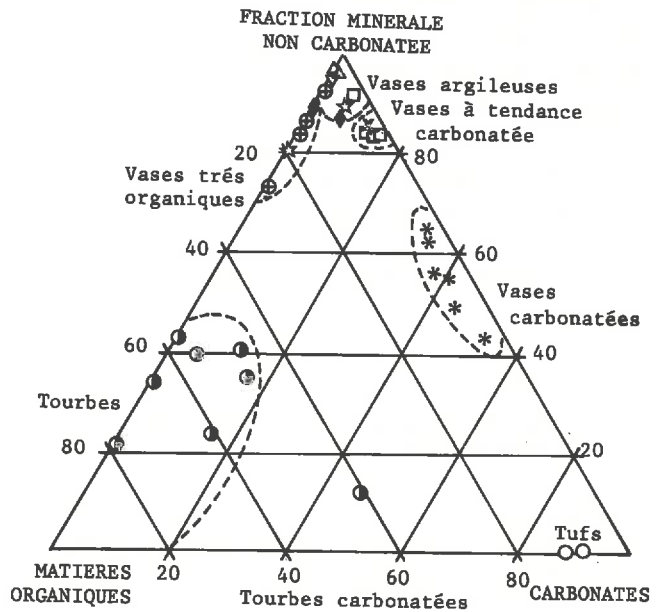


Fig. 18 - LES COMPOSANTS DES MATERIAUX ETUDIES

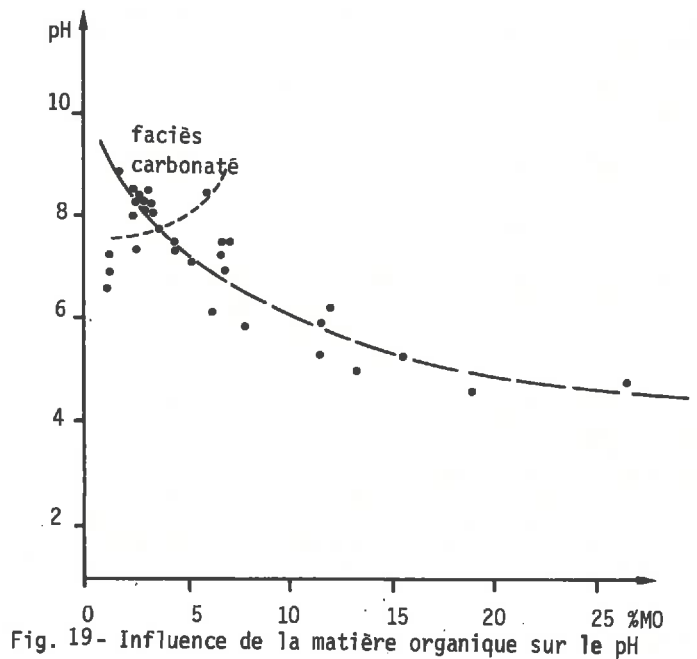


Fig. 19- Influence de la matière organique sur le pH



## II.2. LES DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES ET LEUR INTERPRETATION

Afin de mieux interpréter les données minéralogiques et sédimentométriques, il nous a semblé intéressant de reprendre, tout d'abord, les travaux récents d'un certain nombre d'auteurs sur la sédimentation actuelle en milieu estuarien.

### A - GENERALITES : LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE ET LES MODALITES DE MISE EN PLACE DES SEDIMENTS

La transition entre le domaine continental et marin est assurée par un ensemble fluvio-marin, constitué d'un estuaire (aval) et d'une rivière maritime (amont), et soumis à une double action : chimique d'une part (marée saline), mécanique d'autre part (marée dynamique).

Dans l'estuaire, un brassage important de sédiments s'effectue au niveau d'un système très turbide "bouchon vaseux - crème de vase" :

- le bouchon vaseux caractérise une zone très chargée en suspension déplacé sous l'influence des courants de marée; les diverses positions occupées expriment l'antagonisme des forces liées aux courants de marée et celles liées au courant fluvial.

- la crème de vase ou couche crème est définie en hydraulique comme la limite entre fonds immobiles et eaux très turbides qui les surmontent : c'est une zone d'échanges constants entre le stock vaseux déposé et le stock mobile. Il s'agit donc des vases très liquides des dépôts superficiels facilement remobilisables et pouvant subir des déplacements saisonniers (Allen, 1972 et 1974).

L'agglomération des particules argileuses en flocons est l'un des principaux mécanismes à l'origine de la formation de vasières.

Cependant, comme le fait remarquer L.R. Lafond (1967), le phénomène de floculation ne doit pas être confondu avec le dépôt des agrégats floculés eux-mêmes. Alors que la floculation est un phénomène purement physico-chimique (cf. § IV), le dépôt des agrégats dépend au contraire de facteurs dynamiques.

Les facteurs physico-chimiques (salinité, pH, teneur en matières humiques) et dynamiques (turbulence) peuvent être à la base de transformations minéralogiques (Latouche, 1972) et de sédimentations différentielles; ces dernières procédant d'une sélection soit physico-chimique, soit dynamique.

En résumant d'une manière très schématique, on peut dire que la sédimentation, à l'origine du colmatage et de la création de marais, est issue de deux phénomènes :

- la floculation de suspensions argileuses produite au contact de l'eau salée,

- le dépôt sur les berges, lors de l'étale de pleine mer et dans les zones d'annulation de la turbulence, d'un stock vaseux qui a subi dans l'estuaire un brassage important.

### B - IDENTIFICATION PAR ANALYSE CHIMIQUE

La seule connaissance des teneurs en carbonates et en matières organiques d'un sol permet de dresser le diagramme triangulaire présenté à la figure 18. Nous voyons ainsi se différencier des vases, soit purement argileuses, soit à tendance organique ou carbonatée, ainsi que des tourbes franches, argileuses ou bien même carbonatées. Le pôle "carbonate" est essentiellement représenté ici par des tufs qui sont des matériaux résultant de processus principalement chimiques.

Les carbonates et les matières organiques apparaissent comme des composants fondamentaux.

La mesure du pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de l'un ou l'autre de ces constituants.

Comme le montre la figure 19, l'acidité dépend étroitement de la teneur en matières organiques.

### C - IDENTIFICATION PAR ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE (A.T.D.)

L'examen des courbes A.T.D. apporte deux sortes d'indications (figure 20 a,b,c).

- la confirmation de l'identification des espèces argileuses par diffractométrie de rayons X (cf. § II 2 d), grâce à la position des pics exothermiques (changements de structure) et endothermiques (deshydratation :  $H_2O^+$  et déshydroxylation :  $OH^-$ );

- l'identification des autres composants de la vase : quartz, calcite, pyrite, matières organiques, eau hygroscopique ( $H_2O^-$ ).

L'analyse comparée des courbes réalisées sur l'échantillon brut et traité à l'eau oxygénée permet de mettre en évidence la M.O. et la pyrite. Comme le signale J. Debras-Guedon (1967), il apparaît une certaine proportionalité entre la surface du pic exothermique attribué au carbone organique total, et sa teneur dans l'échantillon (ex. Rochefort et Cubzac-); dans ce dernier cas, la forte teneur en M.O. donne un pic qui masque le pic endothermique des argiles.

Lorsque l'échantillon étudié présente peu de M.O. il est possible d'identifier sur la courbe brute le pic "Exo" de la pyrite, ce qui n'est pas le cas lorsque l'échantillon est traité (oxydation du fer).

Signalons enfin le pic "endo" de départ d'eau de basse température :  $H_2O^-$ , l'évaluation de cette perte d'eau hygroscopique (ou eau solidement liée) peut-être une information intéressante quant à l'importance des colloïdes dans le sol (cf. § III et IV).

### D - IDENTIFICATION PAR DIFFRACTOMETRIE DE RAYONS X

Les résultats de l'identification des minéraux argileux par diffractométrie de rayons X sont exposés sur un diagramme triangulaire avec les pôles : kaolinite, Illite-Chlorite et Montmorillonite (figure 21) (la chlorite étant le minéral le plus faiblement représenté). Nous avons ainsi une vue d'ensemble de la distribution minéralogique des argiles, à partir de



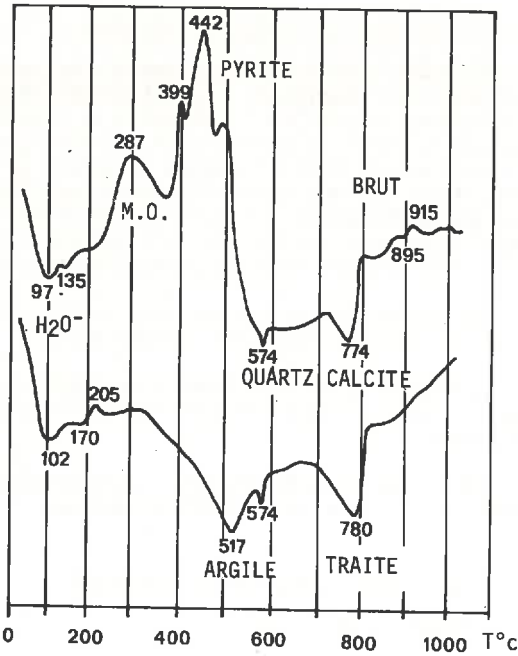


Fig. 20a - ATD DE LA VASE DE ROCHEFORT (S26 5,20m)  
(courbes des échantillons brut et traité)

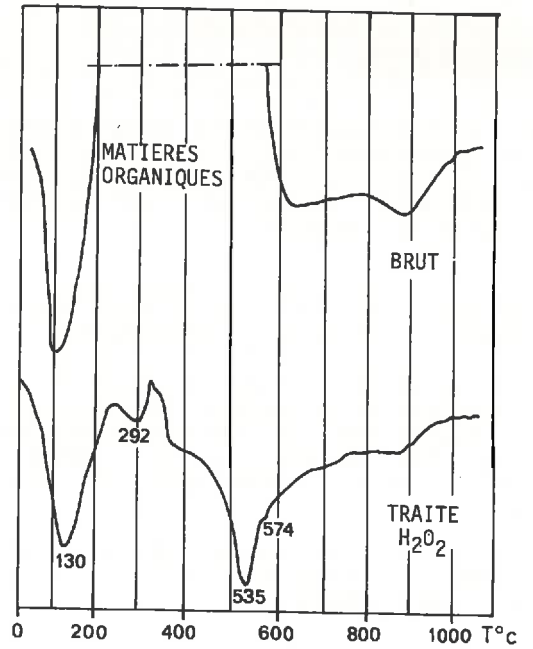


Fig. 20 b - ATD d'une vase tourbeuse  
SAINT-ANDRE-de-CUBZAC (Ao2)  
( 'brut' et 'traité' )

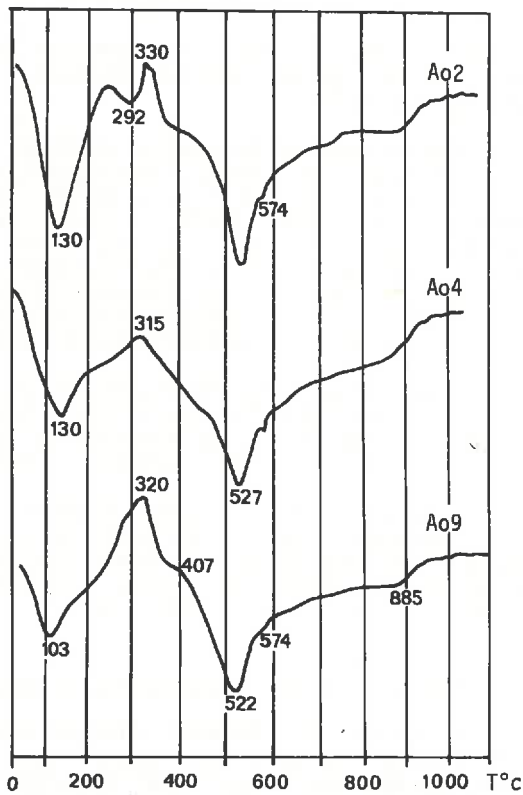


Fig. 20 c - ATD des vases de SAINT-ANDRE  
de-CUBZAC (fraction silicatée)

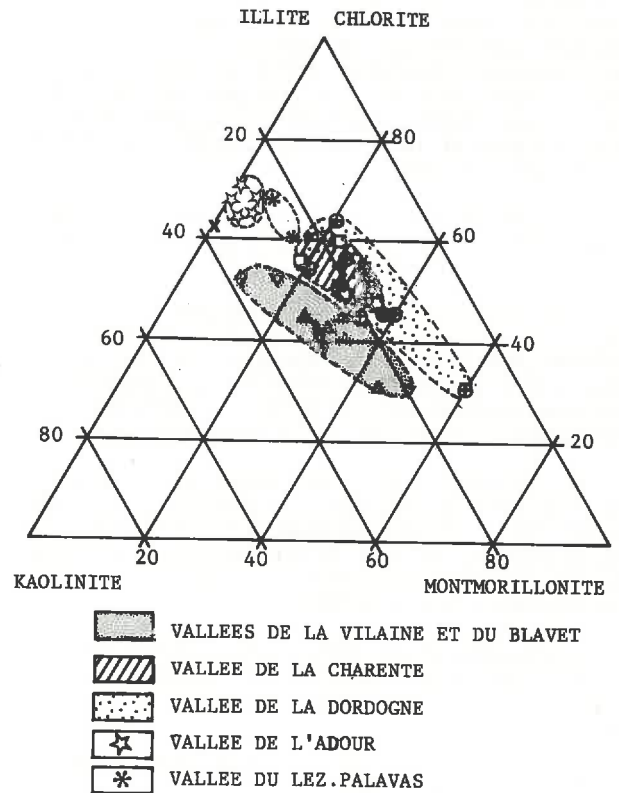


Fig. 21 - VASES ETUDIEES. REPARTITION QUANTITATIVE  
DE LA MINERALOGIE DES ARGILES.

laquelle un certain nombre de points méritent d'être soulignés :

. remarquons tout d'abord qu'il apparaît assez nettement une homogénéité dans la composition minéralogique des vases étudiées sur les différents sites,

. de plus, nous notons que la phase illitique, peu affectée par les changements physico-chimiques du milieu, se retrouve dans toutes les vases avec des teneurs variant entre 35 et 55 %,

. des sédiments tels que Brest, Adour, Saint-Gaudens, sont dépourvus de minéraux gonflants ou smectites. Les vases de la vallée de l'Adour montrent de plus un stock argileux particulièrement homogène.

. les vases des vallées de la Vilaine, de la Charente et de la Dordogne présentent un cortège argileux : Illite, Kaolinite, Montmorillonite, Chlorite, assez uniforme,

. pour le site de Cubzac (Dordogne), la Montmorillonite paraît croître à mesure que l'on se rapproche de la surface et marque ainsi la fin de la période fonctionnelle de ce domaine fluvio-estuarien (diminution des transformations cristallographiques). L'origine de ce minéral est à rechercher à la fois dans les stocks argileux issus de la Garonne, qui remontent avec le courant de marée (Mélières et Martin, 1970; Lafond, 1970), et dans les sédiments du bassin versant de l'Isles qui conflue avec la Dordogne au niveau de Libourne (Latouche, 1971); la Montmorillonite pourrait donc être partiellement "héritée" de formations continentales épaisses : les sables et graviers du Périgord qui, un peu plus au nord, prennent le faciès sidérolithique.

. compte tenu du volume important de particules en suspension qui sort de l'estuaire et des schémas de trajectoires des courants de surface dressés par Allen et al., (1971), on peut envisager la possibilité pour une partie de ces suspensions, de venir engraisser un certain nombre de vasières situées au nord de l'estuaire girondin et alimenter ainsi la basse vallée de la Charente. Le recouvrement des "plages minéralogiques" (voir diagramme triangulaire) des vases de la Charente et de la Dordogne vient renforcer cette hypothèse,

. enfin, signalons ici que le rapport carbone/azote (% C/% N) peut fournir des renseignements intéressants sur l'origine des apports sédimentaires. Debyser (1961) a montré que les vases possédaient deux sources principales de matières organiques, à savoir le plancton et les produits végétaux issus du continent.

Ainsi, lorsque la source principale des M.O. est d'origine animale : C/N est inférieur à 10, au contraire, lorsqu'il s'agit d'une origine végétale : C/N est supérieur à 10. Nous avons déterminé le rapport C/N pour quelques échantillons tableau 2.

De la valeur de C/N, nous déduisons l'origine continentale des apports en ce qui concerne Cubzac et la tendance plus marine des autres vases.

Ceci est à relier aux travaux de L.R. Lafond (1961) sur les vases de l'estuaire de la Vilaine dont l'origine essentiellement marine a été mise en évidence grâce à un traceur minéral : la pyrophyllite détritique : cette dernière, détectée dans la haute Vilaine, est totalement absente en aval de Redon.

Tableau 2

	% C	% N	C/N	
CUBZAC	A02	15,2	0,78	19,5
	A04	4,0	0,20	20
	A09	7,7	0,35	22
	A010	4,3	0,26	16,6
CRAN	2,15	0,25	8,6	
MUZILLAC	2,64	0,18	14,7	
LORIENT	3,85	0,26	14,8	

#### E - IDENTIFICATION PAR ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Les informations que fournissent les courbes granulométriques sont très nombreuses. Nous les exploiterons sous l'angle à la fois sédimentologique et textural.

Nous pouvons classer ces informations en deux groupes :

##### les données brutes

ces données, obtenues directement sur la courbe granulométrique, par simple lecture, sont :

- les pourcentages pondéraux des différentes classes granulaires,
- les valeurs dimensionnelles ou fractiles correspondant à une ordonnée déterminée (quartiles, déciles, centiles).

##### les indices granulométriques

ces indices sont de deux ordres, ils sont :

- soit d'origine empirique (indices numériques)
- soit issus d'une expression analytique de la distribution granulométrique (indices d'évolution de A. Rivière).

#### 1) Les données brutes

- a) les pourcentages pondéraux des différentes classes granulaires :

Les classes granulaires sont définies, d'après la dimension des particules, de la manière suivante (classification Ponts et Chaussées) :

"gros sable"	entre 2 mm et 0,2 mm
"sable fin"	entre 200 et 20 $\mu$
"limon" ou "silt"	entre 20 et 2 $\mu$
"argile"	inférieur à 2 $\mu$
"colloïde"	inférieur à 0,2 $\mu$

L'importance relative de chacune de ces classes est abordée plus loin (cf. § III). Toutefois, afin de préciser l'influence des caractéristiques sédimentologiques sur les paramètres géotechniques, nous analyserons ici le rôle de la fraction argileuse des vases (<2 $\mu$ ) dont il vient d'être fait l'identification minéralogique.

La relation montrée à la figure 22, entre l'indice de plasticité  $I_p$  et le pourcentage d'argile (rapporté à la totalité du sédiment) nous permet de définir des zones de plus ou moins grande activité, selon la valeur du coefficient de Skempton :  $AC = I_p / d_{2\mu}$

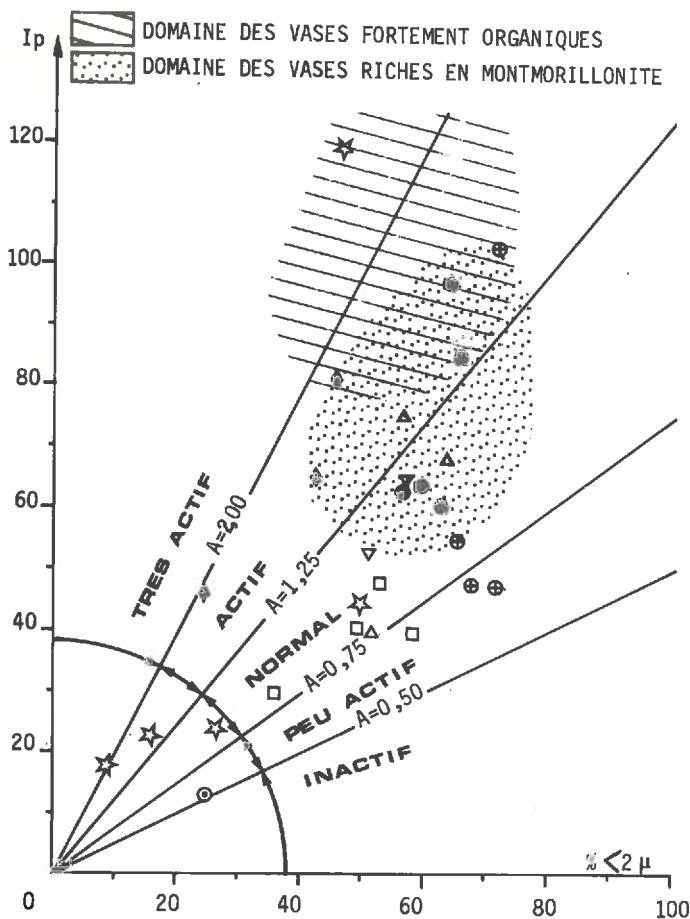


Fig. 22 - ACTIVITE DES SOLS ORGANIQUES  $A = I_p / d_{2\mu}$   
RELATION ENTRE L'INDICE DE PLASTICITE  $I_p$  ET LA TENEUR EN ARGILE (RAPPORTEE A LA TOTALITE DU SEDIMENT).

La composition minéralogique de la fraction argileuse ne paraît pas, en première analyse, déterminante.

Il semble qu'il faille voir dans cette très grande variabilité du coefficient d'activité, l'influence plus ou moins marquée des autres composants de la vase tels les carbonates, et surtout des "colloïdes" ou gels, tant minéraux qu'organiques (cf. § III et IV).

Nous allons voir cependant que l'interprétation sédimentologique des courbes granulométriques offre une orientation intéressante de l'étude des vases.

#### b) les fractiles :

Le fractile est la dimension de particules correspondant à un pourcentage cumulé donné. On définit ainsi généralement sur la courbe :

- le premier et troisième quartiles  $Q_1$  et  $Q_3$  correspondant respectivement aux ordonnées 25 et 75 %,

- les centiles  $C_1$  et  $C_{99}$  correspondant respectivement aux ordonnées 1 et 99 %,
- la médiane  $M_e$  qui est une grandeur de position correspondant à l'ordonnée 50 %

La figure 23, inspirée du diagramme de Passega (1969) permet de juger suivant la valeur du centile  $C_{99}$  par rapport au diamètre du grain médian  $M_e$ , de l'homogénéité ou non d'un site, et dans une certaine mesure de l'allure de la courbe. (courbe étalée ou serrée).

Plus l'étendue de la distribution granulaire est importante et plus l'on s'écarte de la limite  $C = M_e$  laquelle symbolise une homométrie granulaire et donc un classement. On peut alors facilement concevoir que, pour une valeur de médiane assez basse, les sols à caractéristiques les plus mauvaises seront ceux qui se rapprocheront notablement de la ligne  $C=M$ . On remarquera ainsi la position relativement bien groupée des vases de Saint-André-de-Cubzac contrairement à celles de la vallée de l'Adour.

#### 2) Les Indices granulométriques

##### a) les indices numériques ou indices de classement :

On détermine, à partir des fractiles, divers indices numériques qui permettent d'apprécier la dispersion d'une distribution granulométrique.

Nous avons pris ici comme indice l'écart semi-interquartile arithmétique  $QD_a$  (ou "arithmétique quartile déviation" de Krumbein, 1939 in Buller et Mc Manus, 1972)  $QD_a = \frac{Q_3 - Q_1}{2}$

cet indice est représentatif de la plus ou moins grande dispersion autour d'une valeur centrale : la médiane.

Nous constatons qu'entre ces deux paramètres existe globalement une assez nette dépendance statistique (figure 24); la courbe d'estimation résulte ici d'un ajustement graphique.

La dispersion augmente avec la médiane; en d'autres termes, le classement granulométrique diminue lorsque le grain médian augmente. Si l'on considère cependant l'écart interquartile relatif :  $QD_a / M_e$ , on constate alors une diminution de la dispersion relative : les pentes des droites de régression estimées pour chaque site diminuent lorsque la médiane augmente, c'est la signification que l'on peut donner à l'allure générale de la courbe.

##### b) les indices d'évolution :

##### b.1. interprétation mathématique de la distribution granulaire $Y = f(x)$ selon A. Rivière (1953, 1962, 1967) :

Nous savons que la granularité des sédiments meubles peut être exprimée analytiquement par une ou plusieurs fonctions de la forme :

$$y = a x^N + b$$

où  $a$  et  $b$  sont des constantes  
 $N$  un nombre réel

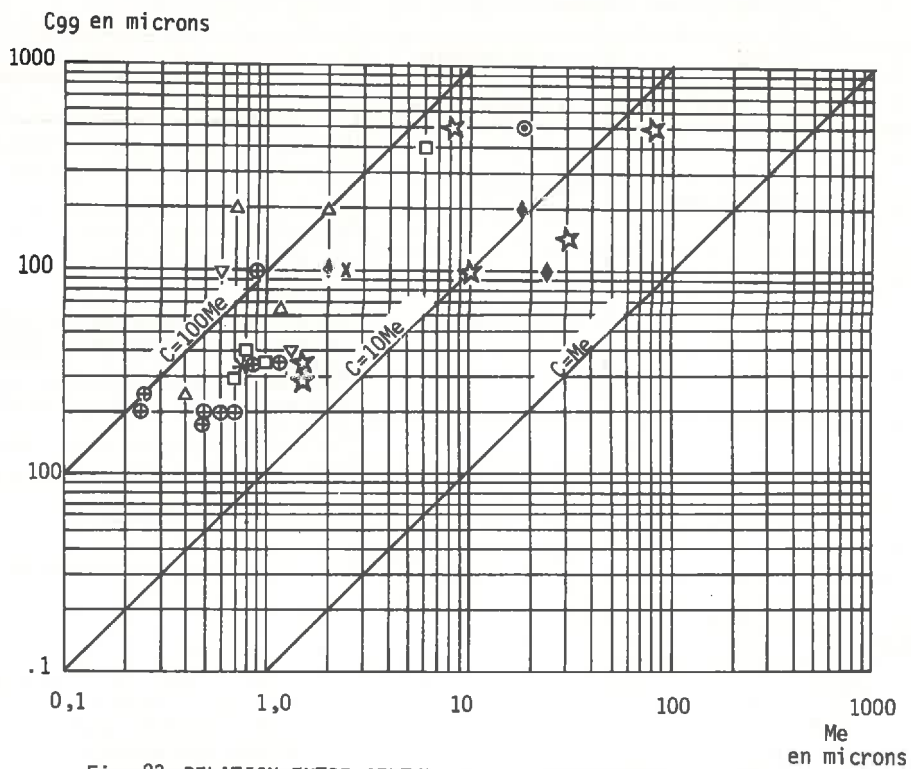


Fig. 23-RELATION ENTRE CENTILE  $C_{99}$  ET MEDIANE  $Me$

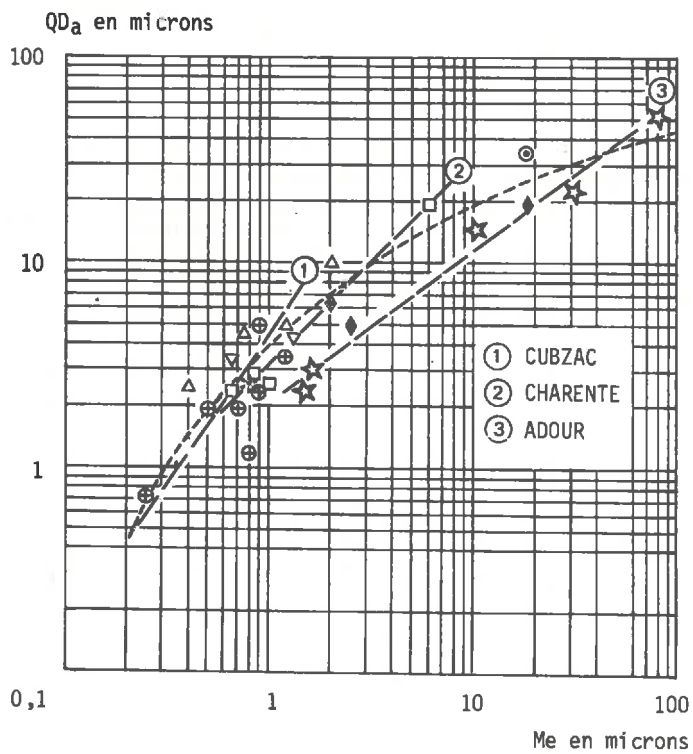


Fig. 24-RELATION ENTRE L'ECART SEMI INTERQUARTILE  $QD_a$  ET LA MEDIANE  $Me$ .

Tableau 3

## Significations sédimentologiques des indices d'évolution

Indice d'évolution $n = N - 1$	Faciès granulométrique (Rivière, 1953, 1962)	Terminologie détaillée (Rousseau, 1967)	Signification sédimentologique
+ 1	Ultra-parabolique	Parabolique supra-linéaire	Faciès caractérisant les remaniements et les phénomènes de lévigation
— 0	Linéaire		Absence de toute action de triage faciès de non évolution
	Parabolique	Parabolique infra-linéaire	Sédiments en cours d'évolution par transport, matériaux transportés et classés par courants de vitesse décroissante. <u>DEPOT PAR EXCES DE CHARGE.</u>
- 1	Logarithmique		Sédiments dont l'évolution par <u>TRANSPORT</u> est très poussée.
- 2	Hyperbolique	Infra hyperbolique Hyperbolique vrai Supra hyperbolique	Sédiments fins déposés en eaux calmes <u>DEPOT PAR DECANTATION</u>

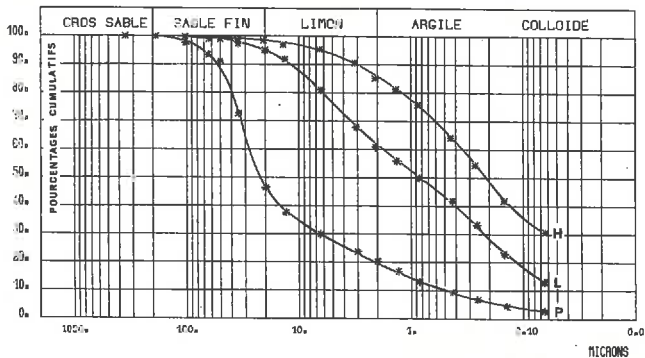


Fig. 25 Les trois types de faciès granulométriques rencontrés dans cette étude:

H: faciès hyperbolique

L: faciès logarithmique

P: faciès parabolique

Le traitement des données fournies par l'analyse granulométrique (courbes et indices d'évolution) a été obtenu grâce à l'utilisation du programme 'ELIE' mis au point au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (A. LEROUX et J. LACUBE, 1975).

TABLEAU 4

Echantillons	Classes granulométriques			Fraction argileuse *		Notation
	200 $\mu$ - 20 $\mu$	20 - 2 $\mu$	2 - 0,2 $\mu$	% < 2 $\mu$	Minéralogique dominante	
BREST P6	H puis P	P - L	L	17	I-K-(C)	Faciès { P parabolique L logarithmique ( ) tendance H hyperbolique
LORIENT	P	P	L	24	I-K-M	
MUZILLAC s2	-	P	H	56.5	M-I-K	
CRAN 4,10m	-	P	H	56	M-I-K	
LANESTER	-	P	H	45	I-M-K	
REDON	H	P	H	51	I-M-K	
ARZAL	H	P	H	50	I-M-K	Minéralogie { I Illite K kaolinite M Montmorillonite C chlorite
ROCHEFORT S26-1,80	-	(P)	(H)	60	I-K-M-C	
ROCHEFORT S26-5,86	H puis P	(P)	(H)	35,5	I-M-K	
CUBZAC A4 E3	-	H	H	71	I-M-(K-C)	
CUBZAC Ao3	-	H	L	59	M-I-(K-C)	
CUBZAC Ao9	-	H	(H)	65	I-K-M	
ADOUR APS6 4.40	-	L	L	45,5	I-K-(C)	
ADOUR APS6 7.40	H - P	P	P	26,5	I-K-(C)	
ADOUR APS6 9.50	P	L	P	8	I-K-(C)	
SAINT-GAUDENS	(H) puis (P)	(P)	L	25	I-K	
LEZ	-	(H) puis (P)	L	59	I-K-(M)	

\* Le pourcentage d'argile est rapporté au poids total de sédiment.



La représentation graphique en coordonnées bilogarithmiques de la fonction dérivée  $y' = N ax^{N-1}$ , est une droite de pente  $n = N-1$ ,  $n$  est par définition l'indice d'évolution et  $N$  sa forme intégrée. Cet indice d'évolution  $n$ , en chaque point de la courbe granulométrique, représente donc la pente de la tangente à la courbe de fréquence construite en coordonnées bilogarithmiques. Ainsi, l'allure générale des courbes granulométriques, qui est étroitement liée aux conditions de transport et au mode de dépôt, dépend de l'indice d'évolution  $n$ . Il est alors possible, suivant la valeur de  $n$  ( $= N-1$ ) de mettre en évidence divers faciès (tableau 3 et figure 25).

#### b.2. significations sédimentologiques :

Nous avons regroupé sous la forme d'un tableau les principaux résultats de l'analyse des indices d'évolution en notant en terme de faciès la signification de l'indice moyen correspondant à chacune des classes granulaires considérées; 17 des courbes les plus caractéristiques ont seulement été représentées. (tableau 4).

#### Brest

Cette vase présente une fraction sableuse très bien triée. La phase limono-argileuse, quantitativement peu importante, a une granularité très étalée.

On a là manifestement un mélange de deux stocks très distincts; une reprise par la houle de matériaux fins déposés en bordure de chenaux et leur incorporation aux sables peut être une explication à ce fait.

#### Lorient

Cette vase est marquée par la tendance fluvio-estuarienne que souligne l'association d'un faciès parabolique (dépôt par excès de charge du stock limono-sableux) et d'un faciès logarithmique (stock fin ayant subi un transit en suspension prolongé).

#### Vallée de la Vilaine (Redon, Cran, Arzal)

Avant le vannage établi en 1934 à Redon, l'estuaire de la Vilaine se prolongeait au delà de cette ville, ce qui explique alors pour toute cette zone estuarienne depuis Arzal jusqu'à Redon l'homogénéité granulaire avec essentiellement deux stocks : des silts et une phase argilo colloïdale plus ou moins riche en Montmorillonite.

Un des rôles du barrage d'Arzal récemment implanté à l'embouchure de la Vilaine est de rétablir l'équilibre dynamique de cette rivière et de freiner, voire annuler, par des effets de chasse, le processus d'envasement.

#### Vallée de la Charente (Rochefort S26)

Les vases de cette vallée se caractérisent aussi par l'existence de deux lots granulométriques, mais avec, cette fois, une différenciation plus discrète comme en témoignent les indices d'évolution.

#### Vallée de la Dordogne (Cubzac Ao-A4)

Le trait dominant de la vase de Saint-André-de-Cubzac est l'homogénéité de son stock argilo-colloïdal. L'analyse détaillée du log sédimentologique (figure 26a) mon-

tre que la sédimentogénèse peut se décomposer en deux cycles marqués chacun par le développement d'une tourbière. L'importance de la phase argileuse de ces niveaux peut s'expliquer par un piégeage des éléments fins par la végétation aquatique; la granularité de type hyperbolique traduit cette tendance (faciès de décantation).

#### Vallée de l'Adour

Le fait remarquable concernant ce site est, malgré l'hétérogénéité granulométrique, la constance minéralogique du stock argileux que nous avons déjà signalée plus haut.

Le long du sondage APS6, on note, en même temps qu'une diminution de la phase sableuse, un passage à un faciès plus évolué vers la surface (fig. 26b).

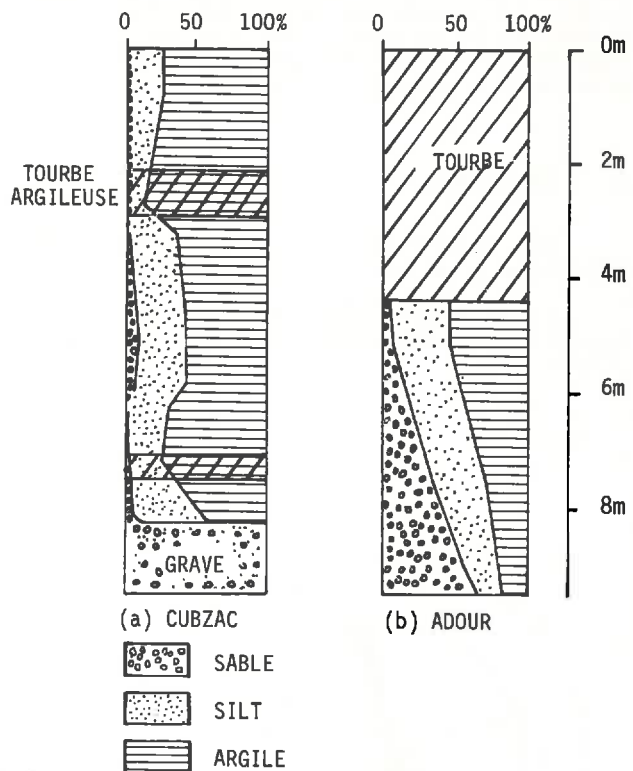


Fig. 26 - Logs sédimentologiques

#### Saint-Gaudens

Cette vase, pour laquelle toutes les classes granulométriques se trouvent représentées, est marquée par un faciès à tendance parabolique caractérisant un dépôt fluvial typique.

#### Lez-Palavas

Cette vase présente un faciès essentiellement logarithmique soulignant l'évolution par transport (vase littorale).



La plupart des sédiments analysés ici ne présentent pas une distribution granulométrique uni-modale. Ils sont en fait constitués d'une association de plusieurs stocks dont l'étendue granulométrique dépend en grande partie de la compétence du milieu transporteur (paléo-hydrodynamisme). Les variations relatives nettes que subit l'indice d'évolution  $n$ , traduisent en quelque sorte les différences de comportement hydrodynamiques des diverses fractions.

De plus, on sait que les brusques variations de l'indice  $n$  correspondent très souvent à une différenciation assez sensible de la minéralogie.

Sans pouvoir toutefois dégager de loi de comportement, nous voyons que la présence d'une importante fraction fine montmorillonitique est marquée par l'existence d'un faciès de type hyperbolique, mais ce n'est pas là une exclusivité. Lorsqu'il est possible d'étudier la variation granulométrique sur un même sondage, on constate que l'évolution est d'autant plus poussée que le grain médian est plus fin (Cubzac Ao, Adour APS6). Il s'agit en fait d'une formulation plus générale de la remarque précédente.

### II.3. CONCLUSIONS

Cette étude ne peut que confirmer le caractère polygénique de la vase signalé par L. Berthois (1955).

La complexité du comportement des sols organiques résulte de l'extrême diversité de leurs composants, (figure 27).

Une argile gonflante telle que la Montmorillonite, assez abondante et fréquemment associée au faciès hyperbolique, se présentera, dans les matériaux saturés que sont les vases, dans un état fortement expansé, expliquant les faibles consistances ( $W \neq W_L$ ).

Cependant, très souvent l'exploitation des paramètres sédimentologiques à des fins géotechniques peut s'avérer, en première analyse, délicate car la présence d'une phase non silicatée importante (carbonates, matières organiques) rend difficile la mise en évidence d'interdépendances directes entre caractéristiques d'identification.

L'existence de fortes plasticités n'est pas spécifiquement imputable à la présence d'argile montmorillonitique.

Une des particularités de la vase est donc l'absence de bi-univocité entre la teneur en argile gonflante et la dégradation des caractéristiques géotechniques.

Par ailleurs, l'application de la méthode des indices d'évolution nous permet de voir que les coupures entre classes granulaires, conventionnellement adoptées aux Ponts et Chaussées, correspondent assez bien pour la majorité des vases étudiées, aux limites entre les différents stocks sédimentaires.

L'identification des sols, leur interprétation sédimentologique et les enseignements que nous en avons tiré, offrent une approche intéressante qui ouvre la voie à l'analyse texturale et physico-chimique.

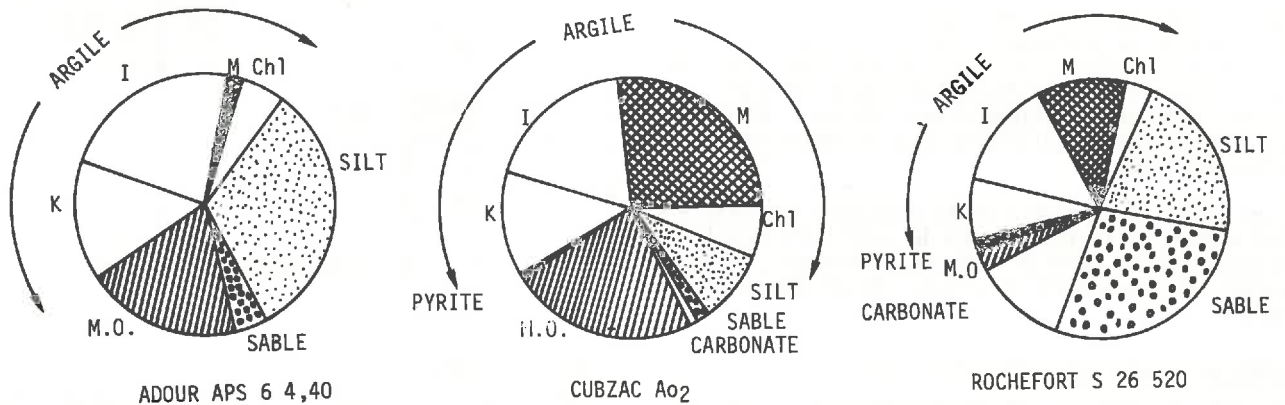


Fig. 27 - LES COMPOSANTS DES VASES

## CHAPITRE III – ÉTUDE TEXTURALE

### III.1. CARACTERES GENERAUX

#### A. LA TEXTURE

##### Définition

La fonction "texture" définit l'état géométrique d'un matériau. Parler d'un matériau en poudre ou consolidé c'est déjà employer des termes descriptifs de texture (Le Hair, 1971).

Pour un sol, on définit généralement la texture comme étant l'arrangement spatial des grains.

D'une manière générale, nous exprimerons sous le terme "texture", d'une part le degré de finesse d'un sol en définissant la forme et la taille des particules qui le constituent, et d'autre part le mode d'assemblage de ces particules entre-elles.

#### B. PARAMETRES TEXTURAUX ET METHODE D'ETUDE

Les principaux paramètres permettant de définir la texture se trouvent résumés dans le tableau 5 ci-dessous. On peut schématiquement classer ces paramètres texturaux en deux catégories :

- 1) les paramètres définissant les grains,
- 2) les paramètres définissant les relations entre les grains.

Cette distinction en deux classes, l'une concernant le grain, l'autre l'agrégat, est d'ailleurs celle classiquement employée par les pédologues sous les termes respectifs de texture (sensu strito) et structure.

### III.2. APPORT DE L'ANALYSE TEXTURALE A L'ETUDE DU COMPORTEMENT DES SOLS

Aux deux aspects texturaux que nous venons de définir, correspondent deux modes de rétention de l'eau associée aux sols. Les sols organiques, renferment dans les conditions naturelles une importante quantité d'eau qui se trouve retenue de deux façons :

- adsorbée à la surface des particules argileuses et des colloïdes minéraux et organiques : il s'agit d'eau liée ou eau colloïdale,
- emprisonnée dans les mailles du réseau textural des vases et entre les fibres végétales des tourbes : il s'agit d'eau libre ou eau interstitielle.

En analysant la texture des sols organiques, nous tenterons de préciser l'action de ces deux types d'eau sur le comportement mécanique.

Nous développons ici la définition de quelques paramètres texturaux utilisés, les méthodes employées et leurs applications à l'étude du comportement des sols compressibles.

Notre attention portera plus particulièrement sur la détermination des caractéristiques texturales suivantes :

- la granularité,
- la surface spécifique,
- l'indice des vides,
- l'arrangement spatial.

#### A - LES PARAMETRES DEFINISSANT LES GRAINS

##### 1. Granularité

###### a) définition et méthode d'étude

Il s'agit d'une propriété de texture exprimant la répartition de la taille des grains. Elle est déterminée par l'analyse granulométrique qui comprend le tamisage de la fraction supérieure à  $35\mu$  et la sédimentométrie de la fraction fine.

La granularité des particules fines par sédimentométrie est basée sur la vitesse de chute de corps solides en suspension dans un liquide, que définit la loi de Stokes.

$$v = \frac{2}{9} r^2 \frac{(D_1 - D_2)}{\eta} g$$

où  $r$  = rayon de la particule supposée sphérique  
 $D_1$  = la masse volumique de cette particule  
 $D_2$  = la masse volumique du liquide  
 $g$  =  $981 \text{ cm/s}^2$  accélération de la pesanteur  
 $\eta$  = viscosité du fluide

Or, l'une des hypothèses concernant les conditions opératoires est de supposer les particules sphériques (notion de diamètre équivalent); elle ne tient donc pas compte de la forme anisodimensionnelle des cristallites. En toute rigueur, il faudrait, suivant la forme réelle du grain considéré, appliquer un terme correctif à la vitesse limite de la particule que l'on considère arbitrairement comme étant sphérique et de volume et de densité identiques.

En effet, la loi de Stokes ayant été établie pour des grains sphériques, bien que, en réalité, les particules des suspensions argileuses soient des paillettes et des fibres dont l'hydratation modifie la densité; les diamètres ainsi déterminés sont fictifs et n'ont rien à voir avec les dimensions réelles. Il faut considérer ces "diamètres équivalents" comme des coefficients rhéologiques, caractéristiques des particules (Rivière, 1973).

Les résultats de l'analyse granulométrique établis sur une courbe cumulative, en coordonnées semi-logarithmiques permettent de préciser les diverses classes granulaires des sols étudiés.

###### b) granularité des sols organiques

L'interprétation sédimentologique (cf §II) nous a permis de préciser le mode de transport et le type de dépôt des sédiments.

Nous nous attachons essentiellement ici à la granularité de ces sédiments sans toutefois la dissocier de la notion de faciès préalablement définie.

La répartition granulométrique de la fraction silicatée fait apparaître en général quatre phases granulaires :

- une phase sableuse constituée des éléments les plus grossiers (supérieur à  $20 \mu$ ), elle comprend les classes "sable grossier" et "sable fin",
- une phase silteuse comprise entre  $20$  et  $2\mu$ , elle correspond à la fraction granulométrique "limon",
- une phase argileuse dont la classe granulométrique se situe entre  $2$  et  $0,2\mu$ .

TABLEAU 5

	PARAMETRES TEXTURAUX	METHODES DE DETERMINATION
I	Granularité	Granulométrie - Sédimentométrie
	Surface spécifique	Physisorption méthode B.E.T.
	Forme et état de surface	Morphoscopie-Microscopie optique et électronique
	Cristallinité	Diffractométrie de rayons X
II	Porosité - Répartition de la taille	Porosimètre et Physisorption
	Indice des vides	Picnomètre ( $\gamma_s$ )
	Perméabilité	Perméamètre
	Densité	Gamma-densimétrie
	Vitesse du son	Mesure de propagation des ondes
	Arrangement spatial	Microscopie électronique à balayage (M.E.B.) et à transmission (M.E.T., Répliques)
	Orientation préférentielle	Diffractométrie de R.X. - Goniomètre à texture

TABLEAU 6

Méthodes d'identification	R U D I T E S		A R E N I T E S		40 $\mu$	L U T I T E S ou P E L I T E S						
	20mm	2mm	Sable grossier	0,2mm	Sable fin	20 $\mu$	Limon	2 $\mu$	Argile	0,2 $\mu$	Colloïde	
Granulométrie, R.X. ATD, Microscopie	← débris rocheux →											
	← Minéraux lourds →											
	← Feldspaths →											
	← Micas →											
	← Argile minéralogique →											
	← Quartz →											
Chimie, ATD Microscopie	← Hydroxydes de fer et d'Al. →											
	← Silicates →											
	← Silice amorphe →											
	← Carbonates →											
← débris coquillers →												
← rhomboédres →												
← Sulfures →												
← Pyrite sédimentaire →												
← Matière Organiques →												
← débris végétaux →												
← micro-organismes algaires →												
← Colloïdes humiques →												

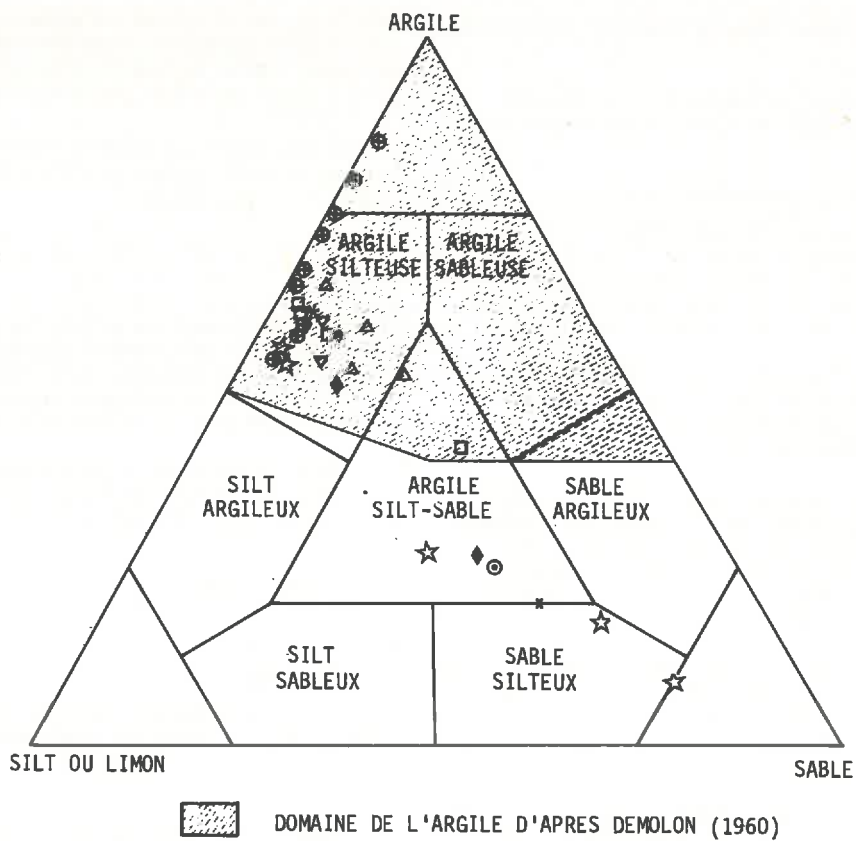


Fig. 28 GRANULARITE DES VASES ETUDIEES  
CLASSIFICATION TRIANGULAIRE SELON SCHEPART, 1954.

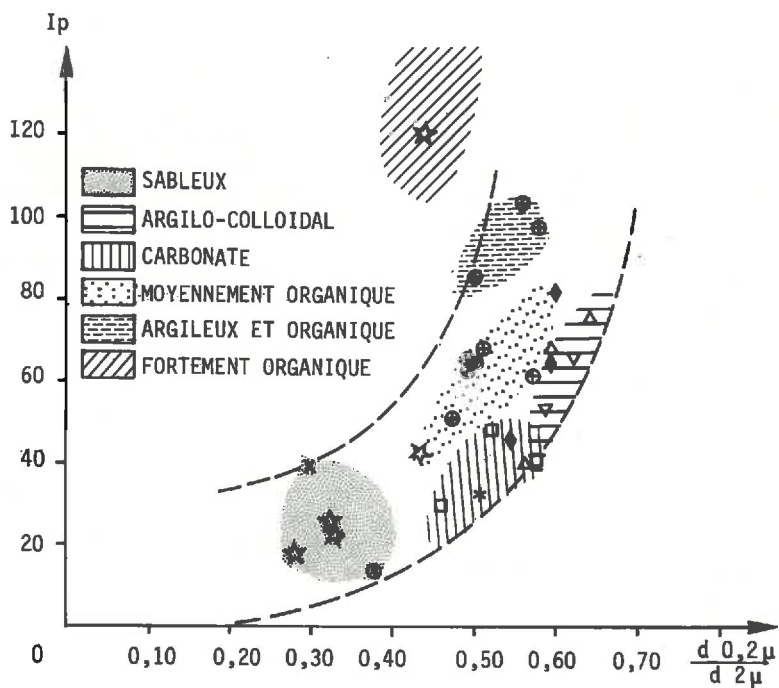


Fig. 29 RELATION ENTRE L'INDICE DE PLASTICITE  $I_p$   
ET LE RAPPORT DES PHASES GRANULOMETRIQUES  $\frac{d_{0,2\mu}}{d_{2\mu}}$ .

- une phase colloïdale constituée d'éléments inférieurs à  $0,2\mu$ .

Nous avons placé dans le tableau 6, le domaine d'extension granulométrique des divers composants des sols.

Ce tableau impose les remarques suivantes :

La fraction argile (argile granulométrique) qui est aussi considérée comme l'inférieur à  $2\mu$  renferme du quartz, des micas et des argiles minéralogiques; ces dernières ont un domaine qui s'étend depuis les limons jusqu'aux colloïdes (en partie montmorillonitiques).

Les résultats de l'analyse granulométrique sont confirmés par les mesures de surface spécifique B.E.T. ainsi que par une estimation visuelle de la taille des grains au microscope électronique.

La microscopie à balayage nous a permis de déterminer la taille des éléments non silicatés et notamment organiques. Ces composants organiques ont été placés dans ce tableau, non pas par abus de classification, mais simplement dans l'optique d'une analyse comparée de la taille des divers constituants des vases.

Les vases étudiées sont granulométriquement variées depuis des faciès sableux jusqu'à des faciès purement argileux comme le montre la classification triangulaire: sable-limon-argile (figure 28).

Nous voyons ainsi que certains sites comme Cubzac (sondages A0, A3, A4) sont pratiquement dépourvus d'une fraction sableuse : les variations granulométriques se faisant entre les pôles argile-limon. D'autres sites au contraire, comme celui de la Vallée de l'Adour (sondages APS6, APS8) présentent des caractéristiques granulaires très hétérogènes liées à une augmentation de la phase sableuse avec la profondeur.

Il nous faut signaler toutefois l'insuffisance de telles classifications triangulaires (Schepart, 1954, Demolon, 1960); en considérant l'argile granulométrique comme l'inférieur à  $2\mu$ , on ne différencie pas la phase colloïdale, or cette dernière peut représenter 35 à 45 % de la fraction silicatée (Muzillac, Cran, Cubzac) et jouer ainsi, avec la matière organique qui lui est associée, un rôle prépondérant sur les propriétés tant texturales et physico-chimiques que mécaniques.

Amar, Pilot et Le Roux (1970) ont mis en évidence l'influence de la phase ultra fine exprimée par le rapport granulométrique  $\frac{d_{0,2\mu}}{d_{2\mu}}$  sur les caractéristiques mécaniques d'un certain nombre de sols argileux : l'accroissement du pourcentage relatif d'éléments inférieurs à  $0,2$  micron conduit à une dégradation de ces caractéristiques. Nous avons recherché, pour les vases, ce type de relation en précisant le faciès (figure 29).

La granulométrie nous a fait discerner les faciès sableux, argilo-limoneux et argilo-colloïdal. Or nous voyons que la relation  $I_p = f\left(\frac{d_{0,2\mu}}{d_{2\mu}}\right)$  se trouve

oblitérée par d'autres caractères dont l'influence semble géotechniquement prépondérante. Nous constatons notamment, pour le faciès argilo-limoneux dont le rapport  $\frac{d_{0,2\mu}}{d_{2\mu}}$  se situe entre 0,45 et 0,55, que la plasticité des matériaux dépend étroitement de leur nature soit carbonatée (vases peu plastiques) soit organique (vases très plastiques).

Il faut noter la particularité d'une vase de la Vallée de l'Adour (APS6 4,40m) dont la très forte plasticité ne peut être due à ses seuls caractères sédimentologiques : en effet, la phase colloïdale n'est pas particulièrement élevée, de plus la montmorillonite n'est présente qu'à l'état de trace. Seule la forte teneur en matières organiques peut fournir une explication à la valeur élevée de la plasticité.

Nous essayerons de justifier, sous l'angle physico-chimique, le rôle de la matière organique sur la plasticité (cf. § IV 2.F.)

## 2. La surface spécifique

### a) généralités

#### définition

On définit généralement la surface spécifique comme étant la somme des surfaces que développe chaque grain d'une unité de masse d'un matériau finement divisé ou poreux.

Dans le cas des argiles, la surface spécifique est exprimée en  $m^2/g$ ; ainsi, un gramme d'argile présentera une surface d'autant plus grande qu'il renferme de particules et donc que ces particules sont plus petites (voir tableau 7).

#### précision sur les notions de surface externe et surface interne

- la surface externe d'une particule argileuse : c'est la somme des surfaces basales inférieure et supérieure et des surfaces latérales du cristallite considéré. Cette surface est atteinte par la technique d'adsorption physique.

- la surface interne de particules argileuses. Nous devons envisager deux cas :

1. cas des argiles fibreuses - la surface interne est la surface des canaux de section constante (Sépiolite, Attapulгите), il s'agit de canaux structuraux,
2. cas des argiles gonflantes - la surface interne est la surface interfoliaire. Or, les argiles sont constituées de feuillets dont l'empilement peut, en théorie, donner des chaînes de longueur infinie. La superposition de feuillets possédant un motif structural de type montmorillonitique est schématisée comme suit : (figure 30) (cf. chimisorption, § IV 1 B 3)



RELATION ENTRE LE VOLUME ET LA SURFACE DES PARTICULES

TABLEAU 7

hypothèse du cube (paramètre a en mm)	Surface en m <sup>2</sup>	Surface spécifique (aire volumique) en cm <sup>2</sup> / cm <sup>3</sup>
10	0,0006	6
1	0,006	6.10 <sup>1</sup>
0,1	0,06	6.10 <sup>2</sup>
0,01	0,6	6.10 <sup>3</sup>
0,001	6	6.10 <sup>4</sup>
0,0001	60	6.10 <sup>5</sup>
0,00001	600	6.10 <sup>6</sup>
0,000001	6000	6.10 <sup>7</sup>

d'après un article russe concernant une méthode de détermination de la surface spécifique de sols argileux, 1966.

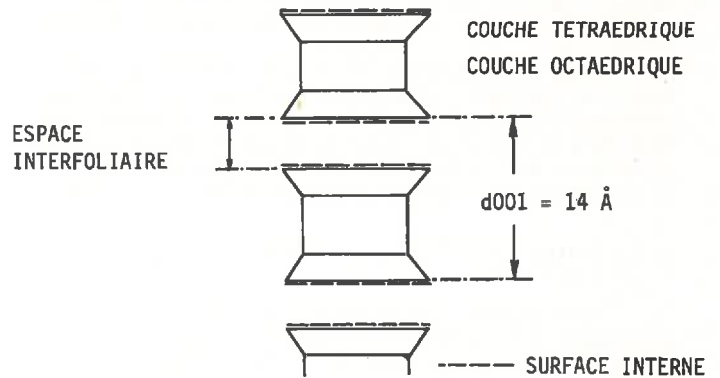


Fig. 30 - MOTIF STRUCTURAL DE LA MONTMORILLONITE

TABLEAU 8

	Surface Spécifique en m <sup>2</sup> /g	
	(B.E.T.)	totale
Kaolinite	10-30	10-30
Illite	70-140	70-140
Chlorite	50-150	50-150
Montmorillonite	80	700-800
Vermiculite	40-60	760
Attapulgate	200-300	250-400
Sépiolite	300	300-400

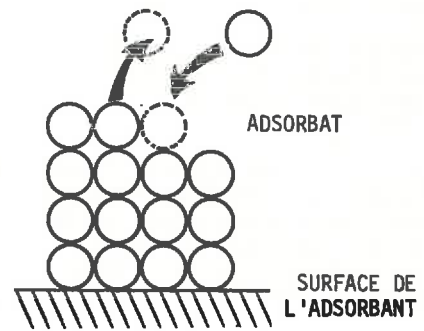


Fig. 31 - PHENOMENE D'ADSORPTION EN COUCHES MULTI-MOLECULAIRES (THEORIE B.E.T)

### surface spécifique des argiles

Les minéraux argileux possèdent de par leur nature, des surfaces spécifiques très hétérogènes, que l'on considère leur forme (particules équidimensionnelles, plaquettes, particules tubulaires, fibres microporeuses), ou leur état structural (cristalinité, présence d'ions, oxygènes, radicaux hydroxyles, cations adsorbés). Cette différence de surface spécifique explique d'ailleurs la résistance plus ou moins grande à l'hydrolyse, des espèces minérales. Nous donnons dans le tableau 8, un ordre de grandeur des surfaces spécifiques B.E.T. et totale des principales argiles.

Avant de développer en détail la technique d'adsorption physique, notons qu'il existe, en dehors des méthodes d'adsorption que nous venons d'énumérer, des méthodes de calcul de la surface spécifique théorique effectuées sur la base de considérations minéralogiques et notamment d'une modélisation de minéraux argileux.

#### b) mesure de la surface spécifique par adsorption gazeuse

Cette méthode volumétrique, en régime statique s'appuyant sur la théorie de Brunauer, Emmet et Teller (théorie B.E.T.) est basée expérimentalement sur une utilisation particulière de la loi de Boyle Mariotte.

Il s'agit d'une méthode d'adsorption physique (ou physisorption) de gaz inerte à basse température; par opposition à la chimisorption, ce type d'adsorption ne met en jeu que des énergies de quelques kilo-calories/mole et n'est dû qu'aux forces de Van der Waals.

#### 1. principe et théorie

Cette technique consiste par des mesures pression-volume à déterminer la quantité de gaz condensé à l'état présumé liquide sous faible pression et basse température sur l'échantillon dont on veut connaître la surface spécifique.

Dans la technique employée d'adsorption de molécules non polaires, l'azote est prise comme adsorbat.

Cette méthode B.E.T. est basée sur la réalisation et l'interprétation des isothermes d'adsorption d'azote à une température proche de son point de liquéfaction (77°K (-196°C)).

D'un point de vue physique, l'adsorption s'effectue en couches successives de molécules de gaz condensé; la dernière couche pouvant être incomplète et soumise à un équilibre dynamique liée à une égalité entre la vitesse de condensation et la vitesse d'évaporation de l'adsorbat (figure 31).

L'énergie d'adsorption correspond à l'énergie de liquéfaction de l'adsorbat pour toutes les couches, à l'exception toutefois de la première qui est seule concernée par les forces unissant l'adsorbat à l'adsorbant (forces de Van der Waals).

L'équation B.E.T. d'adsorption multicouche d'un gaz sur un solide quelconque, lorsque le nombre de couches adsorbées n tend vers l'infini, peut s'écrire :

$$\frac{x}{V(1-x)} = \frac{C+1}{V_m C} + \frac{1}{V_m C}$$

V = volume normal de gaz adsorbé à la pression d'équilibre Pf (ramené à 0 °C et 760mm de Hg)

$x = \frac{P_f}{P_0}$  pression relative { Pf : pression d'équilibre  
Po : tension de vapeur saturante du gaz

C = constante faisant intervenir la chaleur d'adsorption et la chaleur de liquéfaction du gaz

Vm = volume normal de gaz correspondant à une couche mono-moléculaire adsorbée et recouvrant la totalité de l'échantillon

C et Vm étant des constantes, on a donc une équation de la forme :

$$y = Ax + B$$

comme par ailleurs, l'identité :

$$\frac{1}{V_m} = \frac{C-1}{V_m C} + \frac{1}{V_m C}$$

n'est autre que la somme de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la fonction y, il est donc possible de calculer Vm à partir de couples de valeurs "xi, yi"

ce qui conduit à une valeur de Vm :

$$\frac{(x_2 - x_1)}{y_2(1-x_1) - y_1(1-x_2)}$$

la connaissance de Vm, volume nécessaire pour recouvrir d'une monocouche, la surface d'un échantillon, nous permet alors de déterminer la surface spécifique de cet échantillon :

$$S = K \frac{V_m}{M}$$

où S = est la surface spécifique exprimé en m<sup>2</sup>/g

M = la masse de l'échantillon désorbé

K = nombre d'Avogadro x Aire d'une molécule  
volume molaire d'adsorbat

il s'agit donc de la surface en m<sup>2</sup> d'une couche mono-moléculaire correspondant à un volume (mesuré dans les conditions normales de température et de pression TPN) de 1 cm<sup>3</sup>.

Dans le cas présent, l'aire d'encombrement d'une molécule d'azote est 16,2 Å<sup>2</sup>; K = 4,35 m<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>

#### 2. Description de l'appareillage

Nous utiliserons, pour la mesure des surfaces spécifiques, un appareil type "B.E.T." en verre pyrex soudé dont le montage a été réalisé au L.C.P.C. (Deloye, 1964), cet appareil schématisé à la figure 32 se décompose en trois parties :

- un ensemble de production et de contrôle du vide comprenant :

. un circuit de vide primaire (10<sup>-2</sup>mm Hg) : pompe à palettes et vacoscope,

. un circuit de vide secondaire (10<sup>-5</sup>mm Hg) : pompe à diffusion de mercure et jauge de MacLeod.

- un ensemble de réservoirs de stockage : réserves de vide, d'azote, d'Hélium et source à mercure.

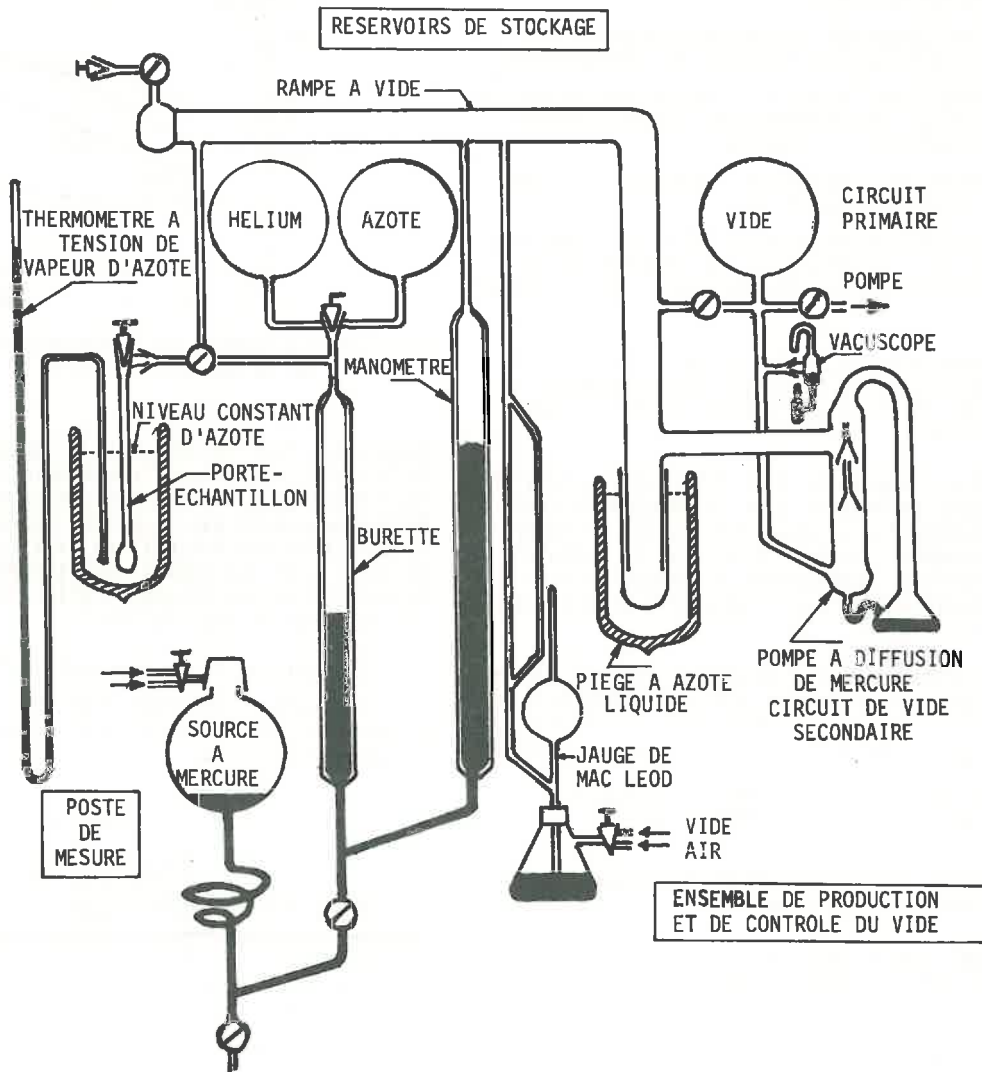


Fig. 32 - SCHEMA D'ENSEMBLE DE L'APPAREIL B.E.T.

- un poste de travail constitué par :
  - . un porte échantillon plongeant dans l'azote liquide,
  - . un ensemble de mesures : burette, manomètre et thermomètre à tension de vapeur, thermostatés à 25 °C,
  - . un cathétomètre permettant une lecture précise des niveaux de mercure.

### 3. Mode opératoire

La mesure de la surface spécifique implique un certain nombre d'opérations :

- la désorption (dégazage sous vide secondaire améliorée par chauffage) et la pesée de l'échantillon;
- la détermination du volume mort du porte-échantillon à l'aide d'un gaz non condensable dans les conditions expérimentales : l'hélium,
- l'établissement de l'isotherme d'adsorption et le calcul de la transformée B.E.T.

Pour ce faire, on admet dans la burette une certaine quantité P.V. d'azote que l'on met ensuite en contact avec le porte échantillon plongé dans l'azote liquide.

La quantité d'azote adsorbée est déterminée, en application de la loi de Mariotte, par différence entre quantités initiale et résiduelle et est exprimée en cm<sup>3</sup> T.P.N.

On réalise l'équilibre pour différentes pressions croissantes tout en restant dans le domaine de validité de l'équation B.E.T. (0,05 < x < 0,35), en comprimant progressivement le gaz à l'aide de la burette droite. En pratique, cinq points d'adsorption sont mesurés à l'équilibre et correspondent à cinq couples de valeur : P<sub>fj</sub> - V<sub>fj</sub>.

On peut tracer l'isotherme d'adsorption à partir des points expérimentaux, il s'agit de la courbe représentant le volume adsorbé en fonction de la pression relative  $x = \frac{P_f}{P_0}$  à partir de cette courbe, on obtient

la transformée B.E.T. de l'isotherme d'adsorption  $y = \frac{x}{V(1-x)}$  en fonction de x (figure 33).

On détermine alors la surface spécifique comme nous l'avons indiqué plus haut.

Les calculs et le tracé de la transformée B.E.T. sont exécutés par ordinateur (programme B.E.T., F.X. Deloye).

#### c) la surface spécifique des sols organiques étudiés

Nous avons procédé à la mesure de surface d'échantillons préalablement désagrégés et désorbés durant 17 heures.

La détermination a porté sur :

- la fraction totale : brute, lyophilisée et désorbée à différentes températures
- la fraction silicatée désorbée à 110 °C

#### 1. influence des divers traitements sur les mesures des surfaces spécifiques

Le but de ce paragraphe est de montrer la nécessité de préciser les conditions opératoires dont

sont largement tributaires les résultats fournis par la technique B.E.T.

#### - la température de désorption

Le fait d'augmenter la température de désorption accroît les surfaces spécifiques des sols comme le montre la figure ci-dessous 34 :

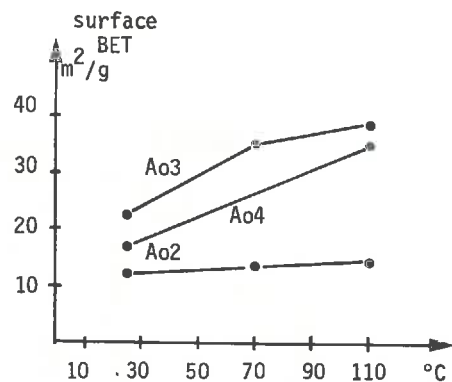


Fig. 34 - Influence de la température sur la mesure de la surface au B.E.T.

Remarque : dans le cas de sols fortement organiques un dégazage à 70 °C est préférable afin de prévenir tout début de carbonisation des composés organiques. Notons cependant que l'analyse thermique différentielle effectuée sur échantillon brut (cf. §II) a montré du moins pour les deux vases étudiées (Cubzac et Rochefort) qu'une désorganisation de la M.O. n'apparaissait pas en deçà de 110 °C.

#### - la lyophilisation ou cryo-dessiccation

Les valeurs obtenues pour trois vases brutes et lyophilisées désorbées à 25 °C sont comparées dans le tableau ci-après :

Tableau 9

Vase	Surface spécifique en m <sup>2</sup> /g	
	Brute	Lyophilisée *
Cubzac Ao3	23.53	31.46
Cubzac Ao4	17.11	21.65
Cubzac Ao5	21.61	25.90

\* la technique opératoire de la lyophilisation est abordée dans la 2ème partie de ce chapitre.

L'important départ de molécules d'eau adsorbée auquel on attribue l'accroissement notable des surfaces spécifiques, s'est très probablement effectué, lors de la lyophilisation, sans resserrement structural des feuillettes argileux (cas des argiles gonflantes); on peut alors dans ce cas penser à une certaine accessibilité de l'espace interfoliaire aux molécules d'azote.

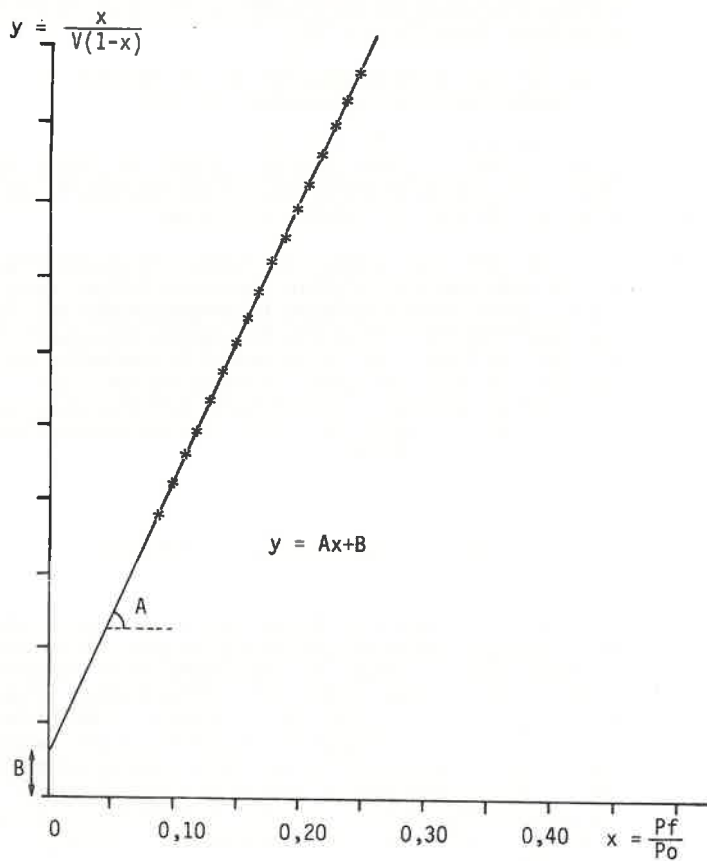


Fig. 33 - TRANSFORMEE B.E.T.

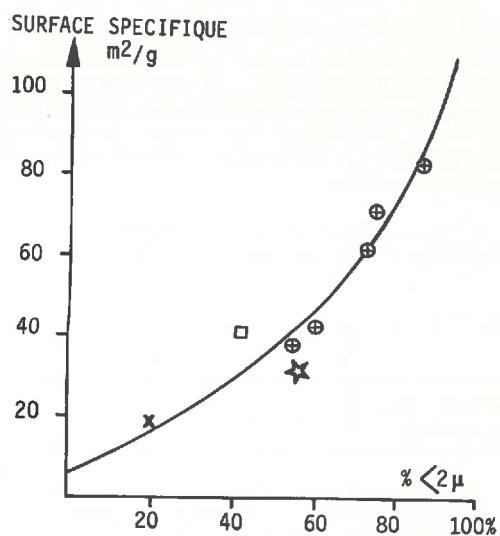


Fig.35. -RELATION SURFACE SPECIFIQUE-% <2μ

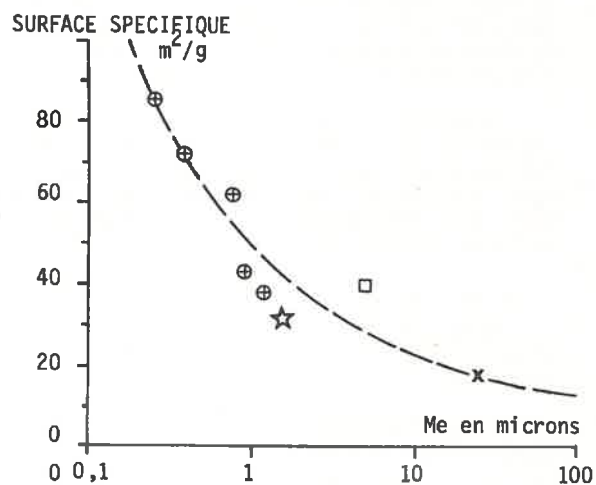


Fig. 36- RELATION ENTRE SURFACE SPECIFIQUE ET MEDIANE.

TABLEAU 11  
SURFACE SPECIFIQUE ET CARACTERISTIQUES GRANULOMETRIQUES DE LA FRACTION SILICATEE

Echantillon	SURFACE SPECIFIQUE		CARACTERISTIQUES DE LA COURBE GRANULOMETRIQUE		
	B.E.T. en m <sup>2</sup> /g	% < 2 μ	médiane en μ	Faciès granulometrique dominant	
Cubzac Ao1	62	72	0,80	tendance hyperbolique	
Cubzac Ao2	85	85	0,26	hyperbolique	
Cubzac Ao4	42,7	60	0,90	logarithmique tendance parabolique	
Cubzac Ao9	72	75	0,40	logarithmique tendance hyperbolique	
Cubzac Ao10	38	55	1,2	logarithmique	
Adour APS 6 5,40	31,5	56	1,6	logarithmique tendance parabolique	
Brest P 6	18,5	20	25	ultra-parabolique	
Rochefort S 26	40,6	42	6	parabolique (infra-linéaire)	



- le traitement à l'eau oxygénée

Réalisés dans le but de ne considérer que la seule fraction silicatée, le traitement à H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (destruction des matières organiques) et éventuellement celui à HCl N/10 (destruction des carbonates) permettent d'offrir aux molécules d'azote le maximum de sites d'adsorption.

A titre d'exemple, nous citons le cas de l'échantillon Cubzac A0<sub>2</sub> tableau 10 ci-dessous :

	B r u t	Lyophilisé	traité à H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Surface spécifique m <sup>2</sup> /g	12.00	27.25	85.00

Nous voyons que l'augmentation de surface due à une amélioration de la désorption (température, lyophilisation) est cependant faible, comparée à celle que fournit le traitement à H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

La matière organique constituée non seulement de débris végétaux mais aussi de produits transformés (matières humiques), enrobe les particules argileuses et forme en quelque sorte un film protecteur qui empêche toute adsorption de molécules non polaires.

Nous aurons l'occasion en traitant de la physico-chimie des colloïdes, d'aborder l'action de la M.O. sur les propriétés de surface des argiles. Toutefois, dans le cadre de l'étude des textures, ces constatations nous ont conduits à ne nous intéresser qu'aux surfaces spécifiques B.E.T. de la fraction silicatée.

## 2. la surface spécifique de la fraction silicatée

Dans les sols fins ou cohérents, la surface spécifique des grains peut atteindre des valeurs assez considérables.

La surface spécifique est étroitement liée à la minéralogie et à la granularité.

Les valeurs obtenues sont portées dans le tableau 11, et confrontées à quelques caractéristiques granulométriques.

Des résultats exposés, nous pouvons faire les observations suivantes :

- sur le plan de la caractérisation texturale

On constate une assez bonne concordance entre la surface spécifique B.E.T., qui intègre la surface de chaque grain d'un sol, et l'inférieur à 2 $\mu$ ; la relation entre ces deux paramètres qui est montrée à la figure 35, implique cependant deux remarques d'ordre général :

- 1) à "diamètre équivalent" égal, un grain de quartz et une particule argileuse pourront présenter de par leur forme ou leur état structural (cristallinité) des surfaces spécifiques très différentes,
- 2) l'allure générale de la courbe granulométrique a une importance primordiale sur la valeur de la surface.

Suivant qu'elle sera hyperbolique, logarithmique ou parabolique, la fonction granulométrique induira un pourcentage relatif plus ou moins élevé en ultra-

fins (<0,2 $\mu$ ); c'est d'ailleurs la signification précédemment donnée au rapport :  $d_{0,2\mu} / d_{2\mu}$ .

Pour les raisons qui viennent d'être développées ici, nous ne pouvons nous attendre à trouver une très forte "dépendance fonctionnelle" entre la surface spécifique d'un sédiment et la médiane de sa distribution granulométrique (figure 36).

- sur le plan de la méthode et de son application à l'identification géotechnique des sols.

Pour que la surface spécifique B.E.T. soit valablement utilisée comme caractéristique texturale, au même titre que la granularité, il est nécessaire de n'opérer que sur la fraction silicatée.

Bien que nous ayons, plus loin, l'occasion d'aborder ce problème sous l'angle physico-chimique, nous pouvons dire qu'en exprimant la prépondérance des forces superficielles vis-à-vis des forces massiques, la surface spécifique est certainement le paramètre de texture pris dans son sens "physique du sol", qui caractérise le mieux "la mouillabilité" d'un matériau c'est-à-dire son aptitude à fixer des molécules d'eau (eau liée ou colloïdale).

## B - LES PARAMETRES DEFINISSANT LES RELATIONS ENTRE GRAINS

La texture des sols organiques a, d'un point de vue mécanique, une très grande importance. La simple relation entre la teneur en eau naturelle et la limite de liquidité nous en fournit l'illustration (figure 37). Les points situés sur la droite  $W = WL$  et au dessus de celle-ci, traduisent le fait que les vases peuvent avoir une teneur en eau très voisine et quelquefois même supérieure à leur limite de liquidité. Une certaine "tenue" ou rigidité du matériau ne peut alors s'expliquer que par l'existence de liaisons texturales.

Ceci est particulièrement net pour les vases (vallées de la Charente et de l'Adour) limono-sableuses qui ont un rapport eau liée inférieur à celui eau libre de sols purement colloïdaux et dont la texture semblerait se rapprocher de celle des argiles sensibles (équilibres métastables).

Pour définir les relations entre grains deux paramètres sont utilisés ici :

- l'indice des vides
- l'arrangement spatial

### 1. L'indice des vides $e$

#### a) Définition

Bien qu'il s'agisse d'une caractéristique géotechnique, nous considérons ici l'indice des vides en tant que paramètre textural. Il est défini comme le rapport du volume des vides  $V_v$  au volume des particules solides  $V_s$  :  $e = \frac{V_v}{V_s}$

Pratiquement, il nécessite la connaissance de la masse volumique sèche  $\gamma_d$  et de la masse volumique réelle  $\gamma_s$ ; on le calcule à partir de la formule classique :  $e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$

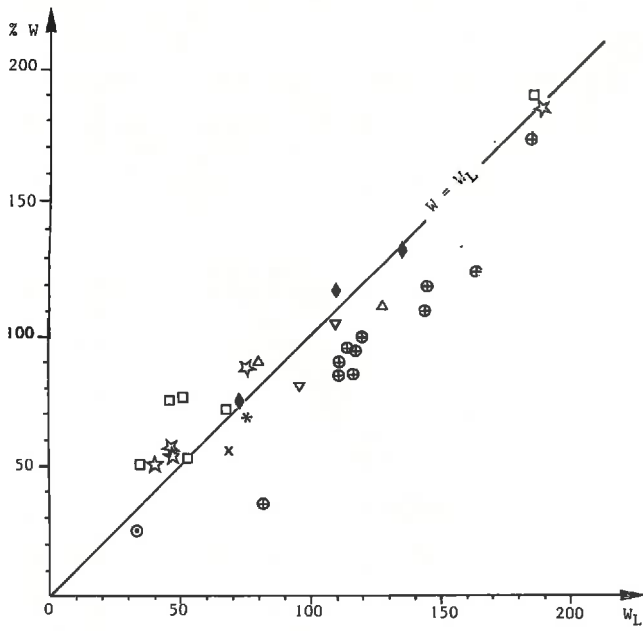


FIG. 37 - RELATION TENEUR EN EAU W - LIMITE DE LIQUIDITE  $w_L$

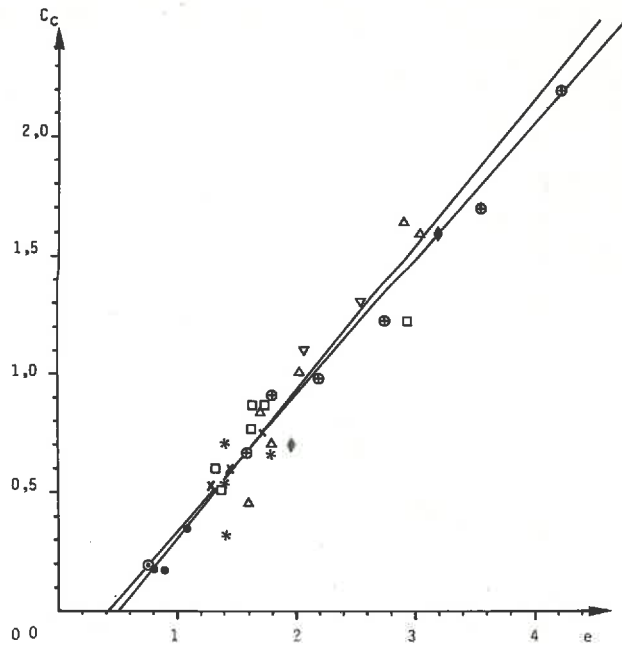


Fig. 39 - CORRELATION ENTRE L'INDICE DE COMPRESSION  $C_c$  ET L'INDICE DES VIDES  $e$ .

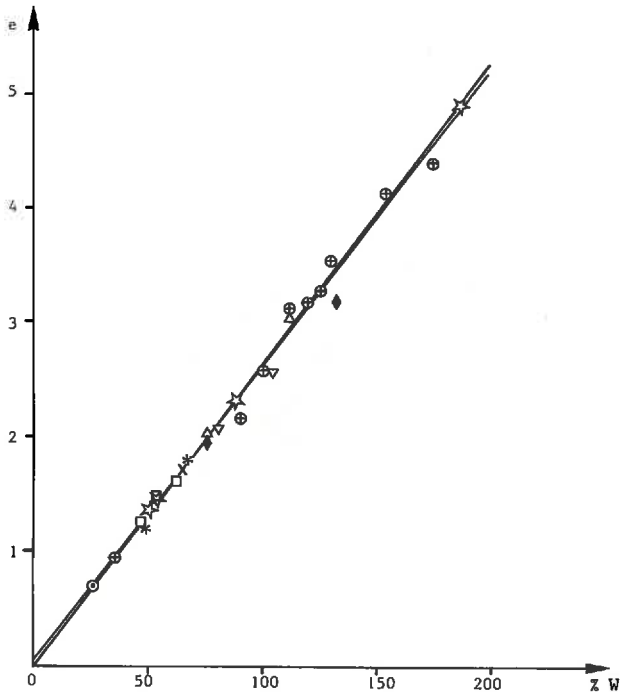


FIG. 38 - RELATION INDICE DES VIDES  $e$  - TENEUR EN EAU W

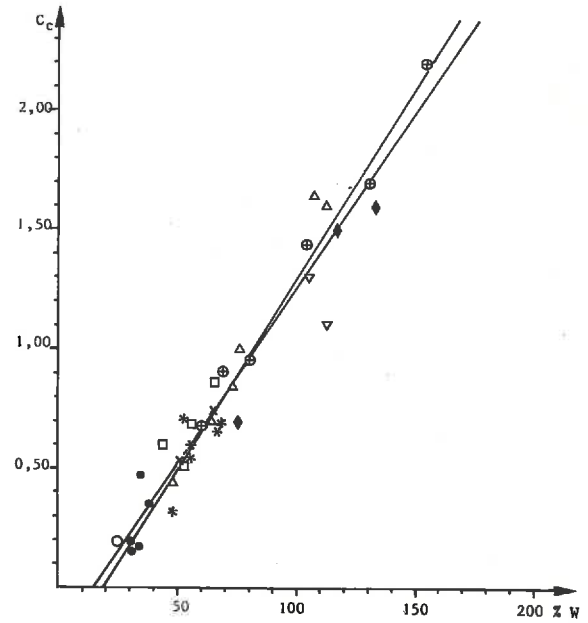


FIG. 40 - CORRELATION INDICE DE COMPRESSION  $C_c$  - TENEUR EN EAU W

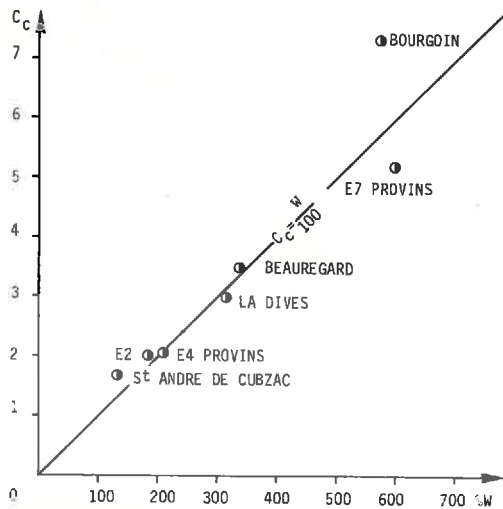


Fig. 41 - RELATION ENTRE COMPRESSIBILITE ET TENEUR EN EAU DE QUELQUES TOURBES.

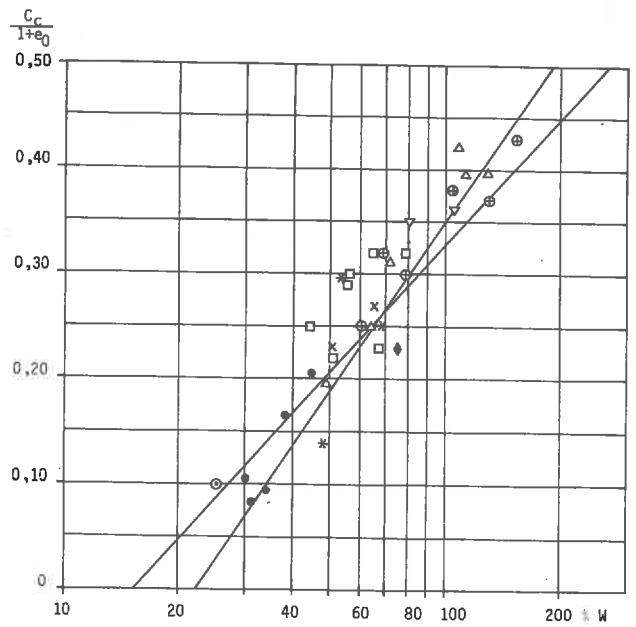


Fig. 43 - CORRELATION ENTRE LE RAPPORT DE COMPRESSION  $\frac{C_c}{1+e_0}$  ET LE LOGARITHME DE LA TENEUR EN EAU W

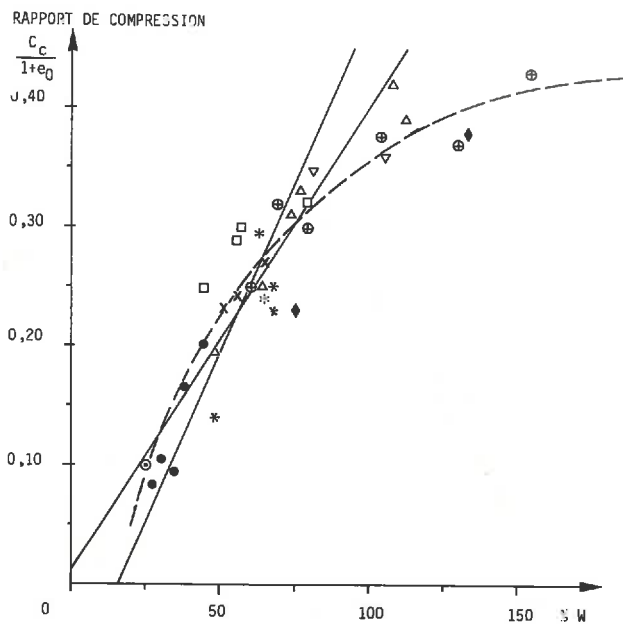


Fig. 42 - CORRELATION ENTRE LE RAPPORT DE COMPRESSION ET LA TENEUR EN EAU ( $W < 100$ )

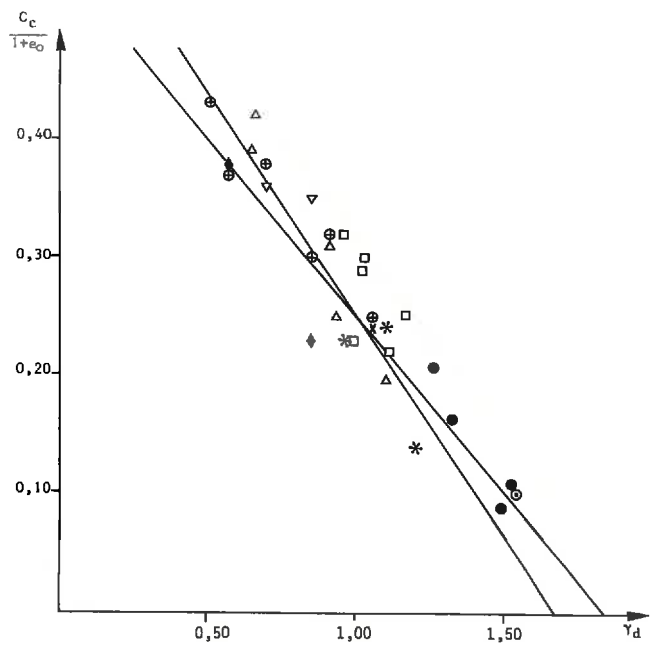


FIG. 44 - CORRELATION RAPPORT DE COMPRESSION  $\frac{C_c}{1+e_0}$  - DENSITE SECHE  $\gamma_d$

On définit de même la porosité  $n$  par le rapport du volume des vides  $V_v$  au volume total  $V_t$  :  $n = \frac{V_v}{V_t}$

Elle se détermine facilement à partir de la relation  $n = \frac{e}{1+e}$

La porosité  $n$ , a, vis-à-vis de la courbe de distribution de la taille des pores (porosimétrie), une signification analogue à celle qu'a la surface spécifique vis-à-vis de la distribution granulométrique.

L'étude de l'espace poreux, dont la microscopie électronique à balayage, nous fournit une analyse très fine, est un point qui sera développé plus loin.

b) L'analyse des résultats obtenus et leur exploitation en mécanique des sols

D'une manière générale, l'indice des vides  $e$  varie considérablement selon le type de sol organique, depuis 0,80 pour des vases peu organiques et très compactes jusqu'à 5, pour des vases fortement organiques; les tourbes présentent un indice des vides particulièrement élevé compris entre 5 et 10 pour les tourbes argileuses, et entre 10 et 20 pour les tourbes franches ou fibreuses.

Il s'agit d'un paramètre très sensible car sa variabilité qui peut exister d'un point à un autre d'un même site, reflète assez bien un certain état de la texture minérale et organique des dépôts.

Il existe pour les vases une très bonne corrélation ( $R = 0,989$ ) entre l'indice des vides  $e$  et la teneur en eau naturelle  $W$  : (figure 38).

elle exprime la relation générale  $e = \frac{\gamma_s - W}{S_r \gamma_w}$

avec :  $\gamma_s$  masse volumique des grains du sol  
 $S_r$  degré de saturation  
 $\gamma_w$  1 g/cm<sup>3</sup> masse volumique de l'eau

On constate que la pente de la droite de régression est voisine de  $\gamma_s/100$  (en considérant  $\gamma_s$ , comme étant ici la masse volumique réelle moyenne des vases); en effet, le degré de saturation  $S_r$  pour ce type de sols est très proche de 100 % :

On peut alors appliquer la relation  $e = \frac{2,60}{100} W$

Pour les tourbes étudiées, nous n'avons pu mettre en évidence de relation :  $e = f(W)$  significative, cela tient probablement à un manque de précision dans la mesure du  $\gamma_s$  des tourbes.

Nous citons toutefois pour ces matériaux la relation statistique de Mazière (1969) :

$$e = 0,0175 W - 0,65 \quad (R = 0,988)$$

Comme l'on pouvait s'y attendre, il existe des corrélations extrêmement significatives entre l'indice de compression  $C_c$  d'une part, et l'indice des vides  $e$  ou la teneur en eau  $W$  d'autre part; les coefficients de corrélations respectifs étant 0,966 et 0,963 (figures 39 et 40).

Pour les tourbes, la relation entre l'indice de compression et la teneur en eau :  $C_c = \frac{W}{100}$ , généralement admise, se trouve ici vérifiée (figure 41).

Par ailleurs, nous avons vu (§ comportement mécanique) que l'amplitude du tassement, dû à la consolidation peut être évalué par la formule :

$$\Delta H = H \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_c}$$

Il paraissait donc intéressant de rechercher pour les vases une relation entre le rapport de compression  $\frac{C_c}{1+e_0}$  et certaines caractéristiques.

Par analogie avec les travaux de Dascaï et Larocque (1973), concernant la compressibilité des argiles du complexe N.B.R. (Canada), nous avons recherché pour les sols organiques une corrélation entre  $\frac{C_c}{1+e_0}$  et  $W$ , nous n'avons pu vérifier sur un diagramme en coordonnées décimales, la linéarité de cette relation, que pour des teneurs en eau inférieures à 100% (figure 42).

Au delà de ce domaine de validité ( $0 < W < 100$ ) l'allure même de la courbe, comparable à celle obtenue pour le site tourbeux de Caen par Vautrain (1975), nous a conduit à établir une relation sur diagramme semi-logarithmique du type  $\frac{C_c}{1+e_0} = f(\log W)$  (figure 43).

De plus, nous avons mis en évidence une assez bonne corrélation négative ( $R = 0,89$ ) entre le rapport de compression et la masse volumique sèche  $\gamma_d$ . La dispersion des valeurs est relativement faible comme en témoigne la figure 44.

Nous avons regroupé dans le tableau 12, les équations des droites de régression des principales corrélations mises en évidence ici. Nous y avons fait figurer aussi le coefficient  $R$  qui permet d'apprécier l'intensité de la dépendance statistique entre les variables considérées.

Nous voyons donc que l'indice des vides, ainsi que la teneur en eau et la masse volumique sèche qui sont des caractéristiques facilement déterminables, et par ailleurs étroitement dépendantes des conditions texturales, apparaissent comme des paramètres susceptibles de rendre compte de façon satisfaisante de la compressibilité des sols organiques.

## 2. Arrangement particulière et microscopie électronique à balayage (M.E.B.)

Le M.E.B. s'avère être, comme l'a montré A. Le Roux (1971, 1972 et 1973), une méthode d'investigation de choix dans l'étude de la texture des sols.

a) la technique d'étude

Principe et description (figure 45)

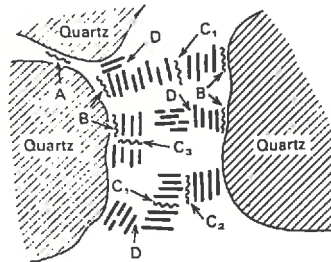
Le principe de base consiste à bombarder la surface de l'échantillon, préalablement métallisé dans le cas de matériaux non conducteurs, par un faisceau d'électrons dont l'énergie est de l'ordre de quelques KeV. (5 à 30 KeV en pratique).

Au point d'impact, un certain nombre de rayonnements sont émis. Seuls, les électrons rétro diffusés et secondaires, qui participent à la formation de l'image, sont recueillis par un scintillateur associé à un photo-multiplicateur; le rôle de ce dernier est de délivrer un signal qui module la tension du tube cathodique-récepteur image.

TABLEAU 12

RAPPEL DES PRINCIPALES CORRELATIONS OBTENUES DANS CE CHAPITRE

Type de relation	Equation des deux droites de régression $y/x$ / $x/y$	Coefficient de corrélation R
$e - W$	$e = 0,0256 W + 0,0479$ $W = 38,17 e - 0,361$	$R = 0,989$
$C_c - e$	$C_c = 0,575 e - 0,241$ $e = 1,624 C_c - 0,515$	$R = 0,966$
$C_c - W$	$C_c = 0,0147 W - 0,213$ $W = 62,9 C_c - 18,6$	$R = 0,963$
$\frac{C_c}{1+e_0} - W$ (pour $W < 100$ )	$\frac{C_c}{1+e_0} = 0,0039 W + 0,013$ $W = 175 \frac{C_c}{1+e_0} + 15,7$	$R = 0,826$
$\frac{C_c}{1+e_0} - \gamma_d$	$\frac{C_c}{1+e_0} = -0,300 \gamma_d + 0,554$ $\gamma_d = -2,67 \frac{C_c}{1+e_0} + 1,67$	$R = 0,896$
$\frac{C_c}{1+e_0} - \log W$	$\frac{C_c}{1+e_0} = 0,403 \log W - 0,478$ $\log W = 1,85 \frac{C_c}{1+e_0} + 1,35$	$R = 0,862$



Type de liaison :

A : QUARTZ - M.O. - QUARTZ

B : QUARTZ - M.O. - ARGILE

C : ARGILE - M.O. - ARGILE

C<sub>1</sub> face-face

C<sub>2</sub> bord-face

C<sub>3</sub> bord-bord

D : ARGILE-ARGILE (liaison bord-face)

Fig. 46 - MODELE TEXTURAL PROPOSE PAR EMERSON, 1959



Des bobines défectrices permettent de "balayer" la surface choisie.

A tout signal obtenu en chaque point correspond une image dont la brillance est proportionnelle à l'intensité de ce signal.

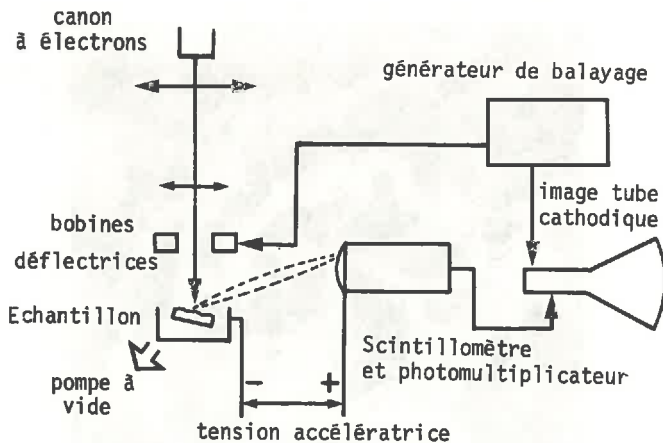


Fig. 45 - SCHEMA D'ENSEMBLE DU M.E.B.

#### Préparation des échantillons

De par leur nature, les vases nécessitent diverses préparations :

- la lyophilisation,
- l'inclusion dans une résine,
- la métallisation.

#### - la lyophilisation

Cette technique consiste à déshydrater par sublimation sous un vide primaire un échantillon brusquement refroidi à  $-185^{\circ}$  par immersion dans de l'isopentane dont la température a été ainsi abaissée au contact de l'azote liquide.

Ce procédé, grâce à une propagation rapide du front de froid, évite l'apparition d'un gradient thermique responsable de fissurations au sein même de l'échantillon.

La lyophilisation ou cryo-déshydratation assure une bonne conservation de la texture en évitant son resserrement qui est l'inconvénient majeur consécutif au séchage à l'étuve. Nous avons utilisé pour cette opération, un lyophilisateur à deux postes de désorption de type RFS (réfrigération for Science Inc., New York).

#### - l'inclusion dans une résine

Il est, dans certains cas, utile d'inclure dans une résine synthétique très fluide les matériaux particulièrement riches en eau tels que les tourbes. La polymérisation obtenue au bout de 17 heures permet ainsi une consolidation de la texture.

#### - la métallisation

Rendue nécessaire pour permettre l'évacuation des charges négatives que reçoit l'objet au cours de l'observation, la métallisation est réalisée, sous vide, par vaporisation d'un alliage or-palladium.

#### b) l'apport de la microscopie électronique à balayage à l'étude du comportement mécanique des sols organiques.

L'analyse texturale qui porte sur des échantillons très variés, tant d'un point de vue granulométrique qu'organique, fournit d'une manière très suggestive, des indications sur la singularité de ces matériaux.

Les critères descriptifs retenus en vue de l'observation au microscope électronique à balayage (ou M.E.B.), reposent sur :

- la forme et la nature des éléments constitutifs,
- le mode d'assemblage de ces éléments,
- l'estimation visuelle de la taille de pores.

L'examen au M.E.B., des vases argileuses fortement saturées, fait apparaître un réseau tridimensionnel très lâche, dont divers aspects sont montrés sur la planche I. Cet arrangement spatial, sous forme d'un cloisonnement alvéolaire, crée une texture favorable à une importante rétention d'eau et est à l'origine de la compressibilité qui caractérise ces sols.

Comme le montre l'ensemble des microphotographies présentées dans ce chapitre (planches I à IX), à la diversité des sols correspond une diversité de textures; aussi convient-il, pour la clarté de l'exposé, de préciser ici, la démarche adoptée pour cette étude.

Nous entreprenons tout d'abord, grâce à l'apport du M.E.B., l'étude des problèmes géotechniques spécifiques à chaque sol. Au cours de cet examen microtextural, sont abordés divers points :

- la nature et le rôle du liant colloïdal,
- l'anisotropie,
- la porosité,
- la perméabilité,

qui font l'objet des paragraphes ci-dessous. Dans le but de synthétiser cette "étude de cas", nous proposons en conclusion, une classification texturale des sols organiques.

#### 1. nature et rôle du liant colloïdal

Pusch (1973) a mis l'accent sur le rôle des substances organiques dans les agrégats argileux. Par ailleurs, il ressort des travaux de Hartmann et Deboodt (1974), que la matière organique est un meilleur agent d'agrégation que l'argile ou le limon. Ces constatations, concernant "l'action cimentante" de la M.O., justifient le modèle de liaisons texturales proposé par Emerson (1959) (in Low et Stuart, 1974) et schématisé par la figure 46 ci-après.

Le liant colloïdal qui réduit le frottement intergranulaire peut donner à une vase silteuse un comportement métastable. Ainsi, la M.O. colloïdale jouerait ici un rôle analogue à celui des matériaux amorphes (silice et hydroxydes de fer) dans la texture des argiles sensibles (Mac Kyes, Sethi et Yong, 1974).

LE MODE D'ASSEMBLAGE DES PARTICULES ARGILEUSES DANS LES VASES

Les microphotographies présentées ici et faites aux grossissements 2 000 et 5 000 mettent en évidence la texture très ouverte, caractéristique des vases saturées.

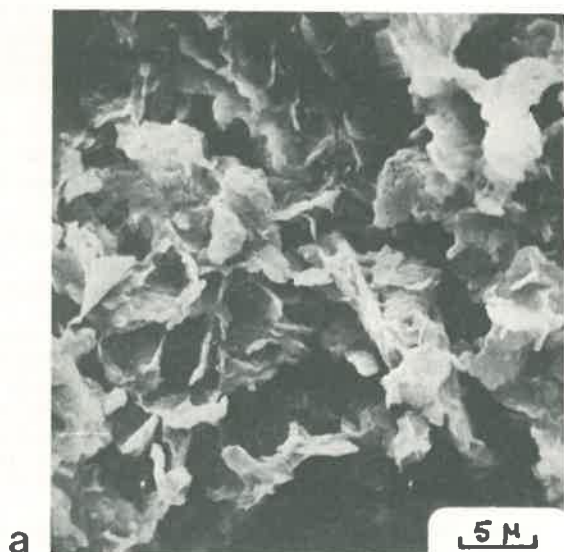


Photo (a) - Assemblage aléatoire des particules argileuses typiques de l'état floculé.

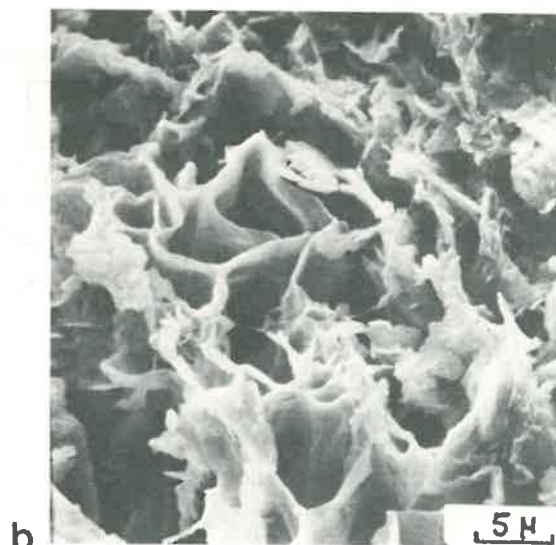


Photo (b) - Cloisonnement alvéolaire traduisant la très grande déformabilité du matériau.

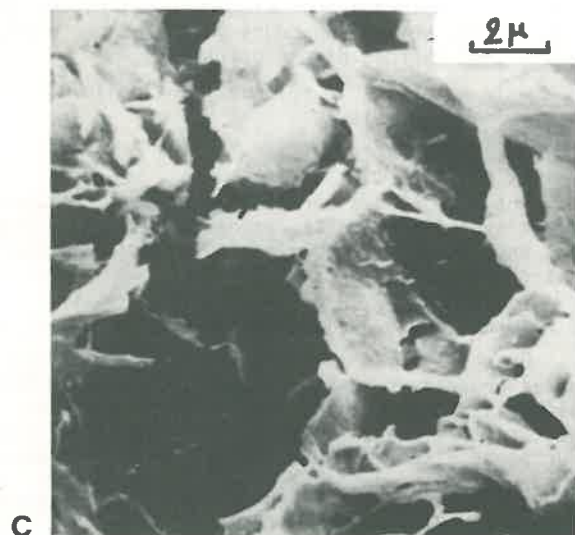


Photo (c) - Texture en "nid d'abeilles". Un aspect de la texture floculée avec essentiellement ici des liaisons interparticulaires "bord-bord". Cet arrangement, dû à une sédimentation rapide contribue à former de grandes cavités qui peuvent ainsi piéger d'importantes quantités d'eau.

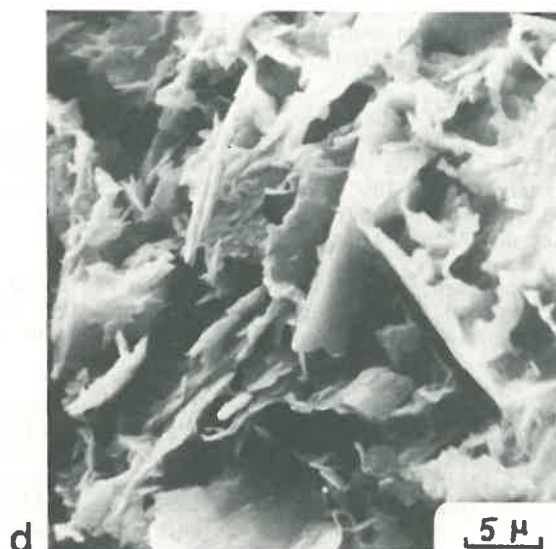


Photo (d) - Texture en "chateau de cartes". Autre aspect de l'état floculé des vases avec ici des liaisons entre particules de type "bord-face".

Tous ces assemblages confirment les modèles texturaux classiques. Le fait de les rencontrer dans un même sédiment (Saint-André-de-Cubzac), sans orientation préférentielle montre qu'ils caractérisent un même état de floculation.



a

BREST P6 7,60 m

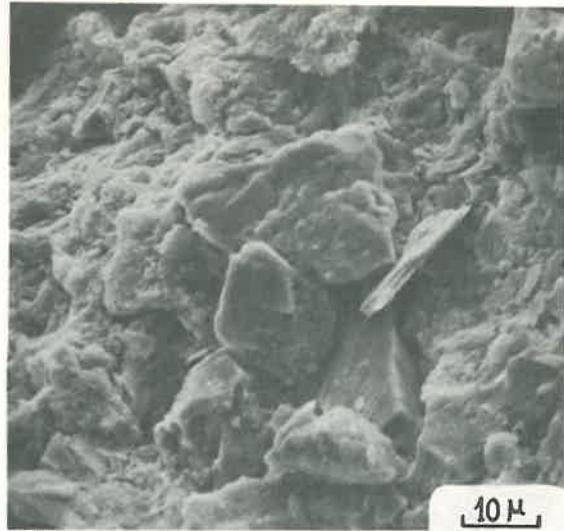
La photo (a) montre une vase à texture très hétérogène et met en évidence deux stocks granulométriques :

- . un stock d'éléments grossiers (10 - 30  $\mu$ ),
- . un stock d'éléments fins qui se présente sous la forme d'un empilement très serré de particules argileuses.

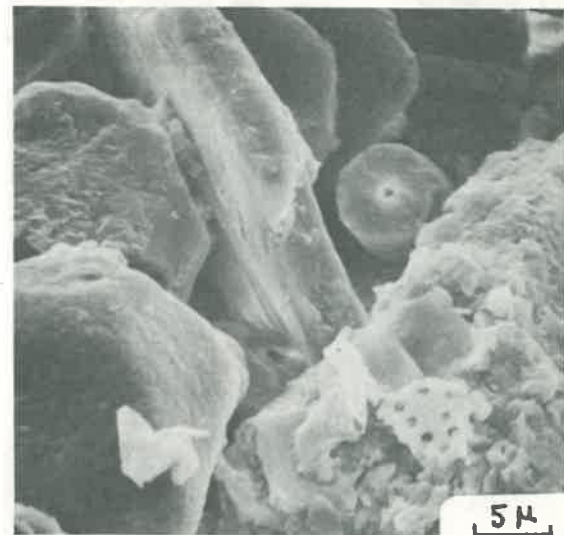
Les éléments grossiers sont constitués de grains de quartz aux arêtes émoussées, plus ou moins corrodés, ainsi que de débris de fossiles (spicules de spongiaires). Photo (b - c)

La phase argileuse se présente sous l'aspect d'agrégats compacts et n'a pas ici de rôle matriciel. Seuls, quelques points de contact entre éléments grossiers sont assurés par des particules d'argiles.

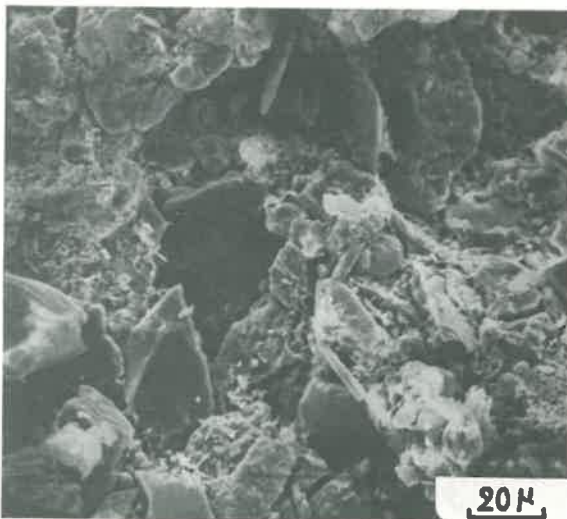
La porosité est essentiellement intergranulaire.



b



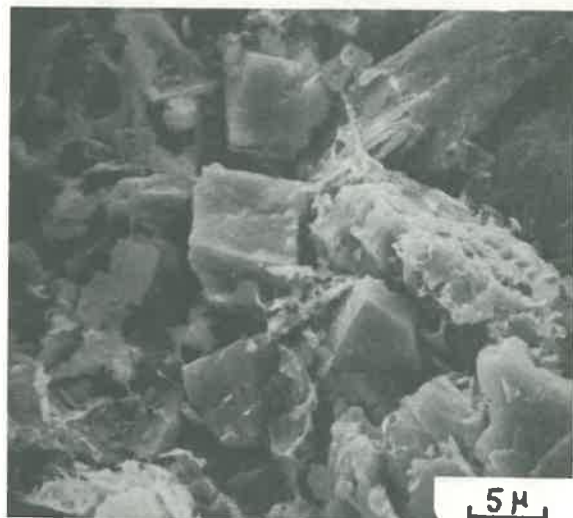
c



d

LORIENT S2 BIS 3,70 m

Photo (d) - Une des caractéristiques texturales de cet échantillon est la présence de gros éléments (20 - 30  $\mu$ ) relativement anguleux, dispersés dans une matrice d'aspect agrégé.



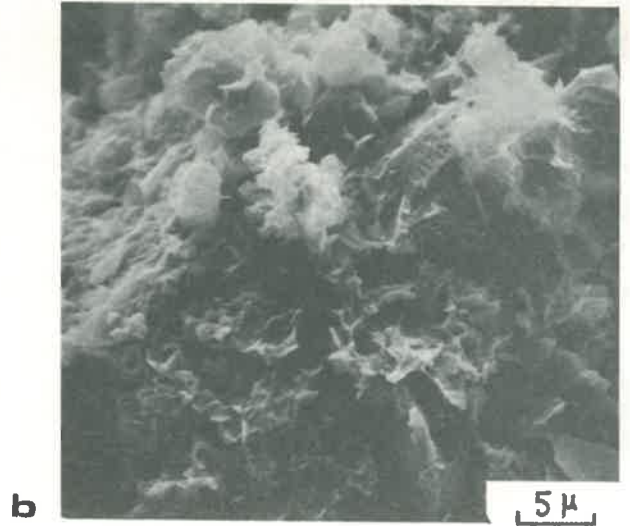
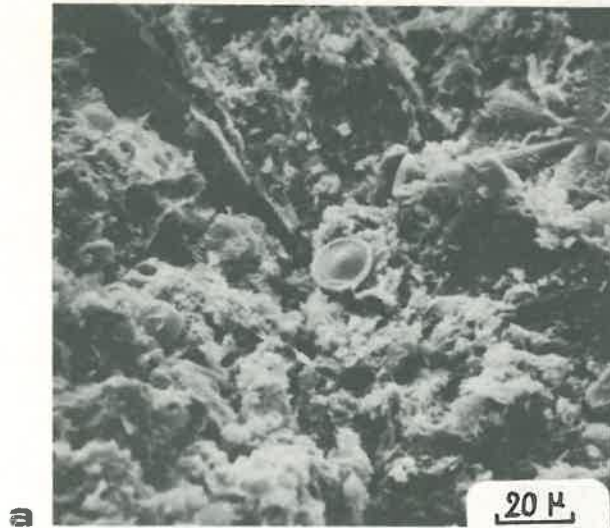
e

La matrice apparaît elle-même constituée de deux types d'éléments, photo (e) :

- . des grains isométriques de la taille des silts,
- . une phase argileuse à laquelle est associée de la M.O. en voie de décomposition.

L'argile se trouve en paquets et n'assure que partiellement un rôle de liant entre les éléments silteux ; ce qui explique un angle de frottement élevé.



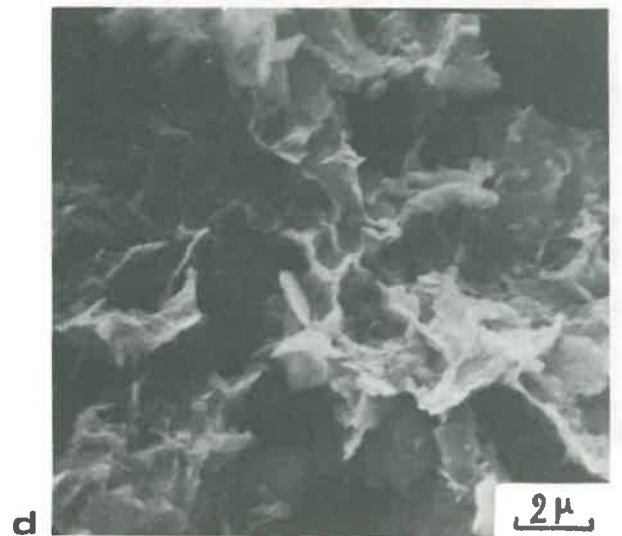


Les vues présentées ici (a et b) montrent une vase à texture floconneuse, riche en micro-organismes.

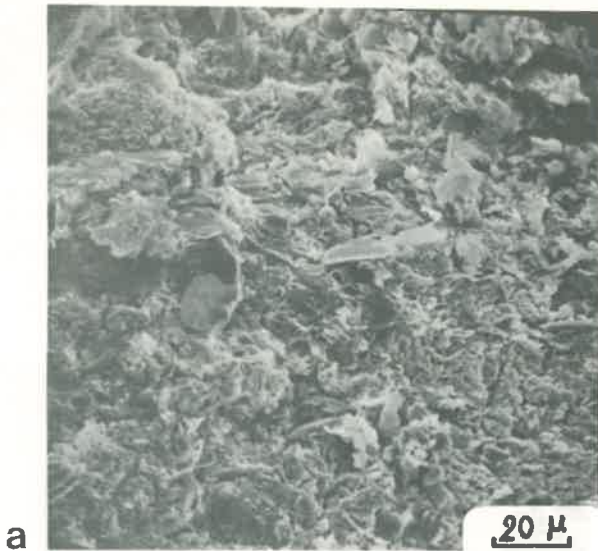
Nous pouvons mettre en évidence deux échelles dans la texture, auxquelles correspondent deux types de porosité. (c et d) :

- . une porosité "intra-flocons" due à la texture réticulée de ces assemblages qui aménagent ainsi des loges de diamètre  $< 1 \mu$

- . une porosité "inter-flocons" due à un plus grand maillage avec des vides  $> 10 \mu$



Individualisation des flocons  
 Porosité inter-flocons  
 Porosité intra-flocons



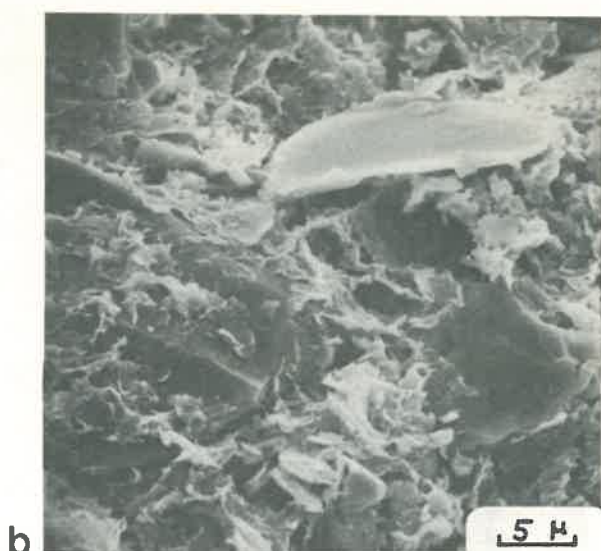
a

VALLEE DE LA CHARENTE APS 3 4,00 m

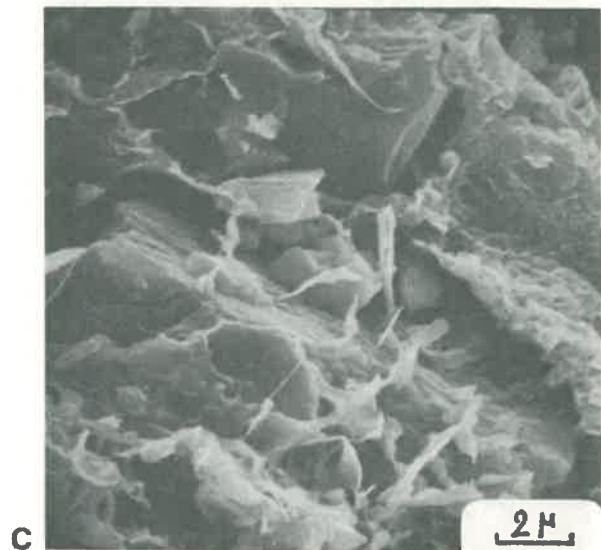
Photo (a) - Cette vase se présente sous un aspect textural assez hétérogène : elle est constituée d'une phase grossière dispersée comprenant des éléments plus ou moins anguleux et de grandes plaquettes micacées et d'une matrice argileuse, elle-même organisée en agrégats.

Photo (b) - Ces agrégats sont relativement denses et donc peu aptes à une grande rétention d'eau. La porosité est davantage une porosité "inter-assemblages".

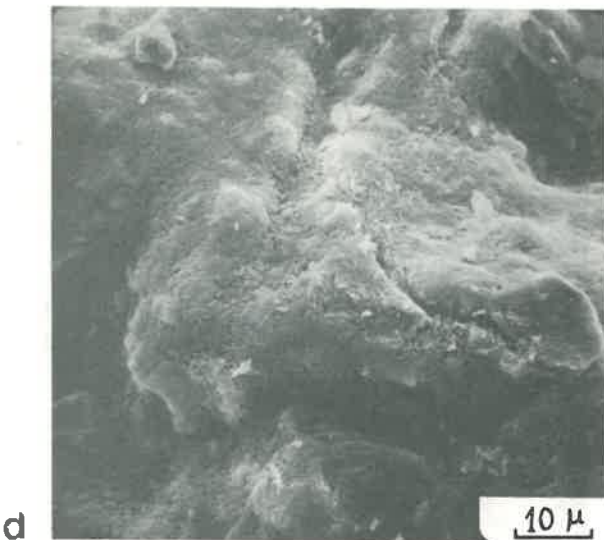
Photo (c) - Cette vue prise au grandissement 5 000 met en évidence des liaisons silt-argile par "accrochages".



b



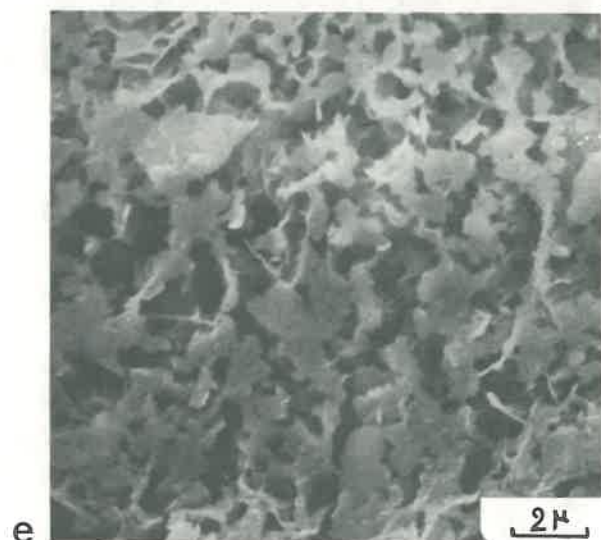
c



d

CRAN (VALLEE DE LA VILAINE) A 4,10 m

Photo (d) - D'aspect très massif et peu structuré, cette vase se caractérise par l'importance de la phase fine et surtout sa texture microporeuse ; elle est en effet "truffée" de micropores de diamètre inférieur à  $0,5 \mu$ , ce qui explique un indice des vides très élevé ( $e \approx 3$ ).

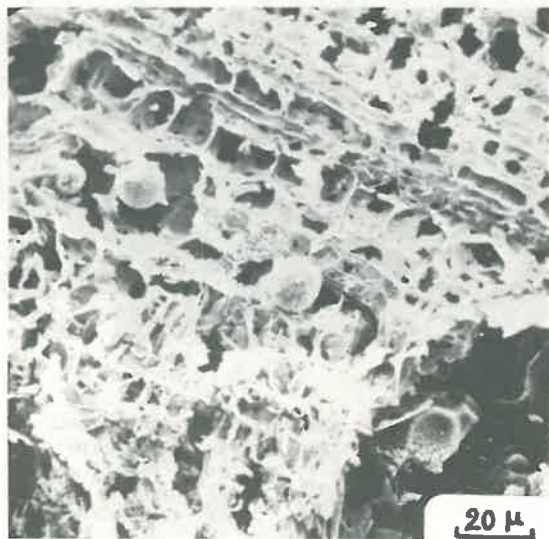
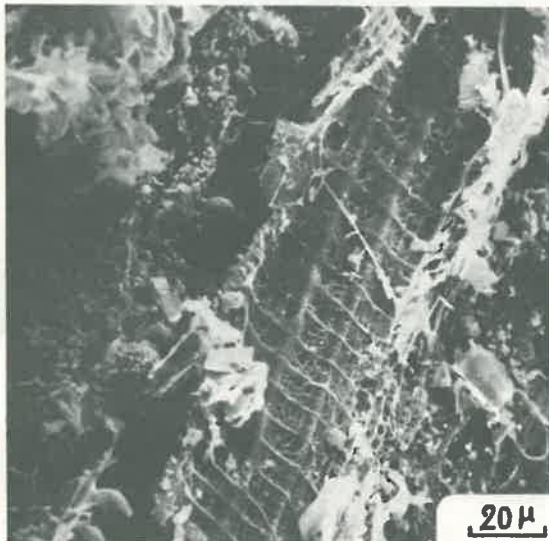
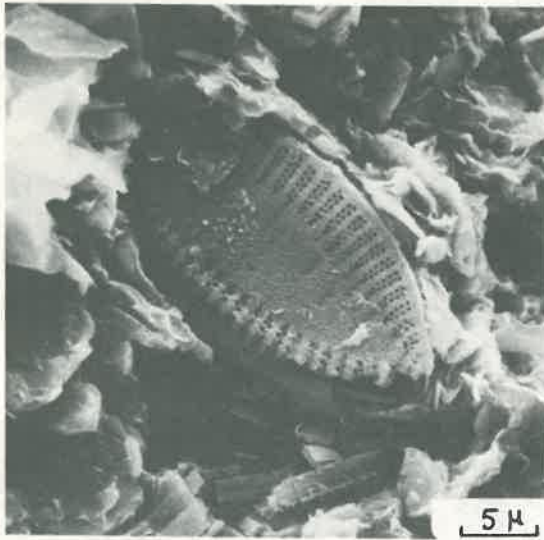


e

Photo (e) - Cette vue prise au grandissement 5 000 montre l'extrême finesse de la phase argileuse dont 45 % sont constitués de montmorillonite. L'eau qui sature les micropores est donc en grande partie colloïdale et responsable de la limite de liquidité élevée de cet échantillon.



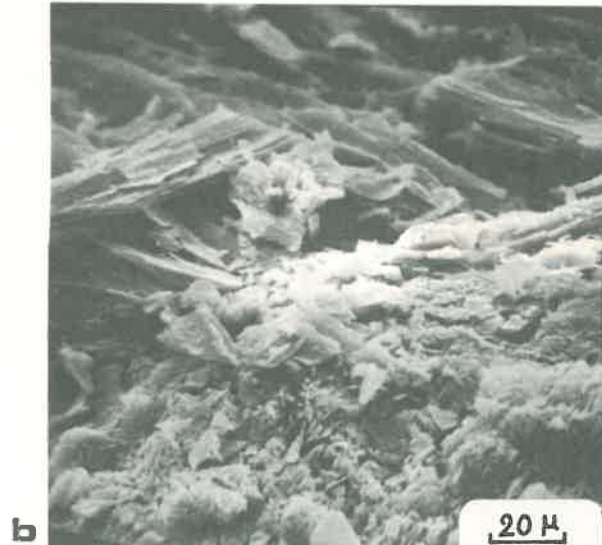
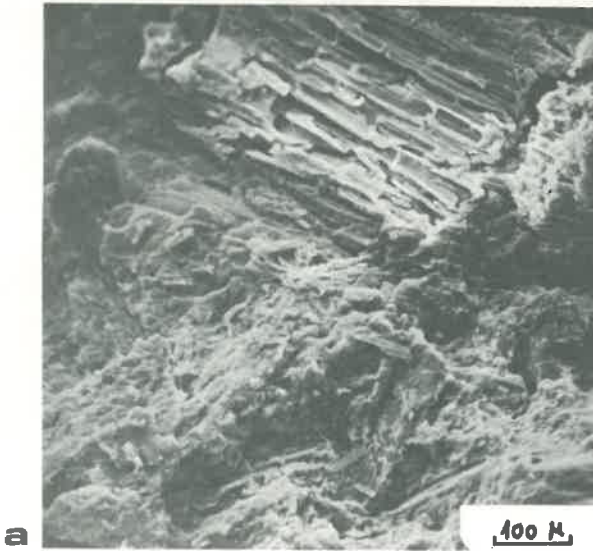
Ces microphotographies mettent en évidence les associations entre les divers composants minéraux et organiques des vases.



Photos (a et b) - Existence au sein d'une matrice essentiellement argileuse de micro-organismes (frustules de diatomées) remarquables par la très bonne conservation de leur test siliceux ; ces derniers n'ont pratiquement subi aucune dissolution ; il semble que les particules argileuses accrochent peu ces organismes algaires.

Photo (c) - Présence de fibres végétales particulièrement bien conservées (nervures visibles) formant de véritables litages qui viennent perturber l'homogénéité de l'ensemble du sédiment.

Photo (d et e) - La matière végétale sert de "support" au développement de pyrite sédimentaire (milieu réducteur). Le recouvrement de spores ou grains de pollen par des granules de pyrite donne un aspect de framboises (pyrites framboïdales).

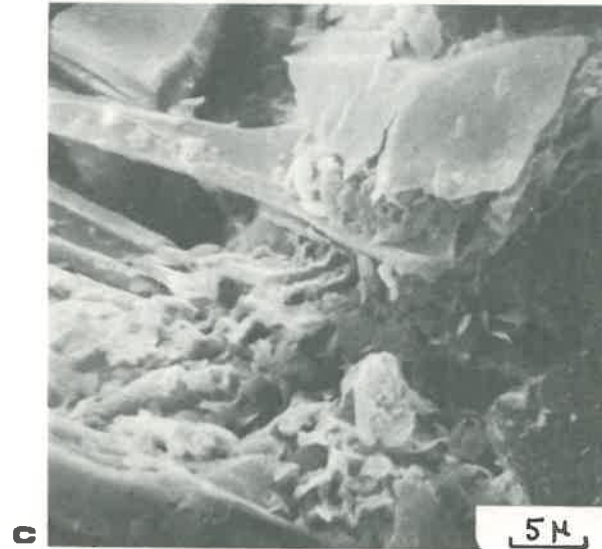


SAINT-ANDRE-DE-CUBZAC AO 2 2,80 m

Photo (a) - Cette vase tourbeuse se caractérise par une matrice silicatée très fine (argilo-colloïdale), associée à une phase organique importante (M.O. = 25 %). Cette dernière est constituée de débris végétaux en voie de décomposition et d'incorporation à la matrice : on note une désorganisation de la structure végétale.

Photo (b) - L'arrangement des débris végétaux est tel qu'il crée des vides importants ( $e = 4,4$ ).

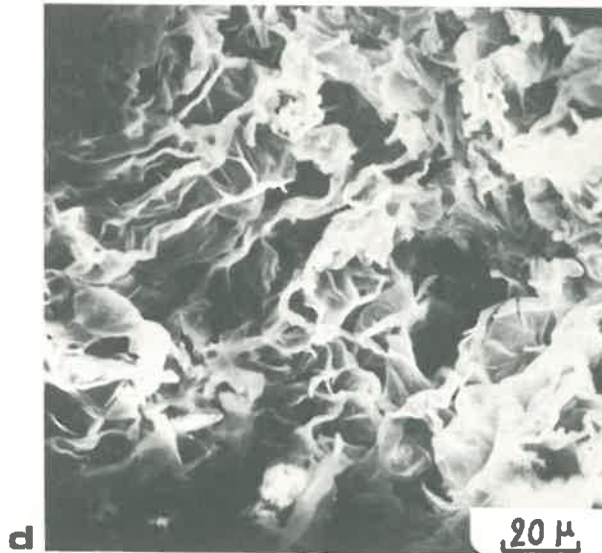
Photo (c) - Association végétaux-agrégats d'argile. On peut penser que ces liaisons évoluent dans le temps avec la formation d'un complexe argilo-humide (§ chapitre physico-chimie)



NIVEAU TOURBEUX DE PROVINS

Il s'agit d'un échantillon extrait d'un site très hétérogène constitué d'une alternance de niveaux tourbeux et carbonatés (tufs). Comme le montre cette vue prise au grandissement 500, cette hétérogénéité se retrouve à l'échelle de l'échantillon Photo (d).

A l'origine d'une texture très ouverte, la matrice, en grande partie organique, enrobe de nombreux carbonates de tailles comprises entre 10 et 20 μ.





ADOUR SONDAGE AP 6 4,40 m



Photo (a) - A faible grandissement (x 100) cette vase qui constitue le soubassement d'une épaisse tourbière apparaît comme une masse argileuse, enrobant tous les éléments.



b



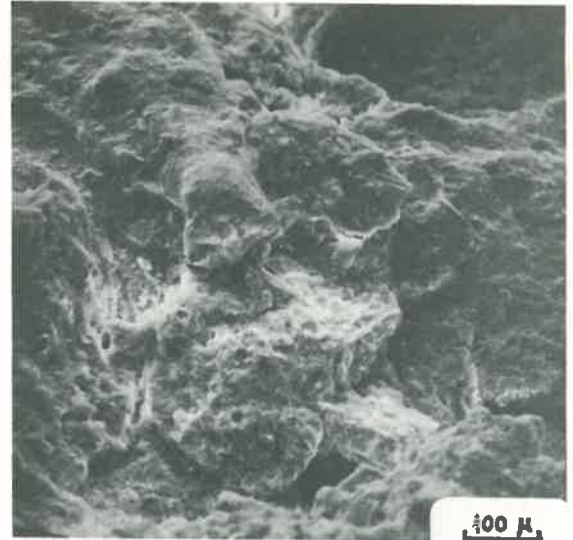
b'

 Vides inter-assemblages  
 Vides intra-assemblages

TOURBE DE LA VALLEE DE L'ADOUR APS 6 3,80 m

Cette Tourbe très riche en eau (w = 1100 %) a nécessité pour sa préparation une imprégnation à l'aide d'une résine. (c)

L'observation a été faite sur surface polie ce qui permet de discerner la trame végétale de la résine elle-même.



a

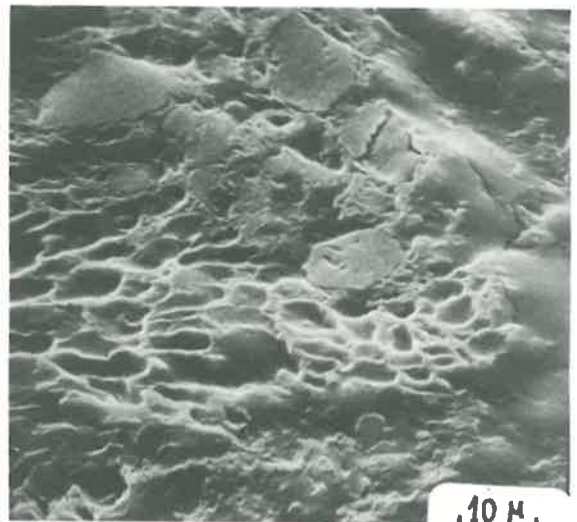
Photo (b) - A un plus fort grandissement (x 2 000) nous voyons quelques gros éléments supérieurs à 10 μ et une phase argileuse à texture floculée constituée de particules micrométriques.

La matière organique qui représente 20 % du matériau ne se trouve pas ici sous forme d'éléments figurés, mais essentiellement à l'état de colloïdes (§ physico-chimie) et contribue très certainement aux liaisons interparticulaires.

Deux types de porosités apparaissent nettement :

- une macroporosité inter-assemblage avec des diamètres de pores de 5-10 μ,
- une microporosité intra-assemblage, aménagée par les contacts "bord-face" entre particules.

Un fort indice des vides (e #5), ajouté à un taux de matières humides élevé, confèrent à cette vase de très médiocres caractéristiques géotechniques.



c

PLANCHE VIII

ST GAUDENS Limon peu organique 2,50 m



a

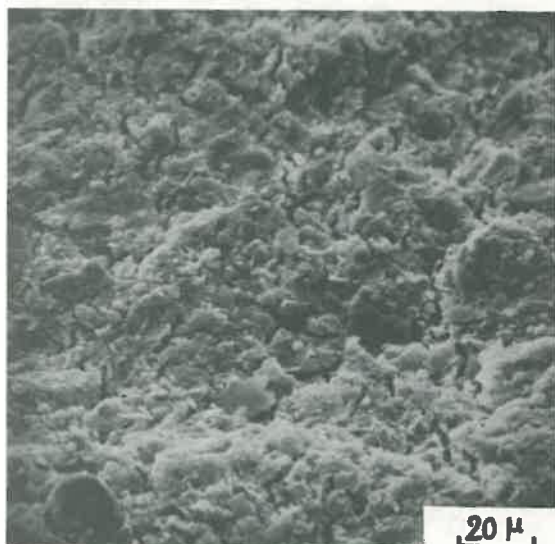
Nous ne retrouvons pas dans ce matériau la texture alvéolaire typique des vases. Photo (a)



b

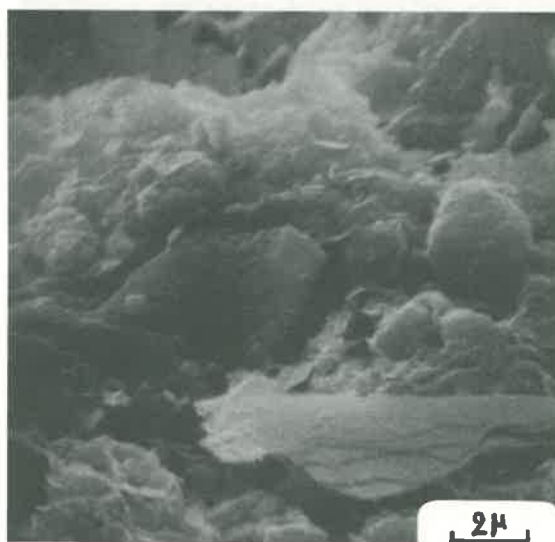
La photo (b) montre un assemblage de gros éléments noyés dans une matrice argileuse d'aspect granuleux. La texture, très serrée, caractéristique d'une granulométrie très étalée de sable limono-argileux, est à l'origine de la faible compressibilité.

FRANCHISSEMENT DU LEZ (PALAVAS) 17,50 m



c

Photo (c) - Il s'agit là d'un matériau à texture grumeleuse et relativement compacte. La phase argileuse, en quantité importante, ne présente pas d'individualité particulière à l'exception de quelques plaquettes micacées.



d

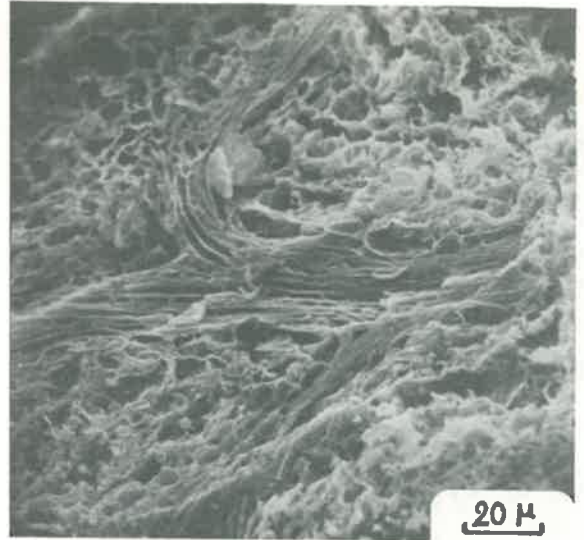
Photo (d) - Au sein de cette matrice argileuse, les gros éléments (en particulier les carbonates) se trouvent plus ou moins enrobés. Au premier plan, une plaquette micacée avec son aspect feuilleté.

Le poids des terres sus-jacentes (plus de 17 m d'épaisseur) est certainement à l'origine du resserrement de la texture et d'une certaine orientation des particules.

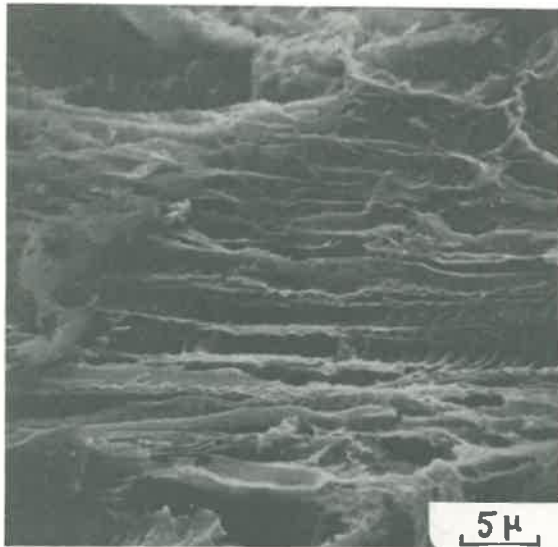
TOURBE DE LA VALLEE DE LA DIVES SC2

La photo (a) montre le caractère spongieux de la tourbe, dû à l'enchevêtrement des fibres végétales.

Les fibres végétales sont vues ici en coupes longitudinale et transversale dont les détails sont donnés par les photos (b et c) ; les canaux des structures végétales sont extrêmement fins : inférieurs à  $5 \mu$ .



a

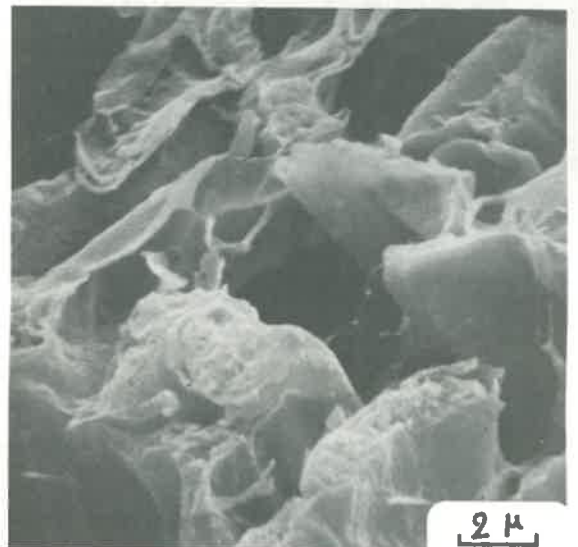


b



c

La photo (d) montre des associations entre fragments végétaux et phase minérale. Cette dernière est malgré tout, importante au sein de la trame fibreuse, puisqu'elle représente 40 % de la tourbe ce qui explique le  $\gamma_s$  élevé :  $1,80 \text{ g/cm}^3$ .



d



## 2. L'anisotropie

Lorsqu'elle se présente avec une texture alvéolaire, la vase est totalement isotrope; par définition, ses caractéristiques sont alors tridirectionnellement identiques.

L'anisotropie, qui traduit une orientation préférentielle des composants d'un sol, peut avoir deux causes :

- un arrangement des particules argileuses,

L'anisotropie peut, dans ce cas, avoir pour origine le mode de dépôt (faciès de décantation) ou bien la compaction. Dans ce dernier cas, il se produit une réorientation des particules argileuses lorsque la pression de consolidation  $\sigma_c$  dépasse celle de préconsolidation  $\sigma_c$ ; en deçà de cette valeur un étayement des particules les unes par rapport aux autres fait que le sédiment oppose une certaine résistance texturale à la compression.

- La présence de lits végétaux

- La présence de litages de végétaux vient perturber l'homogénéité du sédiment.

Ainsi l'anisotropie de la vase de Saint-André-de-Cubzac, exprimée en terme de cohésion par le rapport  $\frac{C_u \text{ verticale}}{C_u \text{ horizontale}} = 1,9$  n'est pas due à sa matrice argi-

leuse (alvéolaire), mais à l'existence de végétaux parfois bien conservés, à l'origine de discontinuités texturales (planche V, Cubzac A08)

Quant à la tourbe, son anisotropie se traduit par l'existence d'une perméabilité horizontale supérieure à la perméabilité verticale; ce phénomène fréquemment constaté dans ce type de matériau (Fradcourt et Ghiste 1973) s'accroît avec les pressions exercées (réorientation des fibres végétales).

## 3. La porosité

Il nous a été possible, à partir d'une estimation visuelle de l'espace poreux, au M.E.B., de discerner plusieurs types de porosité :

- une porosité intergranulaire,
- une porosité interparticulaire,
- une porosité inter-assemblage,
- une porosité intra-assemblage,
- une porosité de fibres.

- porosité intergranulaire :

Les vases fortement sableuses ont un volume intergranulaire qui correspond à une macro porosité. C'est le cas de la vase de Brest (planche II) qui présente des vides importants en grande partie occupés par de "l'eau libre" (forte porosité efficace).

- porosité interparticulaire :

Dans le cas d'un arrangement textural en alvéoles, tel celui observé dans la vase de Cubzac (niveau A05) (planche I) chaque particule participe au cloisonnement alvéolaire, nous parlons alors d'une porosité interparticulaire, caractéristique d'un état floclé.

L'examen comparé de courbes de distribution de tailles de pores d'argiles sédimentée et floclée montre, pour cette dernière, un accroissement considérable du pourcentage de pores de la classe 0,1-1 $\mu$  (d'après Diamond in F.Véniale, 1971).

- porosité inter et intra-assemblages :

Un certain nombre de vases présentent deux types de porosités "inter" et "intra-assemblages" ; ces assemblages peuvent être des agrégats, des flocons; ce sont les cas de vases de la vallée de l'Adour (planche VII) et de Redon (planche III).

Si l'on se réfère aux schémas classiques d'évolution des tassements dans le temps, nous voyons qu'aux drainages respectifs des pores inter-assemblages et intra-assemblages, correspondent la consolidation primaire et la compression secondaire.

La micro porosité intra-assemblage dépend de l'état d'arrangement des particules qui composent cet assemblage; elle est pratiquement inexistante, lorsque cet assemblage se présente sous la forme d'empilements très compacts de plaquettes d'argiles (planches IV et VIII).

Si l'assemblage en alvéoles est généralisé, à tout l'échantillon, on a alors affaire à une porosité interparticulaire telle qu'elle a été définie plus haut.

Notons que lorsque la phase colloïdale est présente en forte quantité, les micropores renferment alors une importante proportion d'eau liée ou adsorbée qui conditionne les caractéristiques géotechniques. Nous pouvons citer l'exemple d'une vase de la Vallée de la Vilaine : Cran (planche IV).

- porosité de fibres :

Les tourbes franches, et dans une moindre mesure les tourbes amorphes ou argileuses, présentent une porosité qui dépend essentiellement de l'arrangement spatial des fibres végétales (trame spongieuse) et de la structure de ces dernières (canaux des fibres et cellules végétales) et que nous appelons "porosité de fibres" (planche IX).

La trame fibreuse retient une importante quantité d'eau libre qui se trouve expulsée lors de la mise en charge. Dans le cas de tourbes amorphes, le phénomène se complique du fait qu'une eau liée aux colloïdes minéraux et organiques tend à ralentir la dissipation de pression interstitielle.

## 4. La perméabilité

La présence d'un liant colloïdal a pour conséquence de réduire le volume des vides intergranulaires et par là même la perméabilité.

L'indice des vides, comme nous l'avons vu, est un paramètre essentiel à la détermination de l'état textural, il est loin cependant d'expliquer tous les phénomènes propres aux sols fins; on sait, en effet, que la perméabilité de ces derniers, contrairement à celle des sols pulvérulents, n'est pas une fonction directe de l'indice des vides (Amar, et Dupuis, 1973).

L'existence d'une microporosité définie par la texture (loi de Poiseuille) et plus encore, les phénomènes physico-chimiques de surface sont à prendre en considération.

Une des conséquences mécaniques du comportement de l'eau dans les sols compressibles est le fluage.

La construction d'un remblai sur sol organique peut conduire à un tassement dû au fluage latéral : (figure 47).

il se produit une mise en pression de l'eau interstitielle, la résistance au cisaillement tend à s'annuler et le sol de fondation à se comporter comme un liquide.

Au fur et à mesure de la dissipation des pressions interstitielles, les contraintes se trouvent transférées de l'eau interstitielle à la texture.

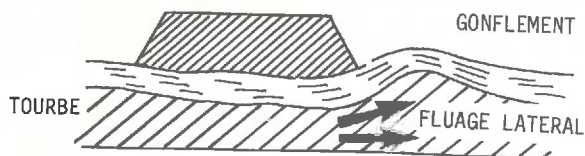


Fig. 47 - FLUAGE LATERAL

On comprend dès lors que, de l'importance relative de chacun des éléments texturaux précédemment analysés, dépend la manière dont s'effectuera ce transfert des contraintes.

### III.3. CONCLUSIONS

L'étude comparative des diverses caractéristiques texturales (caractéristiques granulaires ainsi que

caractéristiques d'arrangement et d'espace poreux) nous a permis de faire un essai de classification des sols organiques que nous résumons dans le tableau 13.

Toutefois, les subdivisions adoptées ici ne sauraient, quant à leurs correspondances physico-texturales et géotechniques, prendre un caractère général: l'arrangement spatial des grains dans un sol est en partie fonction de la densification du matériau (degré de compaction, ainsi que diagenèse selon Koff, Polyakov et Sergeev, 1973).

Il est un fait que l'analyse texturale offre un double intérêt; elle permet :

- d'une part, de mettre en évidence des interdépendances entre ses caractéristiques et certains paramètres mécaniques et ainsi donc d'établir des corrélations dont l'utilisation peut fournir une appréciation satisfaisante du comportement des sols étudiés,
- d'autre part, d'apporter un certain nombre de précisions, en ce qui concerne le rôle de l'eau, selon son état, sur le comportement mécanique des sols organiques.

Dans cette analyse de la texture, nous avons souvent fait appel à la notion de colloïdes, sans toutefois préciser leur signification physico-chimique, c'est l'objet du chapitre suivant.

TABLEAU 13

#### CLASSIFICATION TEXTURALE DES SOLS ORGANIQUES

	+++ fort	++ moyen	+ faible	(+) trace	vase sableuse	vase limoneuse	Vase argileuse			Tourbe			
							peu organique	Moyen. organique	Fortem. organique	argile tourbeuse	Tourbe argileuse	Tourbe franche	
agents cémentants M.O.	Granularité  classes granulométriques			sable	+++	+							
					++	+++	++	+					
					+	++	+++	++	++	+	+	(+)	
					(+)	+	+	++	+++	++	+	+	
					(+)	(+)	(+)	+	++	+++	++	+	
				minéraux	(+)	+	+	++	+++	++	+		
				organiques	(+)	(+)	(+)	+	++	+++	+		
				fibres végétales			(+)	(+)	(+)	+	++	+++	
arrangement spatial	type de texture				granuleu- se	grume- leuse	Alvéolaire		très lâche	très lâche	spongieuse		
	type de porosité dominant				inter- granulaire	inter- assemb.	inter et intra assemblages ou inter-particulaire			intra assem- blages et fibres		porosité de fibres	
	Indice des vides e				<1	1-1,5	1,5 à 5			> 5	5-10	10-20	
Principales caractéristiques géotechniques	Teneur en eau W				<40	40-60	60 à 200			> 200		400-1200	
	Compacité $\gamma_d$				1,50	1	0,80 à 0,50			< 0,40		0,10	
	Plasticité $I_p$				<20	20-50	60-80		# 100	> 100			
	Résistance au cisaillement $C_u$ en bars				0,300 à 1,00		0,300-0,100		<0,100	0,200 - 0,300		0,200-0,400	
	Compressibilité $C_c$				< 0,30	0,50	0,80-1,5		1,5-2	> 2			jusqu'à 10-15

## CHAPITRE IV — ÉTUDE PHYSICO-CHIMIQUE

Les sols argileux, en général, et plus particulièrement, en ce qui nous concerne, les sols organiques, renferment, dans les conditions naturelles, une certaine quantité d'eau.

Nous sommes amenés à considérer l'étude du système eau-constituants du sol.

Dans un premier temps, nous envisagerons le système eau-argile, puis nous orienterons cette étude vers les propriétés colloïdales en analysant les interactions entre colloïdes argileux et colloïdes organiques ainsi que leur incidence sur le comportement mécanique des sols.

Ce chapitre comprend ainsi deux parties :

- la physico-chimie des systèmes argileux,
- l'étude physico-chimique des sols organiques.

Nous nous proposons donc, à la lumière de la chimie physique des phénomènes superficiels, d'apporter une contribution à la compréhension du comportement mécanique des sols et plus particulièrement des sols organiques.

### IV.1. LA PHYSICO-CHIMIE DES SYSTEMES ARGILEUX

Il nous paraît intéressant de reprendre la définition que donnent Giroud et Bottero (1972).

"Un sol argileux est un sol dont le comportement mécanique est essentiellement fonction des propriétés physico-chimiques de ces particules. Ces propriétés sont caractérisées par l'affinité pour les liquides polaires (dont l'eau), la prépondérance des forces de surface vis-à-vis des forces de volume et la possibilité de substitutions ioniques".

Ainsi que le souligne Fripiat (1971), la plupart des problèmes liés aux sols argileux, sont en fait la manifestation de leur état colloïdal et de leur capacité d'échange de cations.

Dans cette première partie, nous analysons donc les propriétés électrochimiques des argiles, les méthodes d'études, leur apport à la mécanique des sols et aussi leurs limites lorsqu'on a affaire à des sols organiques.

#### A - LES PROPRIÉTÉS ELECTROCHIMIQUES DES SOLS ARGILEUX

Ces propriétés sont dominées par les phénomènes qui se produisent aux interfaces solide-fluide : échanges d'oxydoréduction, échanges ioniques, adsorption.

Ces phénomènes dépendent grandement de l'état de division de la matière minérale (particules argileuses) et de l'importance de la fraction colloïdale.

##### 1. Les phénomènes d'oxydo-réduction

Eh et pH sont des paramètres qui conditionnent les équilibres en solution. Le Eh ou potentiel redox d'une solution est le potentiel qui prend un fil de platine plongé dans une solution (potentiel de l'électrode de Pt) lorsque cette solution se trouve à l'équilibre du point de vue de réaction d'oxydo-réduction

de tous les couples redox qu'elle contient.

##### 2. La théorie de la double couche et Les phénomènes liés aux interfaces

###### a) les propriétés électrocinétiques

Les particules argileuses présentent une charge électrique globale négative dont nous discutons l'origine plus loin.

En suspension dans une solution aqueuse, ces particules s'entourent d'un certain nombre de cations de telle manière que le système (eau-argile) acquière l'électroneutralité par compensation de charge. Il s'ensuit alors une modification de l'environnement ionique; la répartition des ions contenus en solution est telle qu'il se forme autour des particules un nuage diffus, résultant de deux effets antagonistes : attraction et diffusion.

Un tel ensemble est généralement considéré comme une double couche électrique diffuse dont Gouy et Chapman ont proposé un modèle, modifié par Stern et composé :

- d'une couche liée au solide,
- d'une couche diffuse. (figure 48)

Nous avons, dans la suite de notre travail, adopté cette conception de la double couche, à savoir la distinction dans l'environnement ionique de la particule, entre une partie adsorbée (couche de Stern) et une partie diffuse (couche de Gouy) dans laquelle les interactions sont surtout de type électrostatique.

La surface de séparation entre couches adsorbée et diffuse est caractérisée par un paramètre important : le potentiel zeta  $\psi_z$ , qui correspond à la différence de potentiel électrique existant entre la couche adsorbée et la couche diffuse et rend compte ainsi de la charge de la particule.

Ce potentiel zeta des particules argileuses est mesuré expérimentalement par la technique d'électrophorèse qui consiste à calculer la vitesse de déplacement de ces particules chargées négativement dans un champ électrique E.

On détermine alors une mobilité électrophorétique  $V_e$  qui est reliée au potentiel zeta  $\psi_z$  par la relation:

$$V_e = \frac{\epsilon \psi_z E}{4 \pi \eta} \text{ en } \mu\text{sec/volt/cm}$$

avec  $\epsilon$  : constante diélectrique de la solution  
 $\eta$  : viscosité de cette solution

Les phénomènes électrocinétiques apparaissent lorsque dans un champ électrique deux phases, dont l'interface présente une double couche, se déplacent l'une par rapport à l'autre :

- déplacement du liquide (électro-osmose),
- déplacement des particules (électrophorèse).

###### b) l'hydratation des particules argileuses

Les molécules d'eau, en tant que dipôles participent activement à l'élaboration de la double couche.

Sergeev (1971), d'après le degré d'orientation des molécules d'eau en fonction de la distance à la particule, distingue :

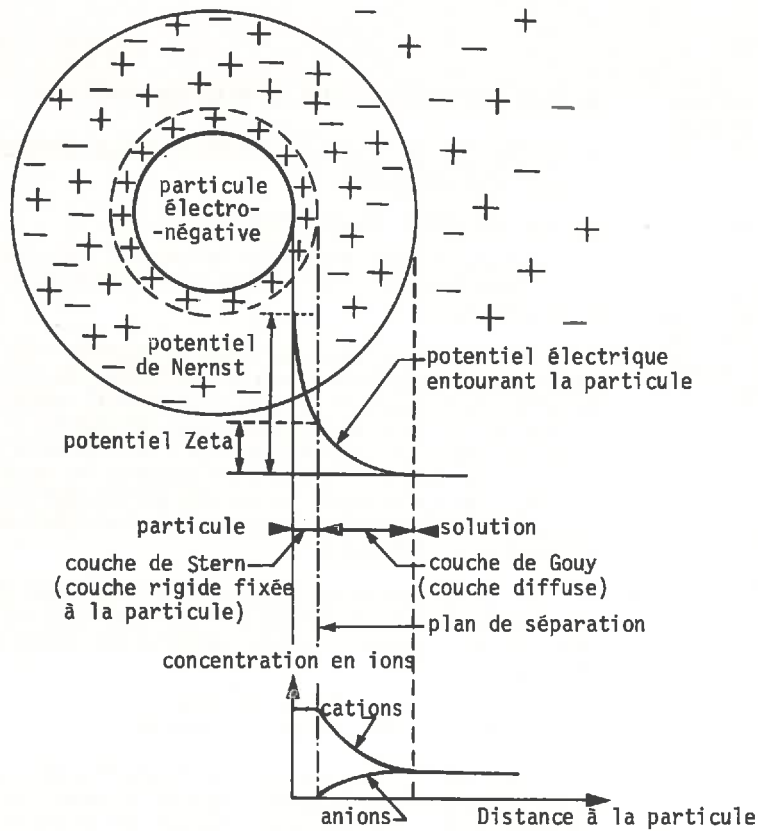


Fig. 48 - LE POTENTIEL ELECTROKINETIQUE  $\Psi$  ZETA

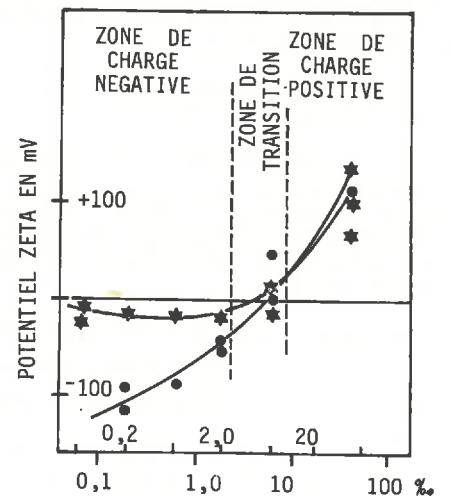


Fig. 50 INFLUENCE DE LA SALINITE SUR LE POTENTIEL ELECTROKINETIQUE

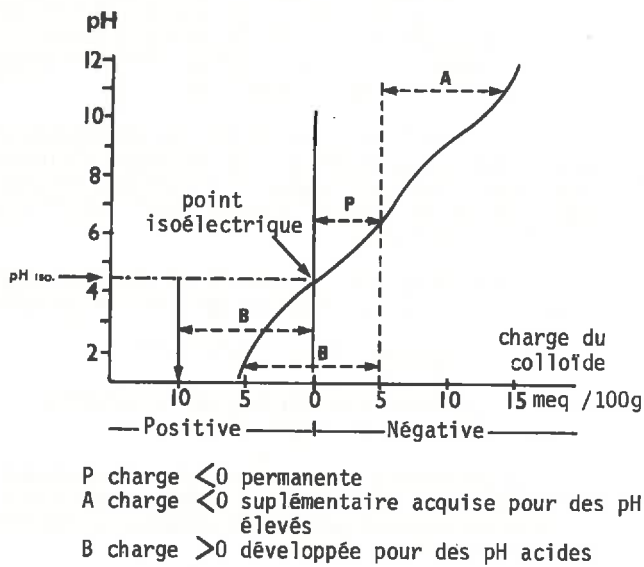


Fig. 49 - INFLUENCE DU pH SUR LA CHARGE DES PARTICULES

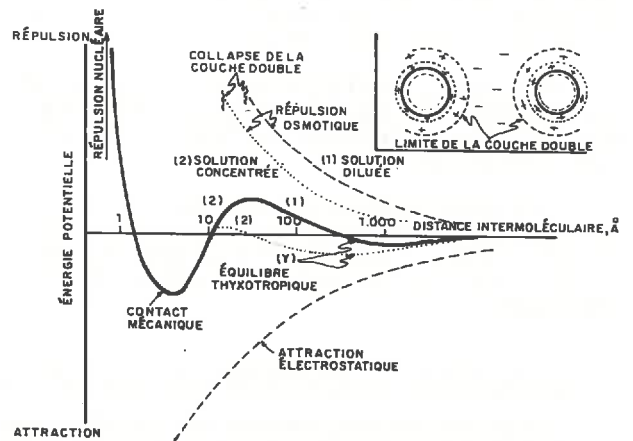


Fig. 51 - COURBE DU POTENTIEL D'INTERACTION PARTICULAIRE



- l'eau solidement liée aux éléments du réseau cristallin,
- l'eau faiblement liée, apte à une plus grande mobilité,
- l'eau libre qui n'est soumise qu'à la seule action de la gravité.

### 3. Les phénomènes de surface

#### a) l'origine des charges superficielles

Les charges superficielles qui conditionnent les propriétés colloïdales des argiles peuvent avoir trois causes :

- Les substitutions isomorphiques qui correspondent à un remplacement ionique intracristallin sont à l'origine d'un déficit structural de charge,

- A cela s'ajoute le processus d'hydrolyse qui conduit, suivant les conditions de pH du milieu, à une dissociation des groupements hydroxyles et, par voie de conséquence, à l'apparition de charges superficielles (Debyser, 1961, Touret et Vestier, 1971).

- Enfin, un troisième type de charge existe et exerce une influence prépondérante sur l'état textural (état floclé) et la thixotropie. Il s'agit des discontinuités du réseau cristallin, provoquées par la rupture des chaînes structurales des argiles; les valences libres laissées par ces ruptures sont à l'origine des charges de bordures des particules. Ces charges pouvant être négatives ou positives suivant que la rupture s'est faite au niveau d'atomes d'oxygène ou de cations de la structure cristalline.

#### b) la notion d'état colloïdal

Nous avons, en définissant les différentes classes granulaires, différencié argiles granulométriques ( $2\mu - 0,2\mu$ ) et colloïdes  $<0,2\mu$ .

En chimie des sols on a l'habitude de classer ces deux fractions suivant leur affinité pour l'eau, en colloïdes hydrophobes et colloïdes hydrophyles.

Nous avons, quant à nous, basé cette différenciation sur la taille des particules, caractéristique qui en elle-même conditionne l'épaisseur des doubles couches.

Ainsi on parlera d'un état colloïdal, caractérisé par les phénomènes de surface (double couche, adsorption, hydratation, échange ionique) aussi bien pour la fraction  $2 - 0,2\mu$  des argiles minéralogiques, que pour la fraction colloïdale vraie inférieure à  $0,2\mu$ .

Toutefois, on peut s'attendre à ce que cette dernière fraction, qui renferme à la fois les colloïdes minéraux (argile essentiellement montmorillonitique, silice colloïdale, hydroxyde de fer...) et les colloïdes organiques (colloïdes humiques), joue, de par ses propriétés de surface, un rôle de tout premier plan dans les sols.

#### c) l'influence des conditions de milieu sur la charge des colloïdes

Le signe et l'intensité de la charge des colloïdes dépendent étroitement de conditions de milieu telles que le pH et la salinité :

- influence du pH  
La figure 49 qui traduit l'influence du pH sur la charge, montre que pour des pH fortement acides, les

particules argileuses deviennent électropositives (F.E. Bear, 1964). Le signe de la charge dépend en grande partie de la valeur du pH du milieu; l'inversion de signe se produit lorsque le pH dépasse un pH isoélectrique pour lequel la charge est nulle.

- influence de la salinité

La figure 50 illustre l'action de la salinité sur la charge électrique de quelques sédiments (exprimée ici sous la forme du potentiel zeta), (Pravdic, 1970 in Y. Morel, 1971).

- . pour des salinités inférieures à 2 ‰, les particules sont chargées négativement,

- . une zone de transition située entre 2 et 6 ‰ de salinité délimite un domaine isoélectrique ( $\psi_z=0$ ) pour lequel la floculation est maximale,

- . au delà d'une salinité de 6 ‰, la charge des sédiments naturels (Quartz + argiles) devient positive et varie linéairement en fonction de la salinité.

#### d) l'interaction entre particules

On sait que deux particules argileuses, du fait qu'elles présentent toutes les deux un potentiel électrique global négatif ont tendance à se repousser.

Toutefois, si les distances interparticulaires sont suffisamment petites, il peut se produire une attraction sous l'effet des forces de Van der Waals.

Nous empruntons à J.A. Jimenez Salas (1972), la figure 51 issue des travaux de Verwey et Overbeck (1948) sur la stabilité des colloïdes et donnant une représentation schématique de la courbe de potentiel de l'interaction particulaire.

Le potentiel global présente deux minima :

Le plus grand minimum appelé contact mécanique dépend d'une liaison très résistante et présente une distance interparticulaire inférieure à 10 Å,

Le plus faible minimum correspond à un équilibre plutôt métastable : l'équilibre thixotropique.

Il est évident qu'un tel équilibre est très sensible à une modification du champ électrique; on voit alors l'influence considérable des conditions de milieu (concentration électrolytique, pH), nature des cations adsorbés.

### B - LES TECHNIQUES D'ETUDE DES PROPRIETES COLLOÏDALES

Afin d'étudier les réactions qui se produisent à l'interface solide-liquide, trois méthodes d'investigations ont été utilisées :

- la mesure de capacité d'échange de cations : C.E.C.,
- la physisorption (technique B.E.T.),
- la chimisorption.

#### 1. La mesure de la capacité d'échange de cations

##### a) principe de l'échange de cations

Entourés d'une eau de solvatation, les cations adsorbés à la surface des particules argileuses, ont la possibilité d'être remplacés par d'autres cations présents dans la solution électrolytique. Ainsi une propriété importante des argiles est celle de l'adsorption réversible de cations tels que  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Ba^{++}$ ,  $NH_4^+$  et de dipôles d'eau sur les faces



TABLEAU 14

	C. E. C. en m.e.q./100g
BREST P6	19,5
LORIENT	18,4
MUZILLAC	35,6
CRAN A	36,4
CHARENTE	24,0
CUBZAC Ao2	54,5
ADOUR APS6	22,0
ADOUR APS8	15,0
SAINT-GAUDENS	22,0

Tableau 16

Capacité d'échange de cations et surface spécifique des principales argiles valeurs moyennes (d'après les données bibliographiques)

	C E C		SURFACE SPECIFIQUE m <sup>2</sup> /g	
	appréciation	valeur	externe B.E.T.	totale
KAOLINITE	faible	10-15	10-30	10-30
ILLITE	moyenne	20-40	70-140	70-140
CHLORITE	moyenne	10-40	50-150	50-150
MONTMORILLONITE	forte	80-100	80	700-800

Tableau 17

Influence du cation adsorbé (in Guyot, 1969)

type de Montmorillonite	Mt - Li	Mt - Na	Mt - K	Mt Cs
surface spécifique externe (B.E.T. en m <sup>2</sup> /g)	67	45-55	50	137
surface totale m <sup>2</sup> /g	840	830	790	770

Tableau 18

Influence de la concentration électrolytique (in Fripiat et al., 1971)

Concentration en Na Cl n (me/l)	1	10	100
surface spécifique totale de la Montmorillonite Na (m <sup>2</sup> /g)	380	410	750

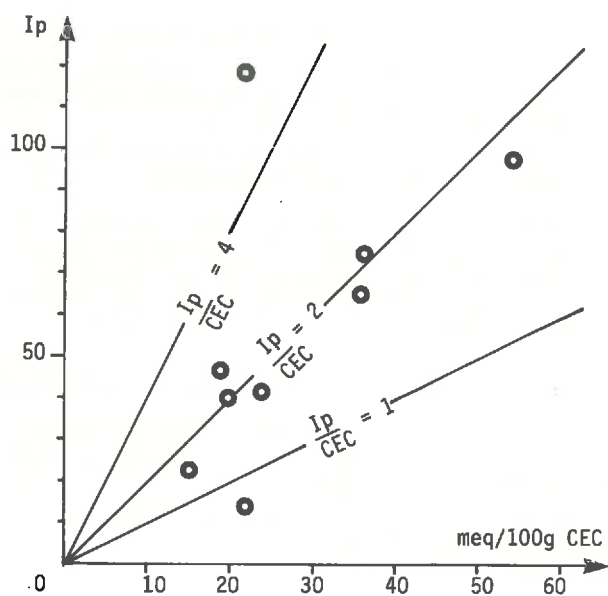


Fig. 52 - RELATION INDICE DE PLASTICITE Ip  
CAPACITE D'ECHANGE DE CATIONS CEC

basales ou dans les espaces interfoliaires, pour ce qui est des argiles gonflantes.

Ce phénomène de "substitution superficielle" d'ions est mesuré pour un sol argileux par sa capacité d'échange de cations (CEC), que l'on définit comme étant le nombre de milliéquivalents de cations susceptibles d'être adsorbés d'une façon réversible par 100 g de sol.

La CEC représente en quelque sorte le déficit de charge de particules argileuses exprimé par le nombre de cations attirés à la surface de l'argile et nécessaires pour atteindre l'électroneutralité.

b) mode opératoire

La méthode consiste à saturer le matériau par une solution d'acétate d'ammonium, à déplacer l'ammoniaque adsorbé par distillation en présence de magnésium MgO et ensuite à la doser sous forme de NH<sub>3</sub> par barbotage dans une solution d'acide sulfurique.

c) mesure de la CEC de la phase argileuse des vases

Les résultats obtenus pour quelques vases sont consignés dans le tableau 14.

On sait qu'il existe en général pour les sols argileux une bonne corrélation entre les limites d'Atterberg et la C.E.C. (Piaskowski, 1957, Farrar et Coleman, 1967). En ce qui concerne les sols organiques, cette relation n'est pas aussi nette et traduit le fait de grandes variabilités dans l'activité superficielle de ce type de sol, comme le montre la figure 52, exprimant la relation Ip/CEC; nous constatons qu'un point s'écarte totalement de la droite  $I_p = f(CEC)$ ; il s'agit d'une vase de la vallée de l'Adour, dont nous avons déjà signalé la singularité (cf § III.2.A.) et pour laquelle nous avons invoqué l'influence de la matière organique. L'aspect de ce problème sera abordé dans la deuxième partie de ce chapitre.

2. La mesure des surfaces par physisorption

a) méthode B.E.T.

Bien que dans certains cas, il soit possible d'atteindre la surface interne structurale (cas d'isothermes complets sur argile fibreuse - Deloye-Struillou, 1971), la méthode par physisorption (BET) mesure essentiellement la surface externe des particules argileuses.

Nous avons développé dans le chapitre concernant les textures le principe de la technique B.E.T. ainsi que ses performances; nous n'aborderons que son rôle dans les propriétés de surface.

b) surface B.E.T. et capacité d'échange de cations

Les propriétés de surface de la fraction minérale de quelques uns des sols étudiés sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau n° 15

	Surface spécifique BET en m <sup>2</sup> /g	C.E.C. en m.eq/100g	Densité de charge
CUBZAC A <sub>0</sub>	85	54.5	6,4 10 <sup>-3</sup>
ADOUR APS 6	31	22	7,1 10 <sup>-3</sup>
BREST P6	18,5	19,5	10,5 10 <sup>-3</sup>

Par "densité de charge", nous entendons le rapport de la C.E.C. par la surface spécifique. L'hétérogénéité dans la répartition et la nature des charges électriques superficielles peut faire de cette densité de charge un facteur essentiel de l'état textural.

Nous donnons dans le tableau 16 en parallèle, un ordre de grandeur de la C.E.C. et la surface spécifique de quelques argiles. La surface spécifique et la C.E.C. varient dans le même sens, ce qui met en évidence le fait que ce sont bien les propriétés de surface qui conditionnent les phénomènes électrocinétiques.

Par ailleurs, nous notons l'incidence de la nature des cations échangeables et la concentration électrolytique sur la valeur des surfaces spécifiques (tableau 17 et 18), cela concerne essentiellement les phyllites qui possèdent une surface interne (espace interfoliaire des montmorillonites).

L'accessibilité de ces surfaces dépend, non seulement de facteurs géométriques conditionnés par la dimension même des cations échangeables, mais surtout du caractère polaire des molécules utilisées pour la mesure des surfaces (chimisorption).

3. Les propriétés de surface déterminées par chimisorption

L'adsorption chimique ou chimisorption permet de mesurer la surface spécifique totale : surface externe des particules et surface interne (interfoliaire) des smectites.

Les méthodes par chimisorption sont nombreuses, elles font intervenir comme adsorbats des molécules polaires :

- eau (Quirk, 1955 - Farrar, 1963)
- éthylène-glycol (Dyal et Hendricks, 1950 - Rawson, 1969)
- bleu de méthylène (Hang et Brindley, 1970 - A.P.I. 1974)

C'est cette dernière méthode que nous avons essayé d'appliquer aux sols étudiés :

a) principe de la technique au bleu de méthylène

Il s'agit d'une adsorption chimique irréversible du bleu de méthylène qui s'effectue avec une libération équivalente de cations échangeables.

Les caractéristiques du bleu de méthylène sont les suivantes :

- . formule globale C<sub>16</sub> H<sub>18</sub> N<sub>3</sub> S Cl 3H<sub>2</sub>O (trihydrate)
- . structure de l'ion :

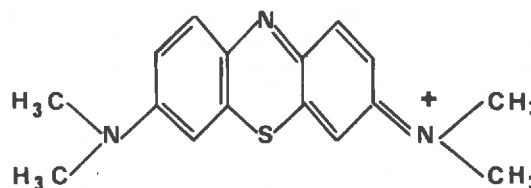


Fig. 53 - STRUCTURE DE L'ION - BLEU DE METHYLENE

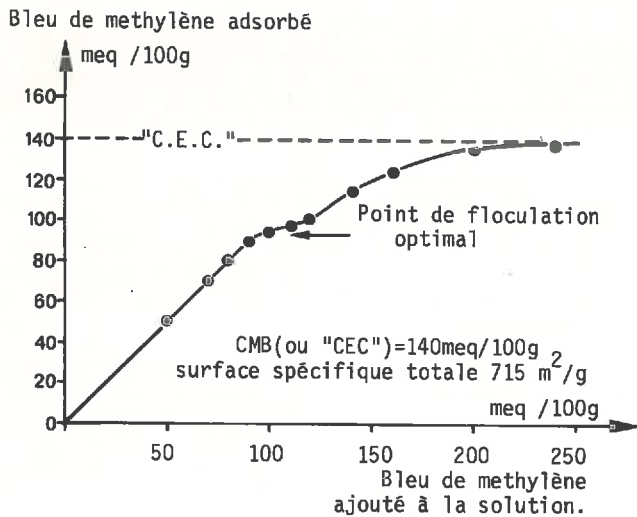


Fig. 54 - ISOTHERME D'ADSORPTION D'UNE MONTMORILLONITE Na

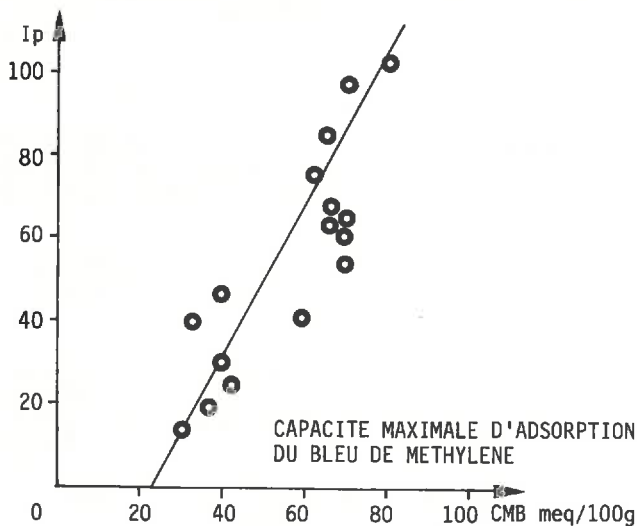


Fig. 55 - CORRELATION PLASTICITE-CAPACITE MAXIMALE D'ADSORPTION DU BLEU DE METHYLENE

- masse moléculaire : 373,9
- dimension de la molécule (assimilée à un parallèle-pipède) 17,0 x 7,6 x 32,5 Å
- aire projetée ≈ 130 Å<sup>2</sup> (surface de recouvrement)

b) mode opératoire

La méthode consiste à mettre en contact une solution de titre connu de bleu de méthylène avec une certaine quantité d'argile, puis à séparer par centrifugation le complexe formé et la solution.

Le surnageant est ensuite dosé au photocolorimètre ( $\lambda = 6650 \text{ \AA}$ ), sachant que l'on part d'une solution mère à 0,01 M (0,01 équivalent cationique), on détermine ainsi la quantité de bleu de méthylène fixé.

c) application de la chimisorption à l'étude des sols

Nous avons, pour une montmorillonite sodique, déterminé l'isotherme d'adsorption (figure 54), en mesurant pour des concentrations croissantes de bleu de méthylène la quantité adsorbée.

Selon Hang et Brindley (1970), le point de floculation optimum, qui apparaît lorsque l'isotherme s'écarte de la droite à 45°, correspond à un recouvrement de la surface totale de l'échantillon, par une monocouche de molécules de bleu de méthylène,

sachant que :

l'aire occupée par une mole :  $6,02 \times 130 \times 10^3 \text{ m}^2$   
 pour une solution mère à 0,01 M :  $1 \text{ meq} = 10^{-3} \text{ moles}$   
 N : la quantité adsorbée pour 1 g d'argile

on a alors la surface totale:  $S = N \times 6,02 \times 130 \text{ m}^2/\text{g}$

Le plateau de l'isotherme d'adsorption correspond à un maximum d'échange de cations (C.E.C.); il s'agit en fait de la capacité maximale d'adsorption du bleu de méthylène que nous appelons par la suite C.M.B.

Le diagramme ci-dessous exprime les résultats obtenus par cette méthode (figure 55).

4. Discussion des résultats fournis par les techniques utilisées

- la capacité d'échange de cations ou C.E.C.

La C.E.C. obtenue sur la fraction minérale des sols, bien qu'elle soit étroitement liée à des paramètres texturaux (granularité, surface spécifique) a surtout une valeur minéralogique, laquelle ne reflète que partiellement le comportement physico-chimique de matériaux à associations complexes comme les sols organiques.

- la surface spécifique B.E.T.

La technique B.E.T., nous l'avons vue (cf § texture), nous apparaît comme tout à fait adaptée à la détermination de caractéristiques texturales; elle l'est cependant moins à l'étude physico-chimique des sols montmorillonitiques et organiques :

- elle ne prend pas en compte, dans son intégralité, la surface interfoliaire des argiles gonflantes ou smectites (non pénétration de molécules de gaz neutre entre les feuillets),

- elle ne permet pas de mesurer la surface totale des colloïdes organiques qui, nous le verrons, peut atteindre plusieurs centaines de m<sup>2</sup>.

- la chimisorption

Outre la rapidité de cette méthode, l'adsorption chimique nous semble être la technique qui se rapproche le plus de la réalité physico-chimique des sols. Cependant, afin qu'elle puisse rendre compte globalement de l'activité superficielle réelle d'un sol, nous pensons que cette technique doit être appliquée sur l'échantillon brut et non sur la seule phase argileuse, cette dernière n'étant pas l'unique phase "active".

C - APPROCHE PHYSICO-CHEMIQUE DU COMPORTEMENT DES SOLS ARGILEUX

Les connaissances actuelles concernant une approche physico-chimique du comportement mécanique des argiles nous permettent d'apporter une conclusion à cette première partie..

floculation

L'addition d'un électrolyte dans une suspension argileuse entraîne une diminution du potentiel électrocinétique et une floculation, c'est-à-dire une agrégation des particules (Van Olphen, 1966). La floculation est totale au point d'annulation du potentiel Zeta, et par suite d'une rétraction des doubles couches, les forces d'attraction dominant et favorisent ainsi l'agglomération.

Ce potentiel dépend de la concentration en ions de la solution et du pH.

Thixotropie

La thixotropie est définie généralement comme l'aptitude d'un matériau à récupérer une partie de sa résistance initiale après remaniement.

La vibration d'un système (eau-argile) floculé a pour effet de briser les longues chaînes que forment les feuillets argileux reliés entre eux, laissant ainsi en bordure des particules des valences libres, qui, au repos par suite des mouvements browniens, auront tendance à se saturer; les longues chaînes se reconstituant, l'argile retrouve sa structure initiale, et le système (eau-argile) sa texture ainsi que sa rigidité thixotropique (Gelpi et Imbert, 1958).

Plasticité

Elle dépend de plusieurs facteurs :

1. la nature et la dimension des particules :

Les fortes limites de plasticité des Montmorillonites sont une conséquence de leur aptitude à se disperser en très petites particules dont les surfaces ont un grand pouvoir adsorbant (Grim, 1962). Farrar et Coleman (1967) ont mis en évidence des corrélations très significatives entre les limites d'Atterberg et la surface spécifique, et notamment la relation entre la limite de liquidité  $W_L$  et la surface spécifique totale  $S$  :

$$W_L = 19 + 0,56 S \quad R = 0,91$$

2. la forme des particules :

La forme aniso-dimensionnelle des cristallites argileux tend à conférer aux sols un comportement plastique (Nuyens, 1961).

3. l'eau associée aux particules argileuses :

Les particules d'argiles sont entourées d'eau dont le comportement est de moins en moins rigide au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la particule.

4. la nature des cations échangeables (Grim, 1962) :

Suivant le type de cation adsorbé, la plasticité varie considérablement, elle augmente avec les cations dans l'ordre suivant :  $Ca^{++} < Mg^{++} < H^+ < NH_4^+ < Na^+ < Li^+$ . Selon Mering (in Pedro, 1974), les phénomènes d'hydratation et de solvatation des argiles sont la

conséquence des propriétés d'hydratation et de solvatation de leurs cations compensateurs.

La cohésion

La cohésion est dominée par les phénomènes de surface et notamment les forces interparticulaires.

Les argiles présentent, en général, des cohésions assez fortes tant que la teneur en eau ne dépasse pas la limite de plasticité. Ce sont les "multicouches d'eau orientée" développées autour des particules argileuses qui sont à l'origine des propriétés "collantes" des matériaux argileux (Sergeev, 1971).

La cohésion dépend, non seulement de l'état colloïdal, mais aussi de la forme des particules qui, en modifiant l'intensité des forces de cohésion ou du frottement interne, influe sur la résistance mécanique (Bottero, 1971).

La compressibilité

Léonards (1968) pense que la compression secondaire, et notamment le fluage sont en grande partie la manifestation de relations qui existent entre le temps de chargement et les propriétés structurales de l'eau orientée des doubles couches.

IV.2. LA PHYSICO-CHEMIE DES SOLS ORGANIQUES

Bourcart et Francis Boeuf (1942), comparant une vase et un limon, font remarquer que la différence entre ces deux types de sols n'est pas basée sur le caractère dimensionnel des particules mais plutôt sur le potentiel d'activité biochimique et géochimique du sédiment.

Nous sommes donc amenés à élargir le système (eau-argile) précédemment considéré, afin d'y faire entrer la matière organique et la biomasse bactérienne, laquelle fait de la vase un complexe vivant et évolutif.

Après avoir rappelé quelques caractères généraux concernant la matière organique et analysé l'évolution de celle-ci dans les sols ainsi que les méthodes permettant d'apprécier cette évolution, nous nous pencherons sur la nature des colloïdes humiques, leurs relations avec la fraction minérale. Enfin, nous chercherons à voir le rôle que joue la matière organique, suivant l'état dans lequel elle se trouve, sur le comportement mécanique des sols.

A - GENERALITES : LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES SOLS

Les vases et les tourbes renferment, en proportions variables, essentiellement deux types de matières organiques :

- des matières organiques libres :

Il s'agit de matières organiques fraîches, constituées de débris végétaux et de résidus animaux, pratiquement pas transformées et sans liaison intime avec la fraction minérale du sol,

- des matières organiques liées :

Il s'agit là de matières organiques évoluées composées principalement de colloïdes humiques fixés à la phase minérale.

Quelques définitions :

- on réserve classiquement le terme de colloïdes humiques à la fraction organique passant en solution en milieu alcalin (Demolon, 1960),

Nous aurons l'occasion de préciser ce terme d'un point de vue physico-chimique en le transposant aux divers constituants de la "fraction liée" : acide humique, acide fulvique et humine.

- l'humification est le processus de transfor-

mation de la matière organique fraîche en humus colloïdal.

- la tourbification ou humification des tourbes est la transformation de la "tourbe franche", constituée d'un amas de fibres végétales très compressible, en une tourbe évoluée ou "tourbe amorphe", possédant une texture plus dense liée à la présence, au sein de la matière organique, d'une fraction colloïdale importante.

Ainsi, suivant le degré de tourbification, les propriétés physico-mécaniques de ces sols seront différentes. De même, on peut s'attendre à ce que les colloïdes humiques, que renferment les vases, influent sur leurs propriétés mécaniques.

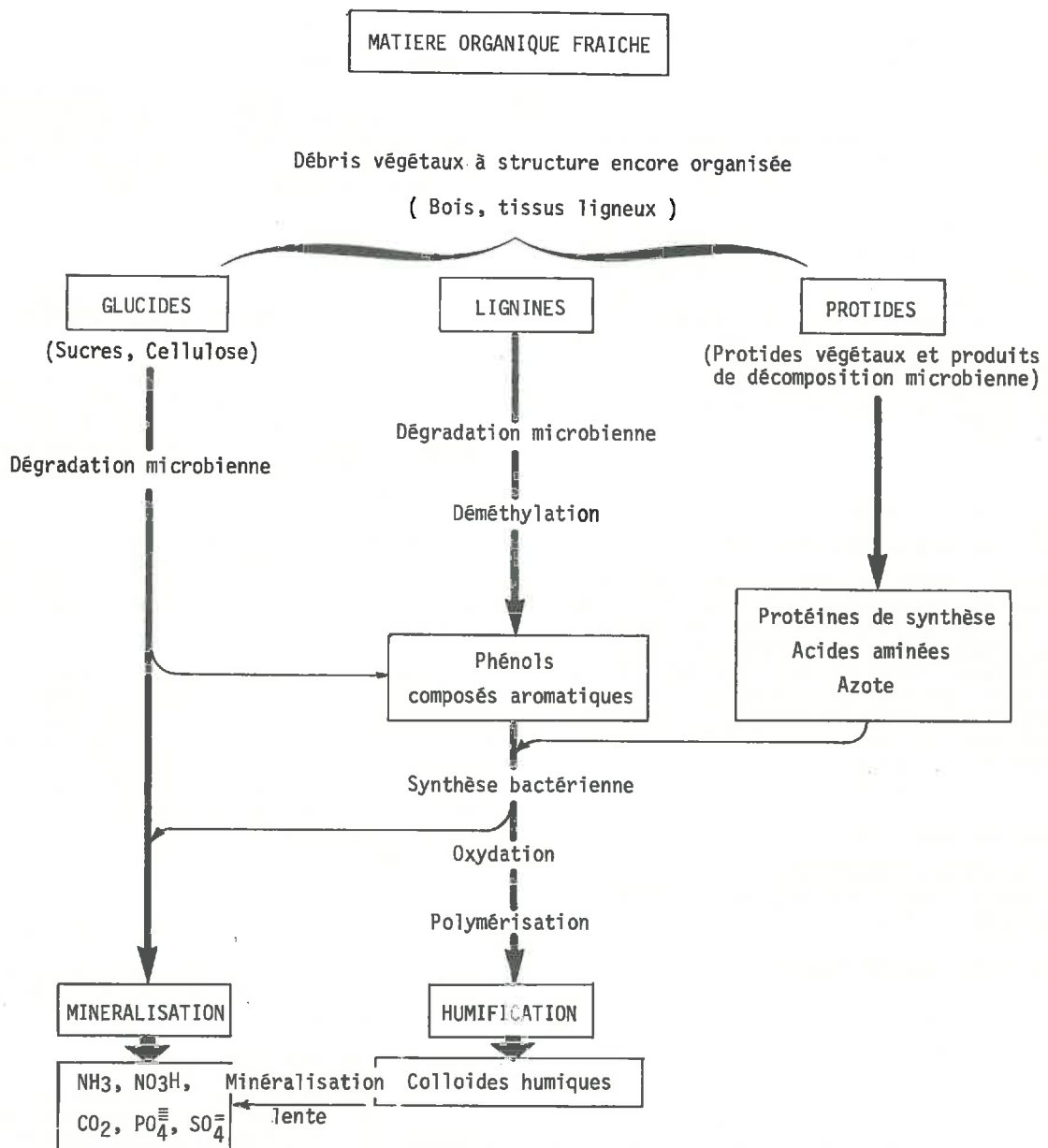


Fig. 56 - LES DIFFERENTES VOIES D'EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE (Minéralisation ou Humification)



B - L'ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LES  
SEDIMENTS

L'évolution de la matière organique dans les sédiments dépend d'un certain nombre de facteurs : la vitesse de sédimentation, l'activité biologique, les conditions de milieu, la composition minéralogique et la texture des sédiments.

- la vitesse de sédimentation :

Il s'agit d'un facteur fondamental dans le devenir de la matière organique selon qu'elle sera piégée plus ou moins rapidement dans les sédiments, la matière organique subira une évolution plus ou moins rapide.

- l'activité biologique : La dégradation par les micro-organismes :

Les principaux micro-organismes présents dans le sol sont les algues, les bactéries et les champignons (basidiomycètes, pénicillium, actinomycètes). L'action microbienne se fait sentir à tous les stades de l'évolution de la matière organique (figure 56).

En se transformant, la matière organique fraîche peut donner des éléments minéraux solubles ou gazeux (minéralisation) ou bien des complexes colloïdaux humiques (humification). L'humus résulte essentiellement de la condensation de dérivés phénoliques issus de la dégradation de la lignine avec des composés aminés.

- les conditions de milieu :

Ce sont essentiellement les conditions de température, d'humidité, d'oxygénation et de pH.

En particulier, les processus biochimiques qui président à la formation des substances humiques diffèrent selon le pH; c'est ainsi que, contrairement au milieu acide, le milieu calcique bloque la transformation de la matière organique à un stade précoce (Duchaufour et Jacquin, 1975).

- la composition minéralogique et la texture (état de division) :

Les argiles exercent une grande influence sur l'activité des micro-organismes, ainsi certains chercheurs ont montré que, suivant le milieu de culture et les conditions d'incubation, le rôle de la Montmorillonite sur l'activité bactérienne pouvait être totalement différent et faire évoluer la matière organique soit vers la voie minéralisation soit vers la voie humification.

J.P. Martin et K. Haider (1971), tout en soulignant l'extrême complexité des équilibres biodynamiques qui se réalisent dans le sol, remarquent que l'influence des argiles sur l'activité bactérienne se traduit généralement par une augmentation du taux d'acides humiques dans le sol (humification) et plus rarement toutefois, par une légère diminution (minéralisation).

Des travaux récents du Centre de Pédologie biologique de Nancy (1974 et 1975) ont montré que la présence de "fer libre" associé aux fines particules argileuses induit, à partir de l'insolubilité de produits phénoliques, la formation de composés humiques.

C - LE DEGRÉ D'HUMIFICATION DES SOLS ORGANIQUES

Différentes possibilités s'offrent à nous pour évaluer l'importance de l'humification d'un sol :

- le degré d'humification de Von Post,
- le rapport carbone-azote,
- le fractionnement des matières organiques.

1. Le degré d'humification de Von Post

Il s'agit d'un test qualitatif permettant de codifier le degré d'humification d'un sol fortement organique, basé sur la couleur du fluide interstitiel expulsé, après avoir comprimé dans la main un échantillon du sol étudié.

Ce test, bien que rapide, n'a pas été utilisé ici car il ne répondait pas à l'objectif recherché: c'est-à-dire une quantification de l'importance des colloïdes organiques dans le sol.

2. Le rapport carbone-azote

Ce rapport peut être aussi un critère de caractérisation de l'humus (Duchaufour, 1960).

La détermination du rapport C/N des échantillons étudiés ne nous a permis de tirer des renseignements dans ce domaine que pour les tourbes (tableau 19).

On note effectivement une diminution de ce rapport avec l'évolution de la matière organique, confirmée par la suite, par la mesure du taux d'humification.

Tableau n° 19

Tourbe	% C	% N	C/N	humification ↑
Bourgoin	35,2	2,21	15,9	
Beauregard	28,5	1,55	18,4	
Fampoux	35,4	1,70	20,8	

Pour ce qui est des vases, le rapport C/N est certainement davantage influencé par l'origine de la matière organique (cf § II.2)

3. Le fractionnement des matières organiques

a) principe

Le fractionnement de la matière organique, tel que nous l'avons réalisé sur les sols étudiés, est schématisé sur la figure 57. Il comprend deux étapes :  
- l'extraction des colloïdes "mobiles"

L'emploi d'un réactif alcalin : le pyrophosphate de sodium à 0,1 M (Thomann, 1963 in Dumon, 1972) préféré ici à la soude, permet d'extraire la matière humifiée soluble qui est ensuite fractionnée en acides fulvique et humique.

- la séparation densimétrique

On utilise comme liqueur lourde un mélange bromoforme-alcool éthylique de densité  $d \approx 1,7$  (Turc, 1949, Henin et Turc, 1950, Monnier et al, 1962).

On sépare ainsi par flottation les débris végétaux, d'une fraction plus dense constituée de la phase minérale sur laquelle se trouve fixée l'humine, insoluble dans les alcalis.

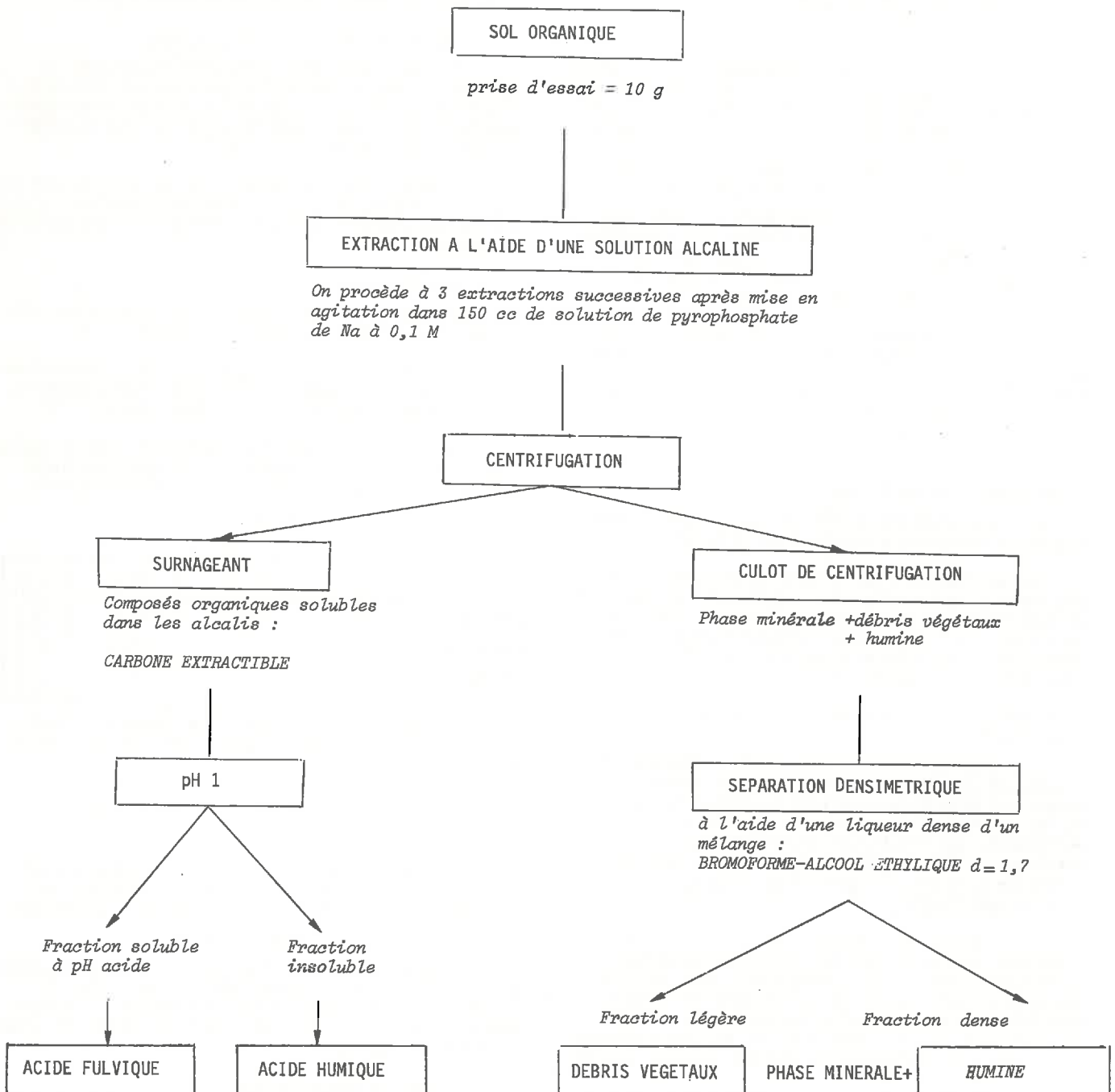


FIG.57-SCHEMA DE FRACTIONNEMENT DE LA MATIERE ORGANIQUE

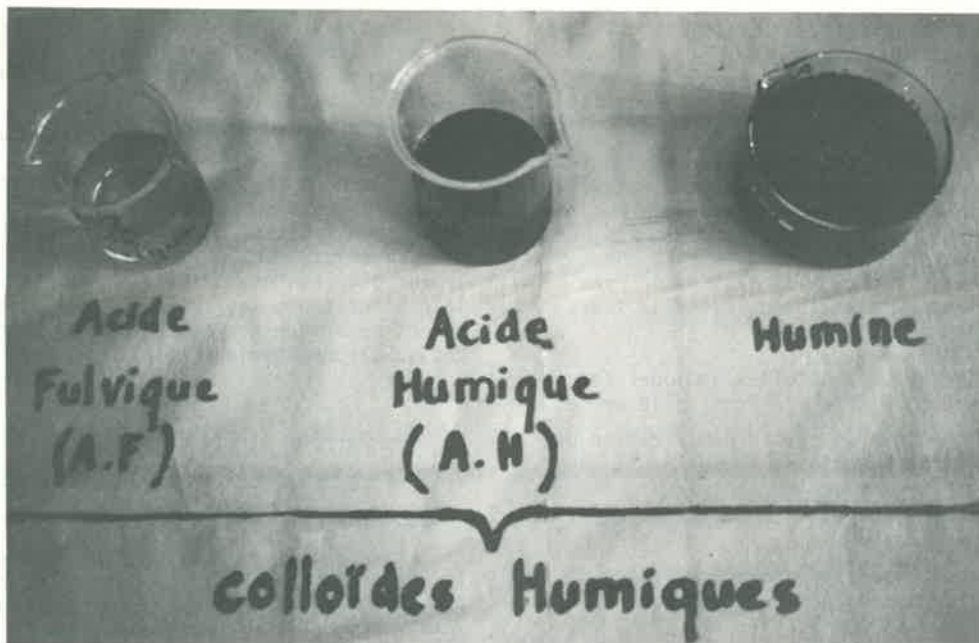


Fig 58. Résultats du fractionnement des matières organiques

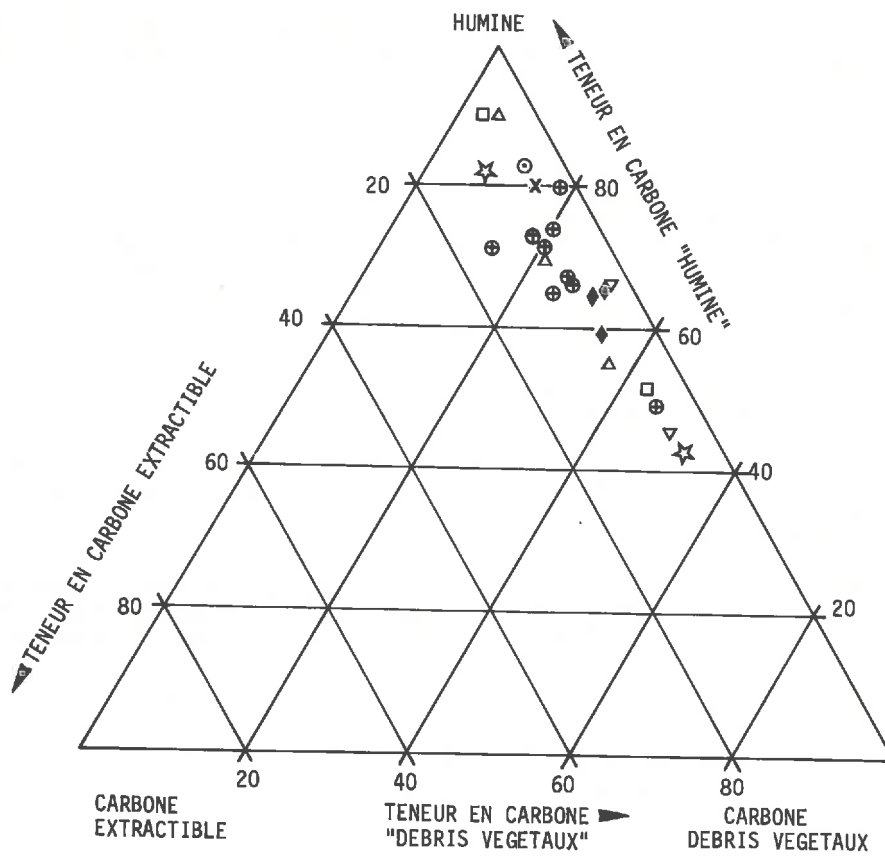


Fig. 59 - NATURE DES MATIERES ORGANIQUES DES DIFFERENTES VASES ETUDIEES

Le carbone sur chacune de ces fractions est dosé suivant la méthode d'Anne (cf § II.1.B)

b) discussion : la méthode de fractionnement et ses résultats

A la différence des schémas de fractionnement généralement proposés, la séparation densimétrique est réalisée ici après l'extraction au pyrophosphate, ceci afin de solubiliser le maximum de colloïdes humiques extractibles, précédemment fixés à la phase minérale et aux débris végétaux. L'emploi du pyrophosphate, contrairement à la soude, évite la transformation de ces derniers.

La caractérisation des colloïdes humiques dans le sol est intéressante à maints égards; elle permet :

- d'une part de déterminer un taux d'humification par le rapport  $\frac{\text{carbone humique}}{\text{carbone organique total}}$ , qui peut, dans certains cas, être un indice de l'évolution pédogénétique de ce type de sols,
- d'autre part, de préciser l'abondance relative de chacune des fractions dans un sol organique.

On distingue ainsi :

- une fraction peu évoluée constituée de débris végétaux,
- une fraction évoluée ou humique, au sein de laquelle existent des états d'évolution caractérisés par une polymérisation de plus en plus poussée (Duchaufour, 1970) et donc une plus grande stabilité,

ce sont : (figure 58)

- les acides fulviques } peu ou moyennement polymérisés
- les acides humiques }
- l'humine, en général très polymérisée et intimement liée à la phase minérale.

Nous devons noter tout d'abord que nous avons, dans la phase extractible, séparé Acides humiques (AH) et Acides fulviques (AF). Ces derniers ont été déterminés par différence entre le dosage du carbone extractible et celui des acides humiques.

Les teneurs en acides fulviques, de la plupart des vases étudiées, très basses (entre 0,020 et 0,50 %) et de plus nettement inférieures à celles des acides humiques, n'ont pu, du fait de l'incertitude sur les mesures, être utilisées comme paramètres caractéristiques dans la suite de cette étude.

Nous présentons, sous la forme d'un diagramme triangulaire (figure 59), une étude comparative de la matière organique des différentes vases étudiées avec les pôles suivants :

- % Carbone débris végétaux
- % Carbone extractible (acides fulvique et humique)
- % Carbone humine

Au vu de ce diagramme, nous pouvons faire les remarques suivantes.

Le taux de carbone extractible est relativement bas, comparé à celui de l'humine, cette dernière forme d'humus apparaît par ailleurs comme la fraction organique dominante; elle est responsable de la nature "fortement humifiée" de ces vases.

De plus, la teneur en C. Organique total étant ramenée à 100 %, la simple lecture du % de débris végétaux permet de déduire rapidement le taux d'humification TH,

$$TH \text{ en } \% = 100 - \% \text{ C.débris végétaux}$$

Nous ne devons cependant pas perdre de vue qu'il s'agit là de valeurs relatives; ainsi des vases à taux d'humification équivalents peuvent présenter des teneurs en carbone humique (en valeur absolue) totalement différentes. Aussi, lorsque nous analysons plus loin l'influence des colloïdes humiques sur le comportement mécanique des sols, nous nous référons plutôt au carbone humique total.

D - LES COLLOIDES ORGANIQUES

1. Précisions sur la nature chimique des colloïdes Humiques

Bien qu'il s'agisse de polymères complexes dont la structure est difficilement déterminable, le comportement chimique des acides humiques permet de détecter la présence de groupements fonctionnels organiques :

- carboxyle :  $\begin{matrix} \text{OH} \\ | \\ \text{C} \\ // \\ \text{O} \end{matrix}$
- hydroxyle phénolique : - O - H
- méthoxyle : O - CH<sub>3</sub>

La spectroscopie IR fournit un certain nombre d'informations sur la structure d'acides humiques, venant compléter les données chimiques (figure 60).

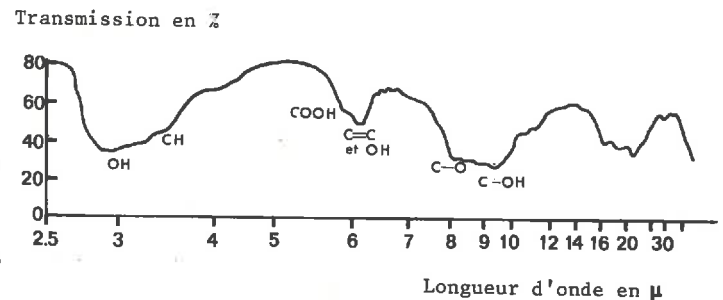


Fig. 60 - SPECTRE INFRA-ROUGE D'ACIDE HUMIQUE EXTRAIT D'UNE VASE (CUBZAC) - BANDES D'ABSORPTION CARACTERISTIQUE

La composition chimique approchée d'acides humiques extraits d'un chernozem et d'une tourbe est donnée par le tableau 20 ci-dessous (N.F. Ermolenko, 1972).

Tableau 20

Origine	C	H	N	O	C/N
Chernozem	57,32	4,25	4,02	34,90	14,25
Tourbe	61,78	4,28	1,72	32,22	35,80

## 2. L'état colloïdal

### a) les propriétés de surface des colloïdes humiques

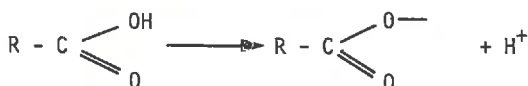
Ce sont :

- la charge superficielle,
- la capacité d'échange de cations,
- la surface spécifique.

Les groupements fonctionnels COOH et OH sont responsables du caractère acide et des phénomènes de surface des substances humiques.

#### - la charge superficielle

C.E. Millar et al, (1965) constatent que les colloïdes organiques possèdent une forte charge négative qui augmente avec le degré de décomposition. Ce déficit de charge peut être dû à la dissociation des ions hydrogènes des groupes carboxyles suivant le processus :



L'ionisation des groupements carboxyles pour des pH acides et celle des groupements phénoliques pour des pH supérieurs à 6 font que les colloïdes humiques ne passent jamais par un état isoélectrique et conservent toujours leur caractère électronégatif.

#### - la capacité d'échange de cations (C.E.C.)

Les acides humiques possèdent une C.E.C. extrêmement élevée; Guyot et al, (1973) ont mesuré la C.E.C. d'acides humiques extraits de divers sols : les valeurs obtenues varient entre 200 et 278 meq/100 g

Flaig (1970) reprenant les travaux d'auteurs russes donne la C.E.C. d'acides humiques extraits de sols tourbeux suivant le pH (tableau 21).

Tableau 21

pH	4,5	6,4	8,1
C.E.C.	170	286	400

Bünzl (1974) étudiant la cinétique d'échange d'ions dans la matière organique a aussi mis en évidence la dépendance de la C.E.C. vis-à-vis du pH.

#### - la surface spécifique

Guyot, Dejou et Lamy (1973), étudiant la rétention d'éthylène-glycol par les colloïdes humiques, ont mis l'accent sur l'importance des phénomènes de surface de la matière organique évoluée : les interactions entre molécules polaires et colloïdes sont d'autant plus importantes que le degré d'humification est élevé. Cette adsorption est favorisée par les groupements fonctionnels. Cette technique d'adsorption chimique permet ainsi d'estimer la surface spécifique totale des colloïdes organiques (tableau 22).

Tableau 22

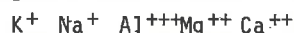
Nature des colloïdes	Acides fulviques	Acides humiques	humine
surface spécifique totale	1200 m <sup>2</sup> /g	500-300 m <sup>2</sup> /g	600 m <sup>2</sup> /g
P o l y m é r i s a t i o n →			

On note toutefois que la surface spécifique diminue avec l'état de polymérisation.

### b) Influence de la nature des cations échangeables

La nature des cations échangeables influe sur les phénomènes superficiels des colloïdes humiques :

- l'intensité de rétention de molécules polaires (éthylène-glycol), suivant le type de cation échangeable, augmente dans le sens :



Mesurée par chimisorption, la surface spécifique d'un humate calcique sera notablement plus élevée que celle d'humate sodique (Guyot et al, 1972).

- la mobilité électrophorétique  $V_e$  (et donc le potentiel ZETA  $\psi_z$ ) est très différente selon la nature du cation associé au composé humique comme le montre le tableau 23.

Tableau 23

Cation	Mobilité électrophorétique $V_e$ $\mu$ / sec/ volt/cm
$Na^+$	14,2
$Ca^{++}$	6,6

extrait de F.E. Bear, 1964

- le type de cation adsorbé est responsable du comportement de l'humate en solution.

Ainsi, les humates de  $Na^+$ ,  $NH_4^+$  sont solubles, contrairement aux humates  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Fe^{++}$ ,  $Ba^{++}$ ,  $Cu^{++}$ ,  $Al^{+++}$  qui forment des gels.

Nous verrons que toutes ces caractéristiques des colloïdes jouent un rôle essentiel dans le comportement physico-mécanique des sols.

Compte tenu de la nature fortement colloïdale qui caractérise, comme nous venons de le voir, les matières humiques, il est dès lors intéressant d'analyser les modifications de comportement physico-chimique des sols argileux en présence de tels composés.

## E - LE COMPLEXE ARGILO-HUMIQUE

Dans les sols, des associations intimes existent entre la phase argileuse et les matières humiques; l'ensemble constitue ce que les pédologues appellent le complexe argilo-humique (Pochon, 1958 - Demolon, 1960 - Duchaufour, 1960).



### 1. Les interactions colloïdales organiques-argiles

Nous allons voir comment les colloïdes humiques, qui se présentent dans le sol comme des polymères chargés négativement, se fixent à la matière minérale.

Argiles et matières humiques sont toutes les deux des particules colloïdales électronégatives ; les liaisons directes ne peuvent alors être dues qu'à la différence de polarité entre les deux colloïdes : ce sont des liaisons de type Van Der Waals. Toutefois, il ne s'agit pas là d'un mode d'interaction unique ; de nombreux auteurs se penchent sur la régulation de caractéristiques rhéologiques des boues de forages, ainsi que la récupération "assistée" des hydrocarbures, ont abordé l'étude du mécanisme d'interaction des argiles et des colloïdes organiques tels que les tannins (Gelpi et Imbert, 1958), les lignosulfonates (Siffert et Ferand, 1973).

Greenland (1971), dans une étude de synthèse, a analysé les différents mécanismes d'interaction ; nous donnons ici quelques uns des états de liaisons des colloïdes humiques avec les argiles :

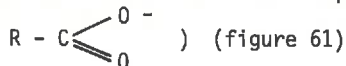
- liaisons assurées par des molécules d'eau { fixation sur les surfaces basales des argiles
- ponts cationiques { fixation sur les surfaces latérales
- liaisons par échanges d'anions { mécanisme affectant la structure
- liaisons par échanges de ligands { mécanisme affectant la structure

à cela, s'ajoutent deux autres mécanismes possibles : l'adsorption dans l'espace interfoliaire des argiles expansibles et la chélation.

La fixation dans l'interfeuille des Montmorillonites, de molécules organiques, protège ainsi ces dernières de toute influence bactérienne (Calvet et Chassin, 1973) : les bactéries ont des dimensions ne leur permettant pas d'atteindre les "vides intra-structuraux".

Greenland a, par ailleurs, mis en évidence des interactions par chélation entre colloïdes humiques et hydroxydes. Cet auteur fait remarquer que les hydroxydes offrent de nombreux sites d'adsorption pour la matière organique évoluée : il peut ainsi se produire des interactions entre molécules organiques et hydroxydes de fer ou d'aluminium par chélation, c'est-à-dire, par la réalisation de plusieurs liaisons entre un ion métallique (Fe, Al) et la molécule complexe que constitue le colloïde humique.

Nous présentons ici deux des modes d'interaction précédemment énumérés assez proches des schémas proposés par Siffert et Ferrand (1973), il s'agit d'interactions entre cristallites argileux et anions humiques : (ces derniers étant schématisés par les groupements



- l'une se faisant directement par l'intermédiaire d'un pont cationique : (A)
- l'autre faisant intervenir en plus une molécule d'eau (pont d'eau) : (B)

### 2. La capacité d'échange de cations des complexes organo-minéraux

La C.E.C. des sols organiques, en particulier les vases, est fortement influencée par la présence des matières organiques colloïdales et la propre C.E.C. de celles-ci.

La figure 62 donne la variation de la C.E.C. d'un sol en fonction des teneurs en colloïdes humiques et met en évidence le fait qu'il ne s'agit pas d'une loi linéaire : les valeurs de C.E.C. mesurées étant nettement inférieures aux valeurs calculées en supposant une additivité des capacités d'échanges de cations ; en effet, une partie des groupements fonctionnels, responsables des réactions d'échanges, se trouve mobilisée dans l'élaboration des liaisons humus-argile, ce qui réduit ainsi les sites d'adsorption.

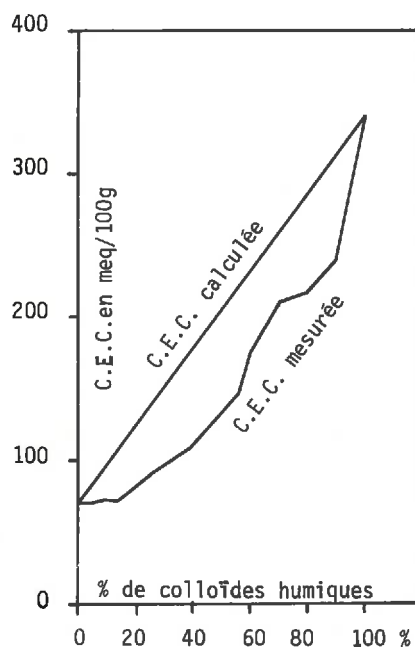


Fig.62 -Influence des colloïdes humiques sur la C.E.C. (d'après C.E. MARSHALL 1964)

### 3. La surface spécifique

Burford et al, (1964) et Guyot (1969) ont mis en évidence l'influence de la matière organique sur la détermination de la surface spécifique des sols en constatant toutefois des effets inverses suivant que la mesure porte sur la "surface totale" ou la "surface externe".

Les mesures concernant la surface B.E.T. effectuées sur les vases de Saint-André de Cubzac confirment ces résultats, à savoir une diminution de la surface spécifique avec l'augmentation de la teneur en matières organiques (figure 63).

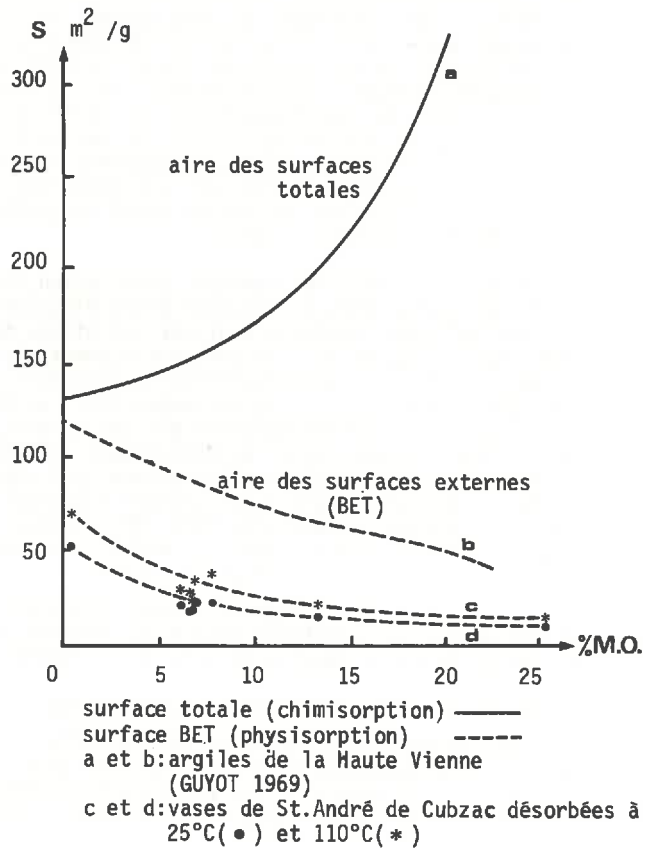
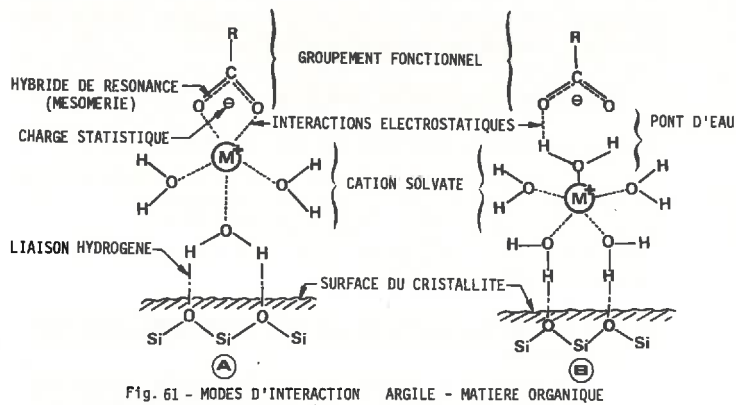


Fig. 63 - Influence du taux de matières organiques (%MO) sur la surface spécifique des sols.

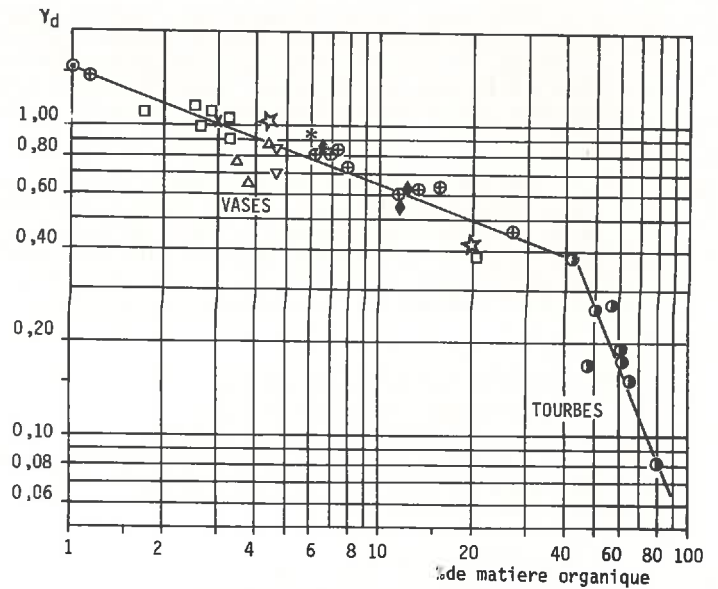


Fig. 64 - INFLUENCE DE LA MATIERE ORGANIQUE SUR LA COMPACTITE DES VASES ET DES TOURBES

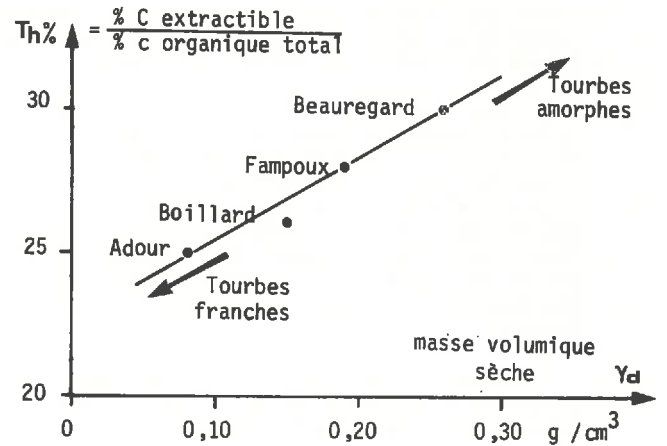


Fig. 65 - Relation entre le taux d'humification  $Th$  et la masse volumique sèche de quelques tourbes.

Comme nous l'avons suggéré plus haut, il semble que les molécules d'eau des doubles couches fortement adsorbées sur les colloïdes humiques soient difficilement éliminées par dégazage, empêchant ainsi l'adsorption des molécules non polaires selon la technique B.E.T.

quelles que soient les techniques mises en oeuvre (CEC, surface spécifique), il est clair que la présence de colloïdes humiques est la cause de modifications importantes des propriétés interfaciales des argiles; nous allons voir maintenant quels sont les effets de ces modifications sur le comportement mécanique.

#### F - LE RÔLE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES SOLS

La matière organique, selon son état d'évolution, exerce des actions très différentes sur le comportement mécanique des sols.

##### 1. La matière organique peu évoluée

Le rôle de la matière organique peu humifiée est essentiellement un rôle textural (cf chapitre Texture).

- lorsqu'elle est présente en faibles teneurs dans les sols (quelques pourcents), elle crée par l'agencement de ses fibres végétales des discontinuités texturales (litages) qui sont, en partie, à l'origine de l'anisotropie des vases,

- lorsqu'elle est abondante dans les sols, la matière organique fraîche a une texture spécifique susceptible de retenir beaucoup d'eau et douée d'une très grande déformabilité (texture spongieuse).

Nous savons, en effet, qu'une certaine relation apparaît entre la teneur en eau naturelle d'un sol et sa teneur globale en matière organique, or nous avons vu (cf § III 2b) qu'entre l'indice de compression et la teneur en eau, il existait pour les tourbes une loi du type :  $C_c = W/100$ . La trame végétale est responsable, non seulement de l'importante compressibilité mais aussi, par l'enchevêtrement des fibres, des taux de cisaillement relativement élevés des tourbes.

Il nous a été possible de cerner avec plus de précision l'influence de la M.O. sur la compacité des vases et des tourbes par la relation:

$$\log \gamma_d = f(\log M.O.) \text{ figure 64}$$

Cette compacité est, de plus, liée au degré d'humification, comme le montre la figure 65.

Cette relation traduit en quelque sorte une diminution de la compressibilité des tourbes avec l'humification, et la tendance de ces dernières vers un état amorphe. Toutefois, la présence de colloïdes minéraux, au sein de la masse tourbeuse, n'est pas étrangère à cet état (tourbes argileuses).

Ceci rejoint les constatations de Perrin (1974) et la corrélation entre l'indice de compression  $C_c$  et le rapport carbone/azote signalée par Ottmann et Al, (1970). Ce rapport (C/N), nous l'avons vu, pouvant être un indice d'humification des tourbes. Toutefois, la généralisation d'une telle relation est délicate car le rapport C/N dépend d'un grand nombre de

facteurs : nature de la matière organique, taux d'humification, degré de minéralisation.

##### 2. La matière organique humifiée

###### a) Les colloïdes humiques et les conditions de milieu

Les colloïdes organiques et plus précisément leurs groupements fonctionnels, sont responsables de l'acidité du milieu (cf §II, relation pH-% M.O.). Ils contrôlent donc en grande partie la stabilité des complexes argilo-humiques.

###### b) Les colloïdes humiques et les propriétés physico-texturales

Il semble que, selon le type d'argile, l'action des colloïdes organiques soit totalement différente:

- l'addition des colloïdes humiques accroît la thixotropie de la kaolinite. Inversement, en présence de tels colloïdes, la montmorillonite sodique voit sa thixotropie diminuer. Dans ce dernier cas, le mécanisme qui régit le comportement physico-textural est à rapprocher de l'action des tanins sur les boues de forage (Gelpi et Impert, 1958); en saturant les liaisons de la montmorillonite brisées par agitation, les colloïdes organiques empêchent ainsi le système de retrouver sa texture initiale.

- la présence de matières humiques peut, selon Rivière et Vernhet (1951) être à l'origine d'une floculation différentielle des minéraux argileux en milieu marin. Ainsi, dans l'eau de mer, en présence d'humate de sodium, l'illite et la montmorillonite flocculent, alors que la kaolinite reste en suspension. Les phénomènes constatés expérimentalement par ces auteurs sont en fait la conséquence du déplacement du point isoélectrique du complexe argilo-humique, par rapport à celui de l'argile seule : les charges négatives d'origine humique (groupements COOH, OH) viennent compenser l'inversion de signe (potentiel zeta positif) des particules argileuses en milieu salin.

Par le biais des processus électrochimiques, la matière organique colloïdale peut donc conditionner le mode de dépôt et donc la texture des sédiments.

###### c) Les colloïdes humiques et la plasticité des sols

Afin de montrer l'influence des colloïdes humiques sur la plasticité, nous citerons deux types de résultats : l'un relatif à des essais sur des mélanges artificiels, l'autre concernant les sols organiques étudiés:

###### - mélanges artificiels

en ajoutant à une montmorillonite sodique et à un kaolin des proportions croissantes d'humates sodiques, nous constatons, pour les mélanges ainsi réalisés, une chute importante de la limite de liquidité  $W_L$  qui s'accompagne d'une réduction du domaine plastique IP en fonction des teneurs en colloïdes humiques (tableau 24).

Si ces mêmes essais sont réalisés sur des mélanges de montmorillonite calcique (de camp Berteau) et d'humate calcique (humate électrolytisé et saturé en calcium), les relations, bien que moins nettes, s'inversent et montrent une augmentation de la limite de liquidité  $W_L$  au delà de 3 % d'humate.

Le comportement opposé de ces deux mélanges est certainement dû aux différences de caractéristiques

TABLEAU 24

HUMATE Na	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>
0 %	541	53	488
1 %	453	53	400
3 %	408	54	354
5 %	377	55	322
10 %	354	55	289

- BENTONITE -

HUMATE Na	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>
0 %	73	40	33
1 %	53	35	18
3 %	51	37	14
5 %	51	37	14
10 %	51	34	17

- KAOLINITE -

HUMATE Ca	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>
0 %	142	55	87
1 %	140	65	75
3 %	138	64	74
5 %	155	65	90

- MONTMORILLONITE CALCIQUE -  
(Camp Berteau)

MELANGES HUMATES-ARGILES : Influence du taux et de la nature des humates sur les limites d'Atterberg.

TABLEAU 25

	I		II	
	Brest P6	Charente APS 3	Cubzac Ao2	Adour APS 6 4.40m
Plasticité I <sub>p</sub>	39	41	97	119
Granularité % < 2 μ / < 0,2 μ	17/5	49/30	62,5/35	45/20
Minéralogie dominante	Illite Kaolinite	Montmorillonite Illite	Montmorillonite Illite	Illite Kaolinite
% matières organiques	3,0	1,7	26,5	19,7
Taux d'humification (= $\frac{\text{matières humiques}}{\text{M.O. totales}} \times 100$ )	85 %	70 %	75 %	94 %
Dénomination	vase moyennement organique	vase faiblement organique	argile tourbeuse	vase fortement organique très humifiée

physico-chimiques des humates calciques et sodiques signalées auparavant; l'humate Na associé aux argiles perd son caractère hydrophile.

Nous devons toutefois être très réservés quant à l'interprétation de ces données et leur transposition aux sols. Les sols organiques n'étant pas des juxtapositions d'humus et d'argiles, mais au contraire des associations complexes dont nous avons analysé les interactions plus haut; le facteur temps et le vieillissement des complexes argilo-humiques sont également des caractéristiques dont il faudrait tenir compte (la flore microbienne et la fermentation qu'elle provoque accroissent les propriétés plastiques des sols (Navarro, 1964).

- sols organiques naturels

La limite de liquidité  $W_L$  des vases que nous avons étudiées est fortement influencée par la présence de composés humiques, comme le montre la figure 66. L'accroissement de  $W_L$  en fonction de la teneur en colloïdes organiques correspond à une augmentation de l'eau liée (développement de l'eau colloïdale des doubles couches) au détriment de l'eau interstitielle ou eau libre.

L'examen du graphique montre l'existence d'un seuil (vers 2 %) en deçà duquel l'incidence de la granularité et de la minéralogie se fait sentir.

En fait, comme le montre la relation entre plasticité, % C. humique et faciès granulométriques (figure 67), l'apparente dispersion des points pour de faibles teneurs en matières humiques est liée à une variation plus rapide de la plasticité des sols les moins argileux.

Il semble donc que l'activité des colloïdes organiques  $\frac{I_p}{\text{colloïdes organiques}}$  soit d'autant plus forte que la phase minérale est plus pauvre en colloïdes inorganiques.

Deux références bibliographiques, bien qu'elles concernent la matière organique totale, nous permettent de confirmer nos résultats.

Il ressort de l'analyse des tableaux de valeurs dressés par Arman (1970) que l'accroissement de plasticité, pour une même augmentation des teneurs en M.O., augmente avec la granularité.

De plus, les travaux de Remy (1971) aboutissent à des conclusions analogues aux nôtres : l'intensité d'action de la M.O. sur la plasticité (exprimée par la dérivée partielle  $\frac{\delta I_p}{\delta M.O.}$ ) diminue lorsque la teneur en argile croît.

Pour illustrer ce que nous venons d'exposer, nous présentons dans le tableau 25, une analyse comparée de quatre vases que nous regroupons suivant leur plasticité en deux catégories

Malgré une plasticité comparable à celle de la vase de la vallée de la Charente, la vase de Brest possède des caractéristiques sédimentologiques nettement moins défavorables, seules la teneur et la nature des matières organiques expliquent cette plasticité.

De même, si l'on compare la vase de Cubzac et celle de la vallée de l'Adour, nous constatons que cette dernière, bien que dépourvue de montmorillonite, présente une plasticité anormalement élevée, attribuable à la nature très humifiée des matières organiques qu'elle renferme.

Nous avons positionné sur l'abaque de Casagrande (figure 68) le domaine de plasticité des Tourbes, défini par divers auteurs : Casagrande (1966) in Mac Farlane (1969) - Cooling, Skempton et Glossop in Schön (1965) et Perrin (1974).

Nous avons de plus placé sur ce diagramme :

- les différents mélanges réalisés,
- trois échantillons étudiés parmi les plus organiques.

Nous pouvons faire les constatations suivantes :

1) l'adjonction d'humate de sodium à une montmorillonite réduit considérablement  $I_p$  et  $W_L$ . Le chemin d'évolution, tout en se rapprochant de la ligne A, suit la droite des Bentonites définie par Casagrande (1943).

Pour expliquer ce phénomène, nous pouvons invoquer une mobilisation des sites d'adsorption de la montmorillonite par les colloïdes humiques, réduisant ainsi le nombre de sites susceptibles de fixer des molécules d'eau.

2) pour les sols organiques étudiés, les vases tourbeuses, moyennement humifiées, s'écartent de la ligne A contrairement aux vases très fortement humifiées, et se rapprochent ainsi du domaine des tourbes fibreuses.

d) les colloïdes humiques et la résistance au cisaillement

- les données bibliographiques :

Les travaux de Arman (1970) sur des mélanges de sols et de matières organiques (figure 69), montrent que le fait d'ajouter des matières organiques à un sol initialement peu cohésif et frottant, entraîne une augmentation de la cohésion et simultanément une chute de l'angle de frottement, celui-ci passant de  $10^\circ$  pour 10 % de M.O. à  $0^\circ$  pour 40 % de M.O.

Usseimann (1971), dans une étude sur les formations superficielles des versants, a pu mettre en évidence une corrélation négative assez significative entre l'angle de frottement interne et la teneur en matières organiques humifiées.

Les propriétés colloïdales des matières humiques sont à l'origine de l'action cohésive qui s'exerce entre particules, mais en même temps du rôle de lubrifiant analogue à celui des montmorillonites qui tend à annuler le frottement intergranulaire et à conférer ainsi à un sol pulvérulent un comportement de sol fin.

Blondeau et Pilot (1971) ont montré que les fortes valeurs de plasticité font chuter l'angle de frottement résiduel  $\Phi_{res}$ . Nous pouvons alors nous attendre à ce que des argiles silteuses très humifères et donc très plastiques aient un comportement d'argile colloïdale avec des caractéristiques résiduelles extrêmement faibles.

Enfin, notons que les valeurs élevées de sensibilité constatées pour les sols riches en colloïdes



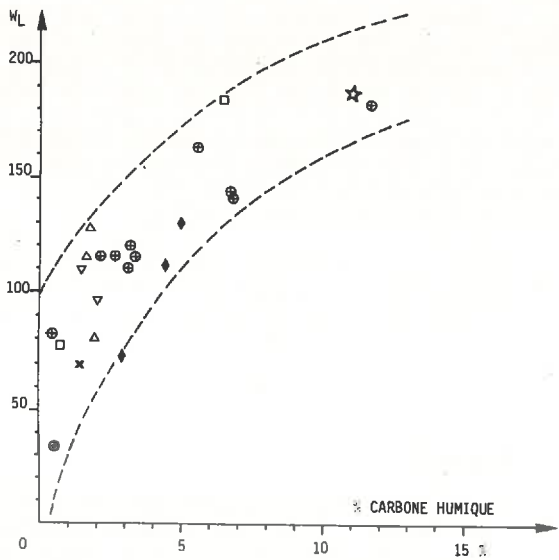


Fig. 66 - Relation entre la limite de liquidité et la teneur en carbone humique.

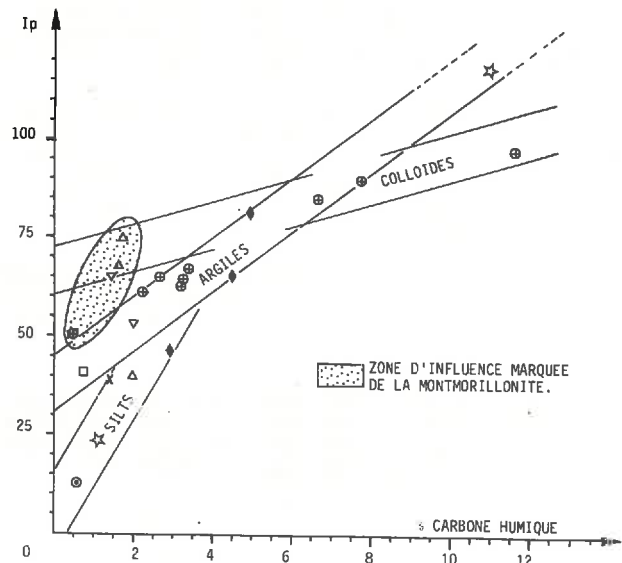


Fig. 67 - Relation plasticité. % carbone humique total et faciès granulométriques.

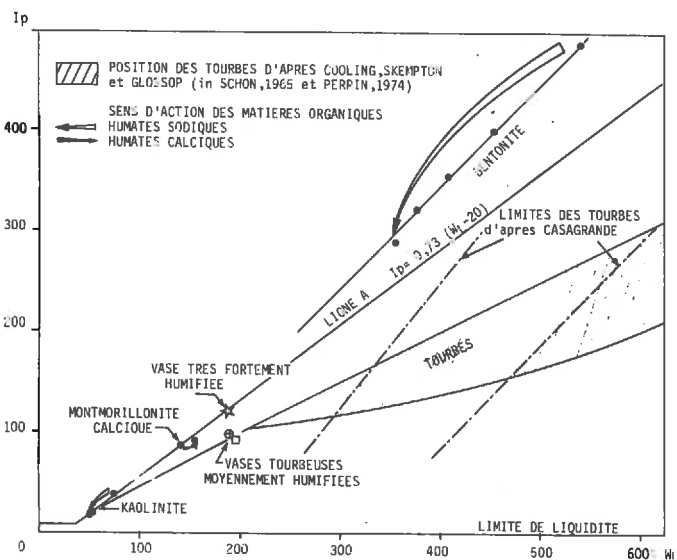


Fig. 68 - Diagramme de plasticité des sols fortement organiques.

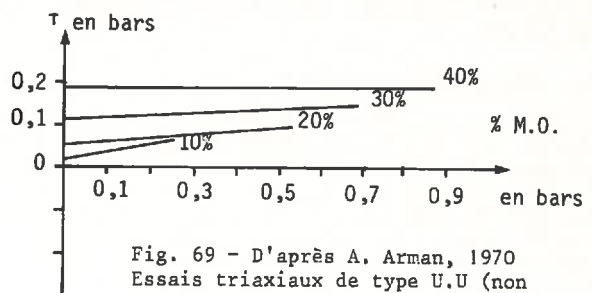


Fig. 69 - D'après A. Arman, 1970  
Essais triaxiaux de type U.U (non consolidés non drainés) enveloppes des cercles de Mohr pour divers % de M.O.

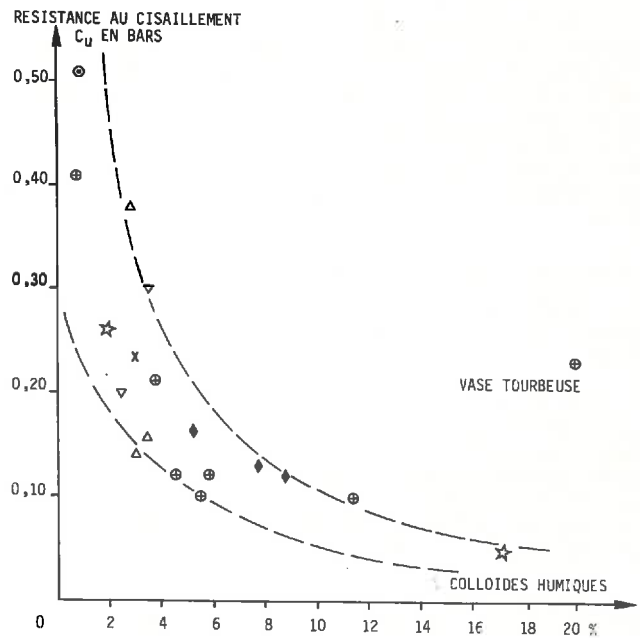


Fig. 70 - Relation : résistance au cisaillement - teneur en colloïdes humiques.

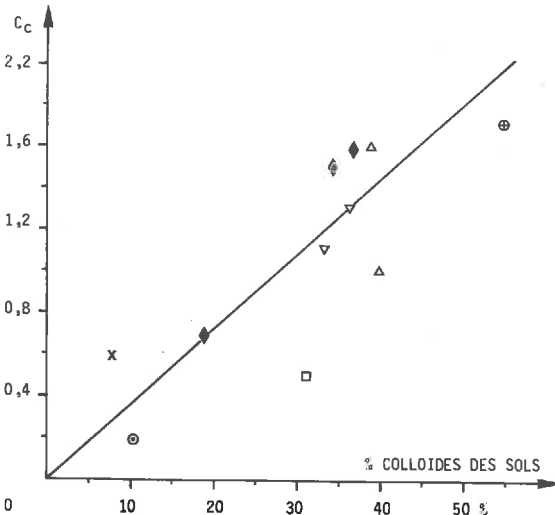


Fig. 71 - Influence des colloïdes minéraux et organiques sur la compressibilité des vases.

humiques (Pusch, 1973 b), trouvent une explication dans la faible cohésion remaniée de ces sols, ainsi que l'action cémentante des substances humiques (§ III B.2b).

- les sols organiques étudiés :

Bien que des vases à tendance tourbeuse puissent présenter des taux de cisaillement anormalement élevés (frottement des fibres végétales), l'influence des colloïdes humiques sur les sols étudiés se manifeste d'une manière générale par une chute de la résistance au cisaillement : les valeurs de cohésion non drainée  $C_u$  variant depuis 0,40 bars pour moins de 1 % de colloïdes humiques jusqu'à 0,05 bars pour 18 % de colloïdes (figure 70)

Ce fait, en première analyse, semble contredire les conclusions tirées des données bibliographiques précédentes.

Ces résultats expriment en réalité la relation existant entre la cohésion non drainée  $C_u$  et la teneur en eau. On sait (cf fig.12) que la cohésion apparente d'un sol est d'autant plus faible que la teneur en eau est plus forte. Or, il s'avère que les sols à forte teneur en colloïdes humiques sont aussi les sols pour lesquels la teneur en eau est voisine de la limite de liquidité; ce sont donc des sols très peu consistants.

e) les colloïdes et la compressibilité

Nous avons vu que la compressibilité était étroitement liée à la texture (cf § texture, corrélation  $C_c$ -e).

De plus, la mise en évidence par Skempton d'une corrélation entre l'indice de compression  $C_c$  et la teneur en argile granulométrique et le fait que  $C_c$  suive approximativement une loi (Terzaghi) du type  $C_c = 0,009 (WL-10)$  nous ont conduit à rechercher le rôle des colloïdes (minéraux et organiques) dans la compressibilité (figure 71).

On sait que les colloïdes, de par leurs propriétés de surface, adsorbent d'importantes quantités

d'eau. Or, nous avons vu que, dans le cas des vases étudiées, la relation  $e = W. Y_s/100$  pouvait s'appliquer. L'indice des vides intègre donc les volumes occupés à la fois par l'eau libre et l'eau colloïdale.

Lors de l'application de la charge, l'expulsion de l'eau libre peut se trouver freinée par une certaine viscosité de l'eau adsorbée qui a ainsi un effet retardateur sur la consolidation.

Bien que l'on ait affaire à des sols potentiellement compressibles, le comportement visqueux des doubles couches entraînera conséquemment une augmentation considérable des temps de tassement.

#### IV.3. CONCLUSIONS

Au terme de ce chapitre, concernant la physico-chimie, nous voyons que les matières organiques, lorsqu'elles se présentent dans le sol à l'état colloïdal, ont un comportement qui tend à s'apparenter à celui de la montmorillonite.

Toutefois, l'activité superficielle qu'elles induisent est d'autant plus forte que les matériaux sont plus pauvres en colloïdes minéraux.

Nous pouvons alors parler non seulement d'une complémentarité d'action des matières organiques colloïdales vis-à-vis des argiles montmorillonitiques, mais aussi d'un effet régulateur que ces matières organiques tendent à exercer sur l'activité superficielle des vases.

La nocivité des colloïdes humiques sur le comportement géotechnique des sols rend donc impératif l'identification des composés évolués de la M.O. et leur quantification.

Pour conclure cette étude, nous résumons, sous forme d'un tableau synoptique, l'action spécifique des divers composants des sols organiques sur leurs caractéristiques géotechniques. (Tableau 26).

TABLEAU 26

Caractéristiques Composants	Propriétés Physiques		Surface Spécifique		Propriétés électrochimiques		Limites Atterberg		Compressibilité $C_c$
	W	$\gamma_d$	$S_{Bet}$	$S_{totale}$	pH	CEC	$W_L$	$I_p$	
Carbonates	↘	↗	↘	↘	↗	↘	↘	↘	↘
Sables	↘	↗	↘	↘	→	↘	↘	↘	↘
Silts	↘	↗	↘	↘	→	↘	↘	↘	↘
Argiles *			110	110	7	30	60	30	08
Colloïdes	↗	↘	↗	↗		↗	↗	↗	↗
Colloïdes Humiques	↗	↘	↘	↗	↘	↗	↗	↗	↗
Fibres végétales	↗	↘	↘	↘	↘		↗		↗

\* à titre de référence, nous citons les données d'une argile illitique (valeurs moyennes)

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

### LES OBJECTIFS FIXES

Nous nous sommes proposés d'aborder l'étude du comportement géotechnique des sols organiques sous l'angle physico-chimique avec un double objectif :

- acquérir une plus grande maîtrise du comportement mécanique de ces types de sols,
- établir des corrélations entre paramètres d'essais longs et coûteux et caractéristiques facilement déterminables.

### LES MOYENS MIS EN OEUVRE

Les techniques d'études que nous avons utilisées et adaptées aux problèmes posés font appel à la fois à la sédimentologie, la chimie, la microscopie et la physico-chimie.

Notons tout d'abord que le terme physico-chimie a été employé non seulement dans son sens restrictif (s.s), d'étude des phénomènes électriques superficiels, mais aussi dans le sens plus large de "physico-chimie des sols" (s.l.), regroupant alors les caractéristiques aussi bien physico-chimiques (s.s) que sédimentologiques et texturales.

Les seules techniques sédimentologiques fournissent des renseignements dont l'exploitation dans le domaine de la mécanique des sols organiques ne s'avère pas immédiate; nous précisons cependant que l'interprétation sédimentologique permet d'expliquer la mise en place de ces sols et de replacer ainsi ces derniers dans leur contexte géologique.

La très grande variabilité des paramètres géotechniques trouve une explication grâce à l'étude conjuguée des caractéristiques sédimentologiques, texturales et physico-chimiques.

Nous avons schématisé à la figure 72 les interdépendances existant entre les divers pôles d'intérêts qui motivent ce travail et l'influence respective de ces derniers sur le comportement mécanique.

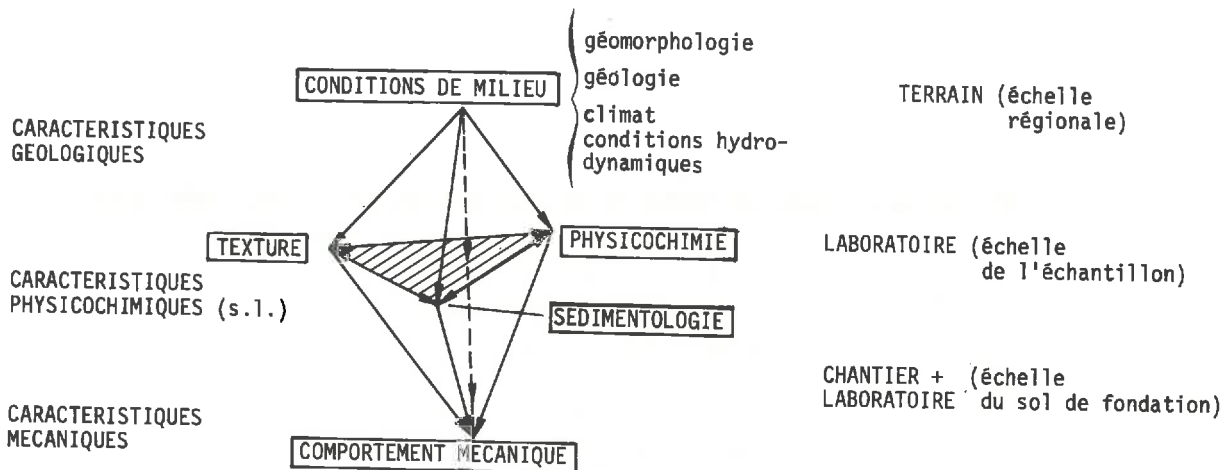


Fig. 72 - CARACTERISTIQUES MISES EN EVIDENCE DANS CETTE ETUDE. INTERDEPENDANCES ET INFLUENCE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES SOLS

Le contexte géologique, géomorphologique, hydrologique et climatique constitue les conditions de milieu; ces caractéristiques que l'on peut appeler régionales, influent directement sur le comportement mécanique des sols (érosion, sédimentation, dessiccation, compaction dû au poids des terres ...), mais c'est aussi par l'intermédiaire des phénomènes physico-chimiques (s.l) que se font sentir ces conditions de milieu. La minéralogie et la granularité influent sur les processus électrocinétiques des sols; ces derniers sont surtout la manifestation des "phénomènes superficiels" des colloïdes minéraux et organiques que renferment les sols. De ces caractères sédimentologiques et physico-chimiques, en définissant un état textural (ou mode d'arrangement) conditionnent les propriétés mécaniques des sédiments.

### LES RESULTATS ACQUIS

Il nous est permis de dégager ici des conclusions intéressantes :

En premier lieu, cette étude vient confirmer et surtout compléter la définition initialement énoncée (cf. § Introduction, objet de l'étude) du comportement de la vase. Les données analytiques appuyées sur un certain nombre d'observations au M.E.B., fournissent une identité détaillée des sols organiques.

Ces sols, qui sont le siège d'une intense activité biologique, comprennent deux phases :

1) une phase solide constituée :

- d'une fraction minérale silicatée, qui peut varier sur le plan granulométrique, depuis les sables jusqu'aux colloïdes, et à laquelle sont associés des carbonates et des sulfures de fer.

- d'une fraction organique, elle-même composée d'éléments figurés (débris végétaux, tests de micro-organismes) et de colloïdes (M.O. transformées); cette fraction est responsable des fortes teneurs en eau interstitielle ou colloïdale suivant l'état d'évolution des matières organiques qu'elle renferme.

2) une phase fluide constituée :

- de gaz, issus de la décomposition de produits organiques ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ) et pouvant être un élément perturbateur lors de l'interprétation de caractéristiques de tassements,

- d'eau, dont nous avons pu définir, sur des critères à la fois texturaux et physico-chimiques, deux types :

. une eau interstitielle ou eau libre qui est expulsée dès la mise en charge du sol,

. une eau colloïdale ou eau adsorbée, qui conditionne les propriétés plastiques des matériaux.

Le deuxième enseignement que nous tirerons de cette étude concerne les interdépendances mises en évidence entre les paramètres géotechniques et les caractéristiques physico-chimiques au sens large, des sols organiques. Deux points méritent alors d'être retenus :

1) cette étude met l'accent sur la nécessité de procéder à l'analyse microtexturale et physico-chimique des sols organiques.

Nous avons pu mettre en évidence l'influence nocive sur le comportement géotechnique des sols, de la matière organique évoluée (colloïdes humiques) dont l'intensité d'action est d'autant plus forte que le sédiment est plus pauvre en colloïdes minéraux. Cette étude conduit à adopter une grande prudence lors de l'identification des sols : au même titre que la Montmorillonite, il est impératif de détecter l'existence de M.O. humifiée.

2) l'établissement de corrélations entre caractéristiques de compressibilité  $C_c$ ,  $C_c$ , et paramètres

d'origine texturale  $e$ ,  $W$ ,  $\gamma$ ,  $d$ , présentant un degré de fiabilité relativement élevé, permet d'envisager leur utilisation dans l'évaluation des tassements, de réduire ainsi notablement le nombre des essais

et par là même le coût des études d'un site compressible.

#### LA DIRECTION DANS LAQUELLE DOIT ETRE POURSUIVIE LA RECHERCHE.

Il serait présentement illusoire de vouloir définir le comportement géotechnique d'un sol par la seule connaissance de ses caractéristiques physico-chimiques (s.l.).

Toutefois, appliquées avec discernement, les données acquises par les méthodes employées ici, ouvrent la voie à une meilleure approche de la mécanique des sols organiques.

Enfin, bien que d'énormes lacunes subsistent, ne serait-ce que sur la nature exacte des mécanismes d'interactions qui sont à l'origine du complexe argilo-humique, nous pensons avoir montré l'intérêt d'une connaissance plus approfondie des manifestations physico-chimiques qui se produisent à la surface des colloïdes et de la poursuite des études dans cette direction.

Ainsi, il serait souhaitable que les recherches soient orientées vers une application à l'étude des sols, des techniques de mesure de surface par chimisorption, et de différenciation eau libre- eau liée (ex. analyse thermique, résonance magnétique nucléaire); mais nous pensons que, dès maintenant, doit être systématiquement développée la caractérisation physico-chimique (s.l.) des sols de fondation : teneur et nature de composants (analyse minérale et organique), granularité, surface spécifique, volume poreux.

A partir de telles données stockées en mémoire, nous pourrions alors envisager, dans un deuxième temps, l'estimation automatique de la valeur mécanique d'un site.



#### Liste des principaux symboles et abréviations utilisés et leur signification

Caractéristiques géotechniques	{	W	teneur en eau naturelle en %	} en $\text{g}/\text{cm}^3$
		$\gamma$ (ou $\gamma_h$ )	Masse volumique apparente humide	
		$\gamma_d$	Masse volumique apparente sèche	
		$\gamma_s$	Masse volumique réelle	} limites d'Atterberg en %
		$W_L$	Limite de liquidité	
		$W_p$	Limite de plasticité	
		$I_p$	Indice de plasticité ( $I_p = W_L - W_p$ )	
$I_c/I_L$	Indice de consistance et Indice de liquidité ( $I_c + I_L = 1$ )			

Caractéristiques mécaniques	$C_u$	Cohésion non drainée ou apparente en bars		
	$C_{cu}$		} caractéristiques de cisaillement (essai consolidé non drainé : CU)	
	$\Phi_{cu}$			
	$C'$	Cohésion (bars)	} caractéristiques intergranulaires	
	$\Phi'$	Angle de frottement (degrés)		
	$C_c$	Indice de compression		
	$e$ (ou $e_0$ )	Indice des vides du sol à l'état initial		
	$\frac{C_c}{1+e_0}$	Rapport de compression		
	$\sigma'_c$	Pression de préconsolidation en bars		
	$\sigma'_0$	Pression effective initiale en bars		
ATD	Analyse thermique différentielle			
Caractéristiques sédimentologiques	R X	Diffraction de rayons X		
	M	Montmorillonite (du groupe des smectites)	} principales argiles rencontrées. Leur teneur est exprimée en pourcentage de la fraction silicatée inférieure à 2 microns.	
	ChL.	Chlorite		
	I	Illite		
	K	Kaolinite		
	$d_{2\mu}$	Classe granulaire inférieure à 2 microns en % (argile granulométrique)		
	$M_e$	Médiane granulométrique		
	$QD_a$	Indice granulométrique (écart semi-interquartil arithmétique)		
	$n$	Indice d'évolution de A. Rivière $n = N-1$ (N : indice d'évolution intégré)		
	$\frac{d_{0,2\mu}}{d_{2\mu}}$	Pourcentage relatif de colloïdes granulométriques		
M.E.B.	Microscopie électronique à balayage			
Caractéristiques texturales	$e$	Indice des vides (cf. caractéristiques mécaniques)		
	B.E.T.	Technique d'adsorption physique mise au point par Brunauer, Emmet et Teller (mesure de surface spécifique = SBET)		
	pH	Potentiel d'hydrogène (acidité) $pH = -\log(H^+)$		
	Eh	Potentiel d'oxydo-réduction en V		
	Ve	Mobilité électrophorétique en $\mu$ sec/volt/cm		
	$\Psi_z$	Potentiel électrophorétique (Zéta) en mV		
	C.E.C.	Capacité d'échange de cations en m.e.q./100 g d'échantillon		
	C.M.B.	Capacité maximale d'adsorption du bleu de méthylène (chimisorption en m.e.q./100 g)		
	$A_c$	Coefficient d'activité superficielle de Skempton $A_c = I_{p+} / <2\mu$ ( $<2\mu$ : % d'argile (cf. identification géotechnique))		
	S	Surface spécifique totale (chimisorption) en $m^2/g$		
Caractéristiques physico-chimiques (S.S.)	m.e.q = milli-equivalent	1 equivalent = $\frac{\text{masse atomique}}{\text{valence}}$		
	C	Carbone organique	} teneur des éléments en % du poids sec de l'échantillon	
	N	Azote organique		
	M.O.	matières Organiques en % (= 1.724 x C%)		
	AH	Acide humique	} carbone humique extractible en % % colloïdes humiques = 1.724 x % C. humique (étudiés sous l'angle physico-chimique)	
	AF	Acide Fulvique		
	$CaCO_3$	Carbonate de calcium en %		
	Caractéristiques chimiques			



## BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN G.P., KLINGEBIEL A., VIGNEAUX M. - Modalités de répartition des suspensions issues de l'estuaire de la Gironde sur le plateau continental atlantique. C.R. Académie des Sciences. t.273 (8 décembre 1971)
- ALLEN G.P., BONNEFILLE R., COURTOIS G. et MIGNIOT Cl. - Processus de sédimentation des vases dans l'estuaire de la Gironde. La Houille Blanche n° 1/2 - (1974)
- AMAR S. - Essais de Laboratoire et en place de mécanique des sols - L.C.P.C. Note d'information technique - (juin 1973)
- ARMAN ARA - Engineering classification of organic soils - Highway Research Record n° 310 (1970)
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE - Standard procedure for testing drilling fluids. API RP 13 B Recommended Practice - Washington - fifth edition - (February 1974)  
Utilisation du bleu de méthylène pour la mesure de la capacité d'échange de cation.
- ASSOCIATION FRANCAISE de NORMALISATION - Projet de Norme. Détermination de l'aire massique de poudre par adsorption gazeuse. Méthode B.E.T. - Document d'étude - (janvier 1975)
- ASSOR Richard - Interprétation paléogéographique des terrains sédimentaires de la presqu'île du Médoc (zone du Verdon) - Son intérêt dans le cadre d'une étude géotechnique, Bordeaux, Thèse de Doctorat de spécialité - (Décembre 1972)
- BARBAROUX L. et OTTMANN F. - Contributions à l'étude statistique de quelques propriétés physiques des sédiments estuariens et marins. C.R. Académie des Sciences - PARIS t 275 - (11 septembre 1971)
- BARBAROUX L., BOURON-BOUGE A., GOULEAU D. et OTTMANN F. - Utilisation de la radiographie, de la gammadensimétrie et du microscope électronique à balayage pour l'étude des sédiments marins Intérêt pour la géologie de l'ingénieur. Bulletin de l'IAEG Géologie de l'Ingénieur n° 6 - Décembre 1972 -
- BARDEN L. - The influence of structure on deformation and failure in clay soil. Géotechnique XXII n° 1 p. 159 (mars 1972)
- BEAR FIRMAN Editor - Chemistry of the soil. Reinhold Publishing Corporation, New-York, 2° Ed. (1964)
- BERRY P.L. et POSKITT T.J. - The consolidation of peat. Géotechnique 22 n° 1 - (1972)
- BERTHOIS L. - Les variations de la composition minéralogique des vases. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, séance du 11 juillet 1955 -
- BESNIER G. - L'aménagement de la Vilaine et le barrage d'ARZAL. Revue TRAVAUX
- BIAREZ J. - Généralités sur les propriétés mécaniques des sols, nouveaux appareils de mesures - Petites digues sur vases. Communication présentée au Comité Technique de la Société Hydro-technique de France le 22 mars 1968. La Houille Blanche n° 7 (1968)
- BLONDEAU F. et PILOT G. - Résistance au cisaillement résiduelle des sols argileux en France. Communication des journées nationales du Comité Français de Mécanique des Sols et des Fondations. Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, n° spécial (juin 1972)
- BOCHKO Regina. - Types of microtextural elements and microporosity in clays. Proc. Int. symp. Soil struct. p. 97 à 101. Gothemburg (1973) s.l. s.d.
- BONNEFOND Guy. - Géotechnique et géologie comparées des formations semi-superficielles de la basse Garonne entre Bordeaux et le Bec d'Ambès. Bordeaux, Thèse de Doctorat 3° cycle - (mai 1961)
- BOTTERO A. - Etude des propriétés mécaniques des matériaux argileux en fonction de leurs propriétés physico-chimiques. Thèse de Doctorat de spécialité, Grenoble, (Février 1971)
- BOURCART J. et FRANCIS-BOEUF Cl. - La vase. Actualités scientifiques et industrielles - Sédiments et sédimentation. Hermann ed. (1942)

- BOURGES F. - Remblais sur sols compressibles. Synthèse de recherches effectuées dans les Laboratoires des Ponts et Chaussées. Rapport de recherche n° 10 - (octobre 1970)
- BOURGES F., CARISSAN M., MIEUSSENS C. - Etude et construction des remblais sur vase. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 49 - (Déc. 1970)
- BOURGES F., PAUTE J.L., MIEUSSENS C., LEROUX A. - Généralités sur les remblais et les sols de fondation. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées spécial T, remblais sur sols compressibles - (Mai 1973)
- BOUTRY J.C. - Etude de la tourbe dans la vallée de la Haine. Mémoire de fin d'étude, IRAM Institut Reine Astrid, MONS - (1971-1972)
- BOYE M., MOULINE M., PRATVIEL L., VIGUIER C. - Relations entre la forme des cours inférieurs de la Garonne et de la Dordogne et les topographies souterraines des terrains tertiaires. Revue de géomorphologie dynamique, tome XVIII.
- BULLER A.T., Mc MANUS J. - Simple metric sedimentary statistics used to recognize different environments. Sedimentology vol. 18 n° 1/2 (mars 1972)
- BUNZL K. - Kinetics of ion exchange in soil organic matter (II<sup>o</sup> part.). Journal of soil Science vol. 25 n° 3 - (1974)
- BURFORD J.R., DESPHANDE T.L., GREENLAND J., QUIRK J.P. - Influence of organic materials on the determination of the specific surface. Areas of soils. Journal of soil Science vol. 15 n° 2 (1964)
- CALES H. - Mécanique des vases appliquée à la stabilité des ouvrages. Réalisation de digues et d'ouvrages d'art à bouin et à l'aiguillon. La Houille Blanche n° spécial 7 - (1968)
- CALVET R., CHASSIN P. - Complexes organiques des argiles : mécanismes de formation, méthodes d'études et applications. Bulletin du groupe français des Argiles, tome XXV, fasc. 2 (1973)
- CHAMLEY H. - Considérations sur la sédimentologie des estuaires. La Houille Blanche n° 1/2 (1974)
- CHASSEFIERE B., MONACO A. - Relations entre sédimentogenèse et propriétés mécaniques et minéralogiques. Application au détroit sicilo-tunisien. C.R. Académie des Sciences, Paris t. 277 (9 juillet 1973)
- CHRISTMAN R.F., OGLESBY R.T. - Microbiological degradation and the formation of humus in lignins.
- CITTANOVA J.P. - Physico-chimie appliquée aux argiles : contribution à l'étude de leurs propriétés mécaniques. Thèse de docteur ingénieur, Grenoble -(juin 1970)
- COLLINS K., Mc GOWN - The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. Géotechnique 24 n° 2, p. 223-254 - (1974)
- DASCAL O., LAROCQUE G.S. - Caractéristiques de compressibilité des argiles du complexe Nottaway-Broadback-Rupert (Baie James). Can. Geotech. Journal 10, 41 - (1973)
- DEBAILLE G., GHISTE S. - Influence des facteurs géologiques sur les propriétés mécaniques des sols de fondation. XXIII international geological congress, vol. 12 - (juillet 1967)
- DEBRAS-GUEDON J. - Les matières organiques dans les argiles. Bulletin de la Société Française de Céramique n° 75 (avril-juin 1967)
- DEBYSER J. - Contribution à l'étude géochimique des vases marines. Thèse, Ed. Technip (1961)
- DEJOU J., LAMY Ph. - Essai de détermination du taux de matière organique des sols à partir de l'analyse thermogravimétrique. Comparaison avec la méthode basée sur le dosage du carbone par voie chimique. C.R. Académie des Sciences, Paris, t. 272 - (5 avril 1971)
- DELON J.F. - Surfaces spécifiques et porosités des argiles. Silicates industriels - (avril 1971)
- DELOYE F.X. - Trois années de mesure de surfaces spécifiques B.E.T. au L.C.P.C. Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers P. et Ch. n° 30 (mars-avril 1968)

- DELOYE F.X., STRUILLLOU R. - Utilisation des mesures d'adsorption de gaz pour l'étude des surfaces internes des minéraux. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 44 - (1970)
- DEMOLON A. - Principes d'agronomie Tome I. Dynamique du Sol. Dunod - (1960)
- DESPRAIRIES A. - La sédimentation rythmée. Degré de représentativité de la distribution des groupes de grains dans le rythme. Bulletin de la Société géologique de France (7) XVI, n° 6 (1974)
- DUCHAUFOR Ph. - Précis de pédologie. Masson Ed. - (1960)
- DUCHAUFOR Ph. - Humification et écologie. Cahiers de l'O.R.S.T.O.M., série Pédologie, vol. VIII n° 4 - (1970)
- DUCHAUFOR Ph., JACQUIN F. - Comparaison des processus d'humification dans les principaux types d'humus forestiers. Science du sol n° 1 - (1975)
- DUMON J.C. - Résultat du fractionnement de la matière organique humifiée extraite de sédiments fluviatiles, laguno-marins et marins. Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine Tiré à part n° 12, p. 15-23 - (1972)
- DUNGLAS J. - Pédologie et mécanique des sols. Bulletin de l'Association Française de l'Etude du Sol n° 11 - (novembre 1962)
- DYAL R.S., HENDRICKS S.B. - Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. Soil Science 69 - 6 - (1950)
- ERMOLENKO N.F. - Trace elements and colloids in soils. Israel Program for scientific translations - (1972)
- FARRAR D.M. - The use of vapor-pressure and moisture content measurements to deduce the internal and external surface area of soil particles. Journal of soil science 14 - (1963)
- FARRAR D.M., COLEMAN J.D. - The correlation of surface area with other properties of nineteen British clay soils. Journal of soil science, vol. 18 n° 1 - (1967)
- FLAIG W. - contribution à la connaissance de la constitution et de la synthèse des acides humiques. N° spécial, science du sol n° 2 - (1970)
- FOKKENS B. - Computation of the compressibility of peat from the content of organic matter and water. De Ingenieur, JRG 82 n° 13, Utrecht - (mars 1970)
- FRADCOURT R., GHISTE S. - Tassements dûs au rabattement de la nappe aquifère. 8° congrès international de Mécanique des sols, session 4, Moscou - (1973)
- FRIPIAT J., CHAUSSIDON J., JELLI A. - Chimie physique des phénomènes de surface. Application aux oxydes et aux silicates. Masson - (1971)
- GALENNE B. - Sélection dynamique de la montmorillonite au sein du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Loire. C.R. Académie des Sciences, Paris, t. 278 - (11 février 1974)
- GELPI L., IMBERT P. - Utilisation des tanins dans les boues de forage. Chimie et Industrie vol. 79 n° 1 - (janvier 1958)
- GILLOT J.E. - Clay in engineering geology. Elsevier - (1968)
- GIROUD J.P., BOTTERO A. - Influence des propriétés physico-chimiques des argiles mono-minérales sur leur comportement mécanique. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 62 - (nov. déc. 1972)
- GOULEAU D. - Le remplissage sédimentaire de la baie de Bourgneuf. Bulletin du B.R.G.M. section IV n° 1 - (1971)
- GOULEAU D., SORIANO J. - Etude sédimentologique et géotechnique d'une carotte de la baie de Bourgneuf. Cahiers Océanographiques - XXI - n° 1 (1969)

- GREENLAND D.J. - Interactions between humic and fulvic acids and clays. Soil Science vol. 111 n° 1 - (1971)
- GRIDEL H. - A propos des nouvelles digues des polders de la baie de l'Aiguillon. La Houille Blanche n° spécial 7 - (1968)
- GRIM R.E. - Clay mineralogy in relation to the engineering properties of clay materials. Applied clay mineralogy. Mac Graw Hill Book Cie - (1962)
- GUYOT J. - Mesure des surfaces spécifiques par adsorption. Ann Agron, 20 (4) - (1969)
- GUYOT J., DEJOU J., LAMY Ph. - Contribution à l'étude des phénomènes de surface de la matière organique dans le sol: interaction substances humiques - éthylène - glycol. Annales agronomiques n° 24 (5) - (1973)
- HANG P.T., BRINDLEY G.W. - Methylene bleue adsorption by clay minerals determination of surface areas and cation exchange capacities. (clay-organic studies XVIII). Clays and clay minerals, vol. 18 p. 203-212 - (1970)
- HARTMANN R., DE BOODT M. - The influence of the moisture content, texture and organic matter on the aggregation of sandy and loamy soils. GEODERMA volume 11 n° 1. Elsevier scientific publishing company, Amsterdam - (février 1974)
- INSTITUT NATIONAL de la RECHERCHE AGRONOMIQUE - Dosage du carbone organique selon la méthode d'Anne. Analyse des Sols V - (1968)
- JELLI A. - Surface et porosité d'échantillons pulvérulants. Silicates Industriels vol. 129 n° 5 - (1964)
- JIMENEZ SALAS J.A. - Quelques aspects fondamentaux de la déformabilité des sols. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° spécial, Comportement des sols avant rupture - (juin 1972)
- KENNEY J.C. - The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils. 1 p 123, Oslo - (1967)
- KOFF C.L., POLYAKOV A.S., SERGEEV E.M. - Changes in microtexture of marine clay sediments during their diagenesis. Proc. Int. symp. soil struct., p. 227-242, Gothemburg - (1973) s.l. s.d.
- LABORATOIRE CENTRAL des PONTS et CHAUSSEES - Détermination de la teneur en carbonate dans les sols et les roches par la méthode du calcimètre Dietrich Frühling. Activité : 103024, département Géotechnique - (septembre 1974)
- LAFOND L.R. - Etude minéralogique des argiles actuelles du bassin de la Vilaine. C.R. Académie des Sciences p. 3614 - (5 juin 1961)
- LAFOND L.R. - Etudes littorales et estuariennes en zone intertropicale humide. Thèse de Doctorat d'Etat - (1967)
- LAFOND L.R. - Estuaire de la Gironde. Etude des phénomènes naturels. Synthèse des connaissances géologiques. Labo. Océanographie. Université Paris-Sud. Centre d'Orsay.
- LATOUCHE Cl. - Contribution à la connaissance de la dynamique des vases dans le système Garonne - Dordogne - Gironde. Etude des minéraux argileux. Bulletin de l'I.G.B.A. n° 11/2 (1971)
- LATOUCHE Cl. - La sédimentation argileuse au voisinage de l'embouchure de la Gironde. Interprétation et conséquences. C.R. Académie des Sciences t 274 - (29 mai 1972)
- LECRIVAIN, MARTIN - Application à l'étude des matériaux céramiques de la mesure de la surface spécifique par adsorption gazeuse. Bulletin de la Société Française de Céramique D 422 (1964)
- LEE I.K. - Soil mechanics. Selected topics. Butterworths, London - (1968)
- LEGRAND J. - Mécanique des sols. Enseignement de tronc commun. Ecole des Ponts et Chaussées.
- LE HAIR J.P. - Méthodes de détermination des paramètres de texture par exploitation des isothermes d'adsorption gazeuse. Bull. Soc. Française de Céramique D 436 n° 93 (Octobre-Décembre 1971).
- LEONARDS G.A. - Les fondations. Dunod, Paris - (1968)

- LEROUX A. - Le microscope électronique à balayage. Applications à l'étude des marnes. Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées n° 54 - (Août-sept. 1971)
- LEROUX A. - Granulométrie par la méthode Andreasen perfectionnée. Limites de la méthode. Bulletin de la Société Française de céramique D 4222- (1972)
- LEROUX A. - Caractéristiques mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texture. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 61 - (sept.-oct. 1972)
- LEROUX A. - Application de la microscopie électronique à l'étude de la structure des vases. Stabilité des pentes, rapports de synthèse L.P.C. Journées de mécanique des sols, Nancy, (juin 1973)
- LEROUX A., LACUBE J. - Emploi du traitement par lots pour l'analyse granulométrique de la fraction fine. Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées n° 80 (Nov. Déc. 1975) - Réf. 1717.
- LOW A.J., STUART P.R. - Micro textural differences between arable and old grassland soils as shown in the scanning electron microscope. Journal of soil science vol. 25 n° 2 - (1974)
- MAC FARLANE G. I. - Musked Engineering handbook. University of Toronto Press. (1969)
- MAC KYES E., SETHI A., YONG R.N. - Amorphous coatings on particles of sensitive clay soils. Clays and clay minerals vol. 22, p. 427-433 - (1974)
- MARSHALL C. EDMUND - The physical chemistry and mineralogy of soils. Volume I soil materials. John Wiley & Sons, Inc. New York - (1964)
- MARTIN J.P.; HAIDER K. - Microbial activity in relation to soil humus formation. Soil Science vol. 111 n° 1 - (1971)
- MAZIERE J.P. - Contribution à l'étude physique et mécanique des tourbes. Doctorat de spécialité, Grenoble - (Janvier 1969)
- MELIERES F., MARTIN J.M. - Les minéraux argileux dans l'estuaire de la Gironde. Bulletin du Groupe Français des Argiles t. XXI
- MIEUSSENS C., QUEYROI D., VOGIEN M. - Remblai construit jusqu'à la rupture. Site expérimental de Cubzac-lès-Ponts. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 74 - (nov.-décembre 1974)
- MILAR C.E., TURK L.M., FOTH H.D. - Fundamentals of soil science. Wiley International Edition 4° édition - (1965)
- MILLIES-LACROIX A. - Reconnaissance, choix et aménagement des sols. La SCET et les techniques. CDC panorama. Revue de la Caisse des dépôts et de ses filiales, n° 9 - (mars 1972)
- MOREL Y. - Introduction à l'étude du rôle des matières minérales amorphes dans les échanges eau-sédiment en milieu estuarien et marin. Thèse de 3° cycle. Orsay - (1971)
- NAVARRO J.F. - Plasticité des argiles. Boletín de la Sociedad Espanola de Ceramica. Esp, vol. I, n° 7 (1962). Traduction L.C.P.C. n° 64.T - (18 février 1964)
- NUYENS J. - Capillarité et cohésion. Silicates Industriels - (juin 1961)
- OTTMANN J.M., OTTMANN F.- Sur le rapport C/N dans les sédiments littoraux. Compte rendu Académie des Sciences - (10 avril 1961)
- OTTMANN F., BARBAROUX L., MAHE A., MOULIN G. - Etude sédimentologique géochimique et géotechnique des vases estuariennes. RCP 144, Nantes - (1970)
- PASSEGA R., BYRAMJEE R. - Grain size image of clastic deposits. Sedimentology, vol. 13, P. 233, 252 - (1969)
- PAUTE J.L., MACE Y. - Corrélations entre les caractéristiques physicochimiques et les propriétés mécaniques d'un sol compressible. Rapport du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de St-Brieuc - 1969 -
- PEDRO F. - Structure et réactivité des argiles. Bulletin Groupe Français Argiles t XXVI, n° spécial, Hommage à Jacques MERING - (1974)
- PERRIN J. - Comportement des sols tourbeux et synthèse des résultats. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussées spécial T, Remblais sur sols compressibles - (mai 1973)



- FERRIN J. - Classification des sols organiques. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 69 - (janv.-fév. 1974)
- PILOT G., AMAR S., LEROUX A. - Relations entre la composition minéralogique et les caractéristiques mécaniques de quelques sols argileux français. Colloque de géotechnique, Toulouse, mars 1968. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 43 - (janv.-fév. 1970)
- PONTEVILLE P. - Etude géotechnique des vallées tourbeuses de Picardie. Thèse de Doctorat d'Université, Lille - (juin 1963)
- Proceedings of the International clay conference. Volume 1, Tokyo Japan 1969. Israel Universities Press, Jerusalem - (1969)
- PUSCH Roland - Influence of salinity and organic matter on the formation of clay micro-structure. Proc. int. symp. soil struct., p. 161-173, Gothenburg - (1973) s.l. s.d.
- PUSCH R. - Influence of organic matter on the geotechnical properties of clays. Document D 11 National Swedish Building Research - (1973)
- RAT M., VAUTRAIN J. - Détermination des caractéristiques hydrauliques des sols à partir des variations piézométriques. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 64 (mars-avril 1973)
- RAWSON R.A.G. - A rapid method for determining the surface area of aluminosilicates from the adsorption dynamics of ethylene glycol vapor. Journal of soil science vol. 20 n° 2 - (1969)
- REMY J.C. - Influence de la constitution physique des sols sur leur comportement mécanique : signification des limites d'Atterberg en matière de travail du sol. Annales Agronomiques 22 (3) - (1971)
- RICHARDS A.F., HIRST T.J., PARKS J.M. - Bulk density - water content relationship in marine silts and clays. Journal of sedimentary petrology vol 44 n° 4 - (décembre 1974)
- RIDDICK Thomas M. - Control of colloïd stability through zeta potential. Zetameter, inc. vol. I, New York - (1968)
- RIGOMIER D., DUPUIS J., JAMBU P. - Les phénomènes de maturation du sol et leur incidence sur les modifications de l'activité biologique dans une séquence d'assèchement des vases marines (prés salés et polders de l'Anse de l'Aiguillon). Revue de géographie physique et de géologie dynamique, vol. XIII, fasc. 2 - (1971)
- RIVIERE A., VERNHET S. - Sur la sédimentation des minéraux argileux en milieu marin en présence de matières humiques. Conséquences géologiques. Compte rendu Académie des Sciences - (octobre 1951)
- RIVIERE A. - Généralisation de la méthode des faciès granulométriques par extension de la notion d'indice d'évolution. Détermination de celui-ci. C.R. Académie des Sciences, t 250 (25 avril 1960)
- RIVIERE A. - Origine, nature et propriétés techniques de quelques formations géologiques. Les vases. Laboratoires des Ponts et Chaussées, Journées de géologie, Rouen - (12,13,14 mai 1965)
- RIVIERE A. - Méthodes granulométriques en géologie. Gauthier-Villars, Paris, mises à jour, 2. p. 243-262 - (1967)
- RIVIERE A., VERNHET S. - Granulométrie dimensionnelle ou granulométrie dynamique. C.R. Académie des Sciences t 277 - (17 décembre 1973)
- RIVIERE A. - Affinement de la puissance interprétative des indices d'évolution granulométriques. Méthodes numériques. C.R. Académie des Sciences t 278 - ( 11 février 1974)
- ROFES G. - Influence de la craie en poudre sur les fonds envasés en eau courante. Note présentée lors du XIX congrès de l'Association Internationale de Limnologie (S.I.L.) à Winnipeg (Canada) en août 1974. Rapport publié par le centre technique du Génie rural des Eaux et Forêts.
- ROUSSEAU J., MONEK G., ACHAIN R. - Contribution à l'étude des corrélations existant entre les caractéristiques géotechniques et géologiques d'une formation meuble . Compte rendu du 6ème Congrès international de Mécanique des Sols - (1965)

- ROUSSEAU J. - L'apport de l'analyse texturale à l'étude des propriétés mécaniques des milieux granulaires. Supplément aux Annales de l'ITBTP n° 231-232 - (Mars-avril 1967)
- RUNACHER J.M. - La structure des argiles. Application à l'étude de leurs propriétés macroscopiques. Thèse de Doctorat d'Université, Grenoble - (février 1970)
- SARKANEN K.V. and LUDWIG Ch. H. - Lignins. Occurrence, formation, structure and reactions. Wiley interscience - (1971)
- SCHLOSSER F. - Hypothèses et théories pour la prévision des tassements des remblais sur sols compressibles. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° spécial T, Remblais sur sols compressibles - (mai 1973)
- SCHON Ch. - Classification géotechnique des sols basée sur la classification U.S.C.S. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 16 - (nov-déc. 1965)
- SERGEEV E.M. - Les forces de cohésion et l'eau liées dans les argiles. Bull. du BRGM sect II n°1(1971)
- SIFFERTB., FERRAND C. - Contribution à l'étude du mécanisme d'interaction des argiles et des lignosulfonates. Bulletin du Groupe français des Argiles t XXV, fasc. 2 - (1973)
- SKEMPTON A.W., PETLEY D.J. - Ignition loss and other properties of peats and clays from Avonmouth King's Lynn and Cranberry Moss. Géotechnique 20 n° 4 - (1970)
- SOBOTKA G. - Contribution à l'étude des argiles de la mer champlain. Becancour, Québec. Rapport de recherche, Centre de Géologie de l'Ingénieur de l'école nationale supérieure des Mines de Paris - (juillet 1974)
- SRIDHARAN A., VENKATAPPA RAO G. - Surface area determination of clays. (Note technique). Geotechnical Engineering vol. 3 - (1972)
- TERZAGHI K., PECK R.B. - Mécanique des Sols appliquée. Dunod - (1957)
- TOURET C., VESTIER D. - Propriétés électrocinétiques des argiles. Applications. Silicates Industriels - (septembre 1971)
- TURC L. - Sur la matière organique du sol fractionnée par densité. Compte rendu d'Académie des Sciences t 229 - (8 août 1949)
- TURENNE J.F. - Saison des pluies et dynamique des acides humiques sous Savane (Guyane Française). Cahiers de l'ORSTOM. Série pédologie vol. VIII n° 4 - (1970)
- USSELMANN P. - relations entre divers facteurs et caractéristiques mécaniques de formations superficielles meubles affectées par des mouvements de masse. D'après l'étude d'échantillons provenant de quelques versants français. Revue de géomorphologie dynamique n° 2 Année 1971 XX° année.
- VAN OLPHEN H. - An introduction to clay colloïd chemistry. Interscience - (1963)
- VAUTRAIN J. - Etude d'un remblai sur tourbe à Caen. Laboratoires des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche L.P.C. N° 41 - (février 1975)
- VERGER F. - Marais et Wadden du littoral français. Bordeaux, Biscaye Frères - (1968)
- VENIALE Fernando.- La mineralogia delle argille nell'analisi meccanica e nello studio geotecnico di suoli e sedimenti. 2° Congrès de l'Association Italienne de Géologie sur l'étude des problèmes de la géologie appliquée, Genève - (24,25,26 septembre 1971)
- VIDALIE J.F. - Etude des sols organiques de Saint-André-de-Cubzac. Rapport du Département de Géotechnique - LCPC - (août 1974).
- VILENSKII D.G. - Soil Science. Moscou - (1957).
- VOGIEN M. - Etude du comportement avant la rupture d'un remblai expérimental construit sur sol mou à Cubzac-les-Ponts - Thèse de docteur-ingénieur, soutenue en déc. 1975 à Paris, Université Pierre et Marie Curie.
- VOINOVITCH I.A. et Al. - L'analyse minéralogique des sols argileux. Collection du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Eyrolles ed. - (1971).
- VYALOV S.S., ZARETSKY Yu.K., MAXIMYAK R.V., PEKARSKAYA N.K. - Problems of the structural rheology of clays. Bulletin de l'IAEG, Paris, n° 5 - (1972).
- WILUN Z., STARZEWSKI K. - Soil mechanics in foundation engineering. Volume one. Properties of soils and site investigations. Intertext Books, London - (1972).

## abstract

---

### A STUDY OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES AND THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMPRESSIBLE SOILS (MUD, PEAT, SOFT CLAY)

This work is based on as complete a study as possible of some forty soils ranging from mud on peat through soft clay.

The techniques employed, adapted to the problems posed, had recourse to sedimentology, chemistry, electron microscopy and physico-chemistry.

The geotechnical behaviour of soils is approached from the physico-chemical angle, in the widest sense, with a twofold objective :

- To acquire a better knowledge, and hence a greater mastery, of the mechanical behaviour of these types of soil.
- To establish correlations between the parameters of long and costly tests and easily measurable characteristics.

Sedimentological techniques alone provide information on the placement of these soils and hence on their textural characteristics. But the conditions of the medium are also reflected by physico-chemical phenomena. The sedimentological and physico-chemical characteristics, in defining a textural state or a mode of arrangement, condition the mechanical properties of the sediments.

Thus we were able to reveal the harmful influence of highly developed organic matter (humic colloids) on the geotechnic behaviour of soils. This influence is all the greater in proportion as the sediment is lacking in mineral colloids.

It is therefore essential to detect not only the presence of humified organic matter, but also the presence of clay such as montmorillonite.

Parallel with a certain antagonism between organic colloids and mineral colloids, we showed the existence of correlations between compressibility and certain textural parameters, and between an easily measurable physico-chemical characteristic, cation exchange capacity, and an identification test such as the index of plasticity.

In conclusion, an attempt at textural classification is proposed.

## zusammenfassung

### UNTERSUCHUNG DER BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEN PHYSIKALISCH-CHEMISCHEN UND DEN MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN VON ZUSAMMENDRÜCKBAREN BÖDEN (SCHLUFF, TORF, WEICHTON)

Diese Arbeit stützt sich auf eine so komplett wie mögliche Untersuchung von ca. vierzig Bodenarten wie Schluff, Weichton und Torf.

Die dabei angewandten und an die gestellten Probleme abgestimmten Untersuchungsmethoden greifen auf die Sedimentologie, die Chemie, die Elektronenmikroskopie und die physikalische Chemie zurück.

Das geotechnische Verhalten der Böden wird unter dem physikalischchemischen Gesichtspunkt näher untersucht. Zwei Ziele waren dabei angestrebt :

- Erlangen einer besseren Kenntnis und folglich einer besseren Beherrschung des mechanischen Verhaltens von derartigen Bodenarten ;
- Aufstellung von Beziehungen zwischen den langen und kostspieligen Versuchsparametern und den leicht vermessbaren charakteristischen Eigenschaften.

Die sedimentologischen Methoden geben schon allein Auskunft über die Ablagerung dieser Böden und folglich über das ihnen eigene Gefüge. Aber auch physikalisch-chemische Erscheinungen lassen Aussagen über die Medienbedingungen zu. Die sedimentologischen und physikalisch-chemischen Eigenarten definieren nicht nur ein Gefüge oder eine Anordnungsart, sie bedingen auch die mechanischen Eigenschaften der Sedimente.

So konnte der schädliche Einfluss der in Zersetzung befindlichen organischen Stoffe (Humuskolloide) auf das geotechnische Verhalten der Böden nachgewiesen werden. Je kleiner der Gehalt des Sediments an Mineralkolloiden ist, desto stärker ist dieser Einfluss. Das Vorhandensein von humifizierten organischen Stoffen und von Ton wie Montmorillonit muss daher unbedingt nachgesucht werden.

Parallel zum Nachweis eines gewissen Antagonismus zwischen den Humus- und den Mineralkolloiden konnte das Bestehen von Beziehungen zwischen der Zusammendrückbarkeit und gewissen Strukturparametern gezeigt werden. Dazu besteht noch eine Korrelation zwischen einer leicht vermessbaren physikalischchemischen Eigenschaft die Kationenaustauschkapazität, und einem Identifizierungsversuch wie die Plastizitätszahl.

Zum Schluss wird eine Gefügeklassifizierung vorgeschlagen.

## resumen

---

### ESTUDIO DE LAS RELACIONES ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE TERRENOS COMPRESIBLES (FANGOS, TURBAS, ARCILLAS BLANDAS)

Se basa este trabajo en un estudio muy exhaustivo de cuarenta terrenos que van desde fangos a turbas, pasando por las arcillas blandas.

Las técnicas de estudio que empleamos y adaptamos a los problemas presentados recurren a la sedimentología, química, microscopia electrónica y físico-química.

Se aborda el comportamiento geotécnico de los terrenos desde el ángulo físico-químico en sentido amplio, con doble objetivo :

- adquirir mejor conocimiento y por ende mejor dominio del comportamiento mecánico de estos tipos de terrenos,
- determinar correlaciones entre parámetros de ensayos largos y costosos y características de fácil medición.

Las técnicas sedimentológicas proporcionan por sí solas datos sobre la localización de los terrenos y por tanto, sobre su característica textural, aunque también por medio de los fenómenos físico-químicos, se detectan las condiciones de entorno. Las propiedades mecánicas de los sedimentos están supeditadas a los caracteres sedimentológicos y físico-químicos, por definir éstos un estado textural - o forma de ordenación.

Así, pues, pudimos poner de manifiesto la influencia nociva sobre el comportamiento geotécnico de los terrenos, de la materia orgánica evolucionada (coloides húmicos). Esta influencia es mayor cuando el sedimento es más pobre en coloides minerales. Por tanto, es indispensable descubrir, no sólo la presencia de materia orgánica humificada, sino también la de arcilla tal y como la montmorillonita.

Paralelamente a la puesta de manifiesto de cierto antagonismo entre coloides orgánicos y coloides minerales, hemos probado que existen correlaciones entre la compresibilidad y algunos parámetros texturales ; asimismo, entre una característica físico-química de fácil medición ; la facilidad de cambio de cationes, y un ensayo de identificación, como el índice de plasticidad.

Por último, se propone una tentativa de clasificación textural.



## резюме

---

Исследование взаимосвязи между физико-химическими свойствами  
и прочностными характеристиками слабых грунтов /илов, торфов,  
мягких глин/.

Данная работа является результатом исследования около сорока грунтов, от илов до торфов, включая мягкие глины.

Использованные методы исследования, которые были приспособлены к решению поставленных задач, относятся к седиментологии, химии, электронной микроскопии и физико-химии.

Исследование инженерно-геологического поведения грунтов проведено с позиций физико-химии в широком понимании этого слова, с целью :

- во-первых, лучше изучить, а следовательно и лучше контролировать механическое поведение такого типа грунтов,
- во-вторых, найти корреляционную зависимость между результатами длительных, дорогостоящих испытаний и легко определяемыми характеристиками.

Одни только седиментологические методы дают сведения об условиях отложения этих грунтов, а тем самым и об их структурных характеристиках. Но условия окружающей среды сказываются также и на физико-химических процессах. Седиментологические и физико-химические характеристики, определяя структуру или тип сложения грунтов, обуславливают прочностные свойства этих осадочных пород.

Так было выявлено отрицательное влияние разложившихся органических веществ /гумусных коллоидов/. Это влияние проявляется тем сильнее, чем меньше неорганических коллоидов в осадочных породах. Таким образом необходимо определять не только наличие гумусированных органических веществ, но также и таких глин, как монтмориллонит.

Наряду с некоторым антагонизмом между органическими и неорганическими коллоидными веществами, выявлено наличие корреляционных зависимостей между уплотняемостью и структурными показателями, а также между легко определяемыми физико-химическими характеристиками — катиообменной способностью — и индексом пластичности.

В заключение предложена структурная классификация грунтов.

**RAPPORTS DE RECHERCHE  
DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES**

publiés par le LCPC

- 1 Recherche sur l'évolution des propriétés des matériaux alluvionnaires dans un bassin et mise en évidence de quelques caractéristiques générales, L. Primel (1969) — AR 04 : *Reconnaissance des tracés et sites.*
- 2 Application de la spectrométrie infrarouge à l'étude des argiles et ciments hydratés, A. Baron (1969) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-physiques.*
- 3 Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques, J. Baron et R. Lesage (1969) — AR 31 : *Bétons et liants hydrauliques.*
- 4 La résistance à la traction des roches, C. Tourenq et A. Denis (1970), (épuisé) — AR 09 : *Mécanique des roches et ouvrages souterrains.*
- 5 Mesure des teneurs en eau des sols par les méthodes électriques - Etude d'une méthode capacitive, Tran Ngoc Lan, P. Chaigne et A. Philippe (1970), (épuisé) — AR 03 : *Terrassements.*
- 6 La gélivité des roches — Application aux granulats C. Tourenq (1970) — AR 35 : *Granulats.*
- 7 Corrélation entre frottement longitudinal roue bloquée et frottement transversal à dérive élevée, B. Torchet et B. Lajoinie (1970) — AR 02 : *Confort et sécurité de la circulation (en relation avec la glissance et l'uni des chaussées).*
- 8 La méthode des éléments finis et ses applications aux problèmes de génie civil, P. Guellec (1970), (épuisé) — AR 09 : *Mécanique des roches et ouvrages souterrains.*
- 9 Interprétation des vibrations de surface sur les structures routières, R. Guillemin (1970) — AR 01 : *Dimensionnement des chaussées.*
- 10 Remblais sur sols compressibles - Synthèses des recherches effectuées dans les Laboratoires des Ponts et Chaussées, F. Bourges (1970), (épuisé) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 11 Calcul des écoulements en milieu poreux par la méthode des éléments finis, P. Guellec (1970), épuisé — AR 09 : *Mécanique des roches et ouvrages souterrains.*
- 12 Chaussées en béton - Constatations 1966-1967-1968, Groupe de travail LCPC-LR (1970) — AR 31 : *Bétons et liants hydrauliques.*
- 13 Consolidation d'un sol sous charge variable - Théorie - Vérification en laboratoire, M. Peignaud (1971) — AR 05 : *Fondations des ouvrages.*
- 14 Etude de la pression interstitielle, H. Josseume (1971), (épuisé) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 15 Fissuration du béton par hydratation localement différée du ciment, J. Baron (1971) — AR 31 : *Bétons et liants hydrauliques.*
- 16 Identification et dosage des différents sucres présents dans les plastifiants réducteurs d'eau, C. Laval et F. Durrieu (1971) — AR 31 : *Bétons et liants hydrauliques.*
- 17 Etude de la terre armée à l'appareil triaxial, Nguyen Thanh Long, Y. Guégan et G. Legeay (1972) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 18 Contribution à l'étude de la dilatation thermique des bétons, Mahmoudzadeh-Razimi (1972) — AR 31 : *Bétons et liants hydrauliques.*
- 19 Elaboration de liants goudrons époxydes pour enrobés à hautes performances mécaniques, G. Brun (1972) — AR 33 : *Liants hydrocarbonés et enrobés.*
- 20 Machines foreuses pour tunnels et galeries - Techniques et bases théoriques de l'abattage mécanique des roches, D. Fourmaintraux (1972) — AR 09 : *Mécanique des roches et ouvrages souterrains.*
- 21 Influence des gradients de pression interstitielle sur les résultats de l'essai triaxial, H. Josseume (1972) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 22 Mesure des pressions derrière et sous un mur de soutènement, J.-P. Levillain (1973) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 23 Etude sur la perméabilité des sols fins mesurée en laboratoire, S. Amar et H. Dupuy (1973) — AR 05 : *Fondations des ouvrages.*
- 24 Compactage des terrassements - Efficacité en profondeur de trois rouleaux vibrants, P. Chaigne, E. Leflaive, J. Oczkowski, R. Franceschina, G. Morel et A. Quibel (1973) — AR 03 : *Terrassements.*
- 25 Remblais sur sols mous équipés de banquettes latérales - Elaboration des abaques de calcul de stabilité, G. Pilot et M. Moreau (1973) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 26 Etude des voûtes en terre armée, C. Behnia (1973), (épuisé) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 27 Contribution à l'étude de la cohésion dans une pâte de laitier granulé, Ph. Petit (1973) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques.*
- 28 La stabilité des ouvrages souterrains - Soutènement et revêtement, M. Panet (1973) — AR 09 : *Mécanique des roches et ouvrages souterrains.*
- 29 Calcul des contraintes dans un massif d'épaisseur limitée soumis à une charge trapézoïdale, B. Mandagaran (1973) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 30 Etude des murs en terre armée sur modèles réduits bidimensionnels, Nguyen Thanh Long, F. Schlosser, Y. Guégan et G. Legeay (1973) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 31 Etudes sur l'uni des revêtements routiers et le confort du véhicule automobile, M. Abrache (1974) — AR 02 : *Confort et sécurité de la circulation (en relation avec la glissance et l'uni des chaussées).*
- 32 Dispositif d'enregistrement adaptable à l'essai de classement des sols selon leur degré de gélivité, J.-C. Laporte (1974) — AR 01 : *Dimensionnement des chaussées.*
- 33 Compactage des terrassements - Compactage en grande épaisseur au moyen de rouleaux à cylindres vibrants lourds et d'un compacteur à pneus lourd, P. Chaigne, R. Franceschina, G. Morel, J. Oczkowski et A. Quibel (1974) — AR 03 : *Terrassements.*
- 34 Auscultation dynamique des superstructures par les méthodes classiques, G. Cannard, J. Carracilli, J. Prost et Y. Vénéci (1974) — AR 62 : *Auscultation des ouvrages d'art.*
- 35 Etude du mécanisme de modification des propriétés des bétons, mortiers et coulis hydrauliques par addition de résines thermodurcissables, A.-M. Paillère (1974) — AR 31 : *Bétons et liants hydrauliques.*
- 36 Calcul de la stabilité des pentes en rupture non circulaire, P. Raulin, G. Rouquès et A. Toubol (1974) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 37 Etude expérimentale de la mise en place du béton frais, R. Lesage (1974) — AR 31 : *Bétons et liants hydrauliques.*

- 570 / kw. 595
- 38 Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline, R. Dron (1974) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques.*
- 39 Contribution à l'étude de l'hydratation des silicates calciques hydrauliques, R. Sierra (1974) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques.*
- 40 Etude expérimentale de la compatibilité de résines époxydes avec le bitume - Application à la prévision de systèmes compatibles, C. Laval et B. Brûlé (1974) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques.*
- 41 Etude d'un remblai sur tourbe à Caen, J. Vautrain (1975) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 42 Etude théorique et expérimentale de la préparation d'une résine époxyde compatible avec le bitume, B. Brûlé et C. Laval (1975) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques.*
- 43 Redistribution des effets hyperstatiques des ponts en béton précontraint par fluage linéaire, M.-Y. Lau (1975), épuisé — AR 10 : *Ponts en béton précontraint.*
- 44 Etude des massifs continus à comportement non linéaire - Applications aux problèmes de génie civil, A. Ricard (1975) — AR 09 : *Mécanique des roches et ouvrages souterrains*
- 45 Evolution sur route de liants et d'enrobés bitumineux - Etude de laboratoire sur prélèvements, Doan Tu Ho, A. Grignard et P. Ugé (1975) — AR 33 : *Liants hydrocarbonés et enrobés.*
- 46 Etude théorique du comportement des pieux sous charge verticale - Introduction de la dilatance, R. Frank (1975) — AR 05 : *Fondations des ouvrages.*
- 47 Consolidation d'un sol avec drains verticaux sous charge variable, D. Chaput et G. Thomann (1975) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 48 Centrifugation de modèles réduits d'ouvrages en terre et de fondations, G. Pilot (1975) — AR 06 : *Ouvrages en terre.*
- 49 Influence des matières minérales en suspension sur la qualité des eaux de surface, D. Robbe (1975) — AR 67 : *Eau.*
- 50 Etude expérimentale des phénomènes différés dans les ouvrages en béton précontraint, M. Diruy (1975) — AR 10 : *Ponts en béton précontraint.*
- 51 Les meulières du sud de la région parisienne, J. Prévot (1976) — AR 04 : *Reconnaissance des tracés et sites.*
- 52 Etude hydrogéologique des formations de pente de la butte d'Amance, M. Livet (1976) — AR 04 : *Reconnaissance des tracés et sites.*
- 53 Etude de mortiers de résine pour revêtements superficiels routiers, A. Denis (1976) — AR 35 : *Granulats.*
- 54 Utilisation des textiles non-tissés pour le drainage - Application aux remblais de sols fins en cours de consolidation, M. Bourdillon (1976) — AR 03 : *Terrassements.*
- 55 Etude lithologique du calcaire de Saint-Ouen dans la région parisienne - Quelques conséquences d'ordre géotechnique, B. Caron (1976) — AR 04 : *Reconnaissance des tracés et sites.*
- 56 Dalles orthotropes, M.-Y. Lau (1976) — AR 11 : *Ponts métalliques et ponts mixtes.*
- 57 Méthodes de contrôle de la pollution des eaux - Utilisation des électrodes spécifiques, M. Cathelain (1976) — AR 63 : *Méthodes chimiques et physico-chimiques.*
- 58 Influence des paramètres de formulation sur le comportement à la fatigue d'un enrobé bitumineux, S. Soliman (1976) — AR 33 : *Liants hydrocarbonés et enrobés.*
- 59 Interprétation de l'efficacité des compacteurs vibrants, J.-M. Machet (1976) — AR 03 : *Terrassements et AR 34 : Assises traitées.*
- 60 Etude des mortiers des graves traitées aux liants hydrauliques et aux liants mixtes en vue de la réduction de leur fissuration de retrait, Y. Toklu (1976) — AR 34 : *Assises traitées.*
- 61 Les roches granitiques et leur altération - Reconnaissance géotechnique de tracés en Bretagne, G. Chevassu (1976) — AR 04 : *Reconnaissance des tracés et sites.*
- 62 Revêtement en béton de liants hydrocarbonés modifiés - Etude de laboratoire, J.-P. Grimaux, A. Grignard et M. Huet (1976) — AR 33 : *Liants hydrocarbonés et enrobés.*
- 63 Compactage des graves-bitume au moyen de rouleaux vibrants, J.-M. Machet, G. Morel et J.-C. Valeux (1976) — AR 33 : *Liants hydrocarbonés et enrobés.*
- 64 La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier, J. Baron et R. Lesage (1976) — AR 34 : *Bétons et liants hydrauliques.*

*Les rapports de recherche disponibles peuvent être demandés au Service des Publications du LCPC.*

*Les rapports de recherche épuisés peuvent être fournis sous forme de micro-fiches 105 x 148 mm.*