THESE

présentée par

PHAN thi San Ha
Ingénieur à l'Institut Polytechnique de HOCHIMINH VILLE - VIETNAM

Pour obtenir le titre de DOCTEUR de

l'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I

(Arrêtés ministériels du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992)

Spécialité : Sciences de la Terre

Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des Terres Noires du Sud-est de la France

---

Date de soutenance : 14 mai 1993

Composition du jury :

M.	P.	ANTOINE	Président
M.	P.	BROQUET	Rapporteurs
M.	N.	MONGEREAU	
M.	A.	GIRAUD	Examinateurs
M.	A.	BIMBARD	
M.	M.	MEUNIER	Invité

Thèse préparée à l'Institut de Recherche Interdisciplinaire de Géologie et de Mécanique

AVANT - PROPOS

Au moment où j'achève ce travail et au terme de mon séjour en France, je tiens à exprimer ma gratitude à tous les organismes et à toutes les personnes qui m'ont beaucoup aidée à accomplir la présente thèse.

Mes remerciements vont d'abord au gouvernement français, qui m'a attribué une bourse d'études, et au C.R.O.U.S., qui a organisé mon agréable séjour en France.

Je tiens à remercier sincèrement :

- Monsieur Pierre ANTOINE, Professeur à l'Université Joseph Fourier, qui m'a accueillie et a dirigé mon travail au sein de l'équipe Géologie-Géotechnique et qui me fait l'honneur de présider mon jury;

- Monsieur Paul BROQUET, Professeur à l'Université de Franche-Comté et Monsieur Noël MONGEREAU, Professeur à l'INSA de Lyon, qui ont accepté d'être mes rapporteurs;

- Monsieur André GIRAUD, Maître de conférences à l'Université Joseph Fourier, qui a bien voulu participer au jury;

- Monsieur Maurice MEUNIER, Ingénieur au CEMAGREF et Monsieur André BIMBARD, Ingénieur au C.E.T.E de Lyon, pour l'intérêt qu'ils ont porté au sujet traité, et qui me font l'honneur de siéger parmi le jury.

Je souhaite citer encore:

- Monsieur Jean LETOURNEUR, Professeur honoraire, pour avoir porté une grande attention à la rédaction de ce mémoire;

- Monsieur Paul CAMPOROTA, pour l'aide matérielle qu'il m'a consentie en me permettant d'effectuer des essais mécaniques au laboratoire de la D.D.E.;

- Monsieur Yves FAURE, pour les échanges d'idées que nous avons eus pendant les quatre années que j'ai passées sur ce travail,

- Monsieur Michel BONHOMME, pour son aide lors des observations au microscope électronique à balayage.

Je n'oublierai jamais la collaboration du personnel du Service administratif et technique de l'I.R.I.G.M. et de l'Institut Dolomieu: Mesdemoiselles Véronique TISSEYRE et Martine ARGOT ainsi que Messieurs Yves ORENGO, Henri MORA, Claude DEMENJON et Jean-Pierre REVOL.

Que tous mes collègues et amis, avec qui j'ai passé de très agréables moments, trouvent ici l'expression de mes remerciements.

A la veille de mon retour au VIETNAM, je tiens à dire que le souvenir de la sympathie et de la fraternité que j'ai reçues en FRANCE restera éternellement en moi.

ABSTRACT

A series of marls known as "Terres Noires", is often found throughout the south-east of France. Our research mainly aims at deepening our knowledge of geotechnical characteristics and behaviour of sound and weathered "Terres Noires" collected from three differents areas, Trièves, Draix and Barcelonnette. Classical identification tests of identification as: Atterberg limits, X-ray diffraction analysis ... and more technical investigations using scanning electron microscope were performed. On the basis of mineralogical distinction, the "Terres Noires" of the three examined areas can be considered as a homogeneous lithological unit whose different behaviours depend on carbonate content and microscopical fabric.

As a scientific contribution to the geological and geotechnical investigations for a motorway project between Grenoble and Sisteron, the use of "Terres Noires" as earthfill material was studied in more details. The conclusion is that this is possible and the best conditions for that purpose, have beeen determined.

RESUME

Une formation marneuse, nommée "Terres Noires", se rencontre fréquemment dans presque tout le secteur sud-est de la France. La recherche a visé à approfondir la connaissance des caractéristiques géotechniques des Terres Noires saines ou altérées, de trois régions différentes, le Trièves, la fenêtre de Barcelonnette et le bassin de Draix. Les essais d'identification classiques, comme limites d'Atterberg, granulométrie....., mais aussi des techniques plus fines (microscope électronique à balayage) ont été mis en oeuvre. Il en résulte qu'à part une différenciation minéralogique, les Terres Noires des trois secteurs étudiés peuvent être considérées comme un ensemble lithologique homogène dont les différences de comportement sont essentiellement liées à leur teneur en carbonate et à leur texture microscopique.

L'étude de l'utilisation des Terres Noires en remblai routier a aussi été effectuée en recourant à une série d'essais physiques et mécaniques. On en conclut que les matériaux extraits se prêtent à cet emploi, à la condition d'user de précautions particulières.

Table des matières

	page
Introduction	5
Première partie: Généralités	9
Chapitre 1 - Contexte général du secteur étudié	9
1.1 Aspect général régional	11
1.2 Description des terrains	11
1.2.1 Le Trias	11
1.2.2 Le Jurassique	11
1.2.3 Le Crétacé	17
1.2.4 Le Tertiaire	17
1.2.5 Le Quaternaire	17
1.3 Morphologie	18
1.3.1 Morphologie générale de la région	18
1.3.2 Morphologie des Terres Noires	18
1.4 Tectonique	18
Chapitre 2 - La stratigraphie et la sédimentologie des Terres Noires	21
2.1 L'histoire de la formation des Terres Noires	23
2.2 La stratigraphie des Terres Noires	23
2.3 Les Terres Noires des secteurs étudiés	25
2.3.1 Le Trièves	25
2.3.2 Le bassin de Draix	26
2.3.3 La fenêtre de Barcelonnette	29
Deuxième partie: Les essais d'identification physique et minéralogique	33
Chapitre 3 - Prélèvement des échantillons	35
3.1 Méthode de prélèvement	37
3.2 Modes de prélèvement	39
3.3 La fiche de recensement	39
3.4 Désignation des échantilons	39

Chapitre 4 - Les essais d'identification 43
4.1 Description de la couche d'altération superficielle 45
4.2 La teneur en eau 46
4.3 La teneur en carbonates 48
4.4 La masse volumique humide 59
4.5 La masse volumique sèche 60
4.6 La porosité totale 61
4.7 La granulométrie et la sédimentométrie 63
4.8 Les limites d'Atterberg 68
4.9 L'essai au bleu de méthylène 74
4.9.1 Définition 74
4.9.2 Principe de l'essai 74
4.9.3 Exécution 75
4.9.4 Résultats 76
4.10 Les analyses de diffraction aux rayons X 88
4.11 Les observations au microscope polarisant 96
4.12 Les observations au microscope électronique à balayage 97

Chapitre 5 - Aperçu du comportement des Terres Noires altérées 115
5.1 L'essai de la résistance au cisaillement rectiligne 117
5.1.1 Préparation du matériau et exécution de l'essai 117
5.1.2 Résultats 117
5.2 L'essai pénétrométrique 122
5.2.1 Introduction 122
5.2.2 Principe 123
5.2.3 Description du matériel 123
5.2.4 Mode opératoire de l'essai 124
5.2.5 Présentation des résultats 125
5.2.6 Constatations 126
5.3 Conclusions du chapitre 129
5.4 Conclusions de la deuxième partie 130

Troisième partie: L'emploi des Terres Noires en remblai routier 133

Chapitre 6 - Les essais mettant en évidence le caractère évolutif des marnes 135

Introduction 137
6.1 L'essai d'altérabilité 139
6.1.1 Principe de l'essai 139
6.1.2 Mode opératoire 139
6.1.3 Calcul 139
6.1.4 Résultats 140
6.2 L'essai de fragmentabilité 144
6.2.1 Selon la méthode de Schaeffner 144
6.2.2 Selon la méthode du LCPC 147
6.2.3 Classification des matériaux rocheux selon FR et DG 150
6.3 L'essai de dégradation due au gonflement 150
6.3.1 Principe de l'essai 151
6.3.2 Résultats 152
6.4 Conclusions 153

Chapitre 7 - Essai Proctor et de poinçonnement 155
7.1 Essai Proctor 157
7.2 Essai de poinçonnement 159
7.2.1 Introduction 159
7.2.2 Définition 160
7.2.3 Mode opératoire 160
7.2.4 Calculs 161
7.2.5 Résultats 161
7.3 Conclusions 163

Chapitre 8 - Essai oedométrique 167
8.1 Introduction 169
8.2 Fabrication des échantillons 169
8.3 Exécution de l'essai 170
8.4 Résultats 170
8.5 Conclusions 174

Chapitre 9 - Essai de cisaillement à la boîte de Casagrande 177
9.1 Fabrication des échantillons 179
9.2 Exécution de l'essai 179
9.3 Résultats 180
9.4 Conclusions du chapitre 184
9.5 Conclusions de la troisième partie 185
9.6 Propositions sur l'utilisation des Terres Noires en remblai 186

Quatrième partie: Conclusions générales 189

Annexe 1 -Coordonnées des points de prélèvement 197
Annexe 2 - Courbes granulométriques 201
Annexe 3 - Méthode de détermination de la valeur de bleu d'un sol 207
Annexe 4 - Courbes contrainte-déplacement des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande 211
Annexe 5 - Diagrammes pénétrométriques 221

Bibliographie 239

INTRODUCTION

Dans presque toute la partie sud-est de la France, on rencontre fréquemment une formation géologique connue pour son instabilité et son caractère évolutif. Celle-ci est formée de marnes sombres, plus ou moins tendres et finement feuilletées, désignée habituellement par le terme expressif de "Terres Noires". Sa rencontre n'est pas sans poser de problèmes lors de nombreux travaux de Génie Civil.

Le but principal de notre recherche a consisté à approfondir la connaissance des caractéristiques géotechniques des Terres Noires dans trois secteurs différents, géographiquement bien distincts, le Trièves, la fenêtre de Barcelonnette et le bassin de Draix. Ce travail envisagera aussi leur éventuel emploi pour la construction de remblais routiers.

En liaison avec l'approche pluridisciplinaire de cette étude, ce mémoire se divise en quatre parties.

La première est bibliographique. Elle présente l'aspect général de la région comportant la description des terrains et de la morphologie, la stratigraphie et l'histoire de la formation des Terres Noires.

Nous présentons, dans la deuxième partie, tous les essais, réalisés par des techniques très variées, que nous avons pu effectuer au laboratoire, concernant l'identification physique, minéralogique et géotechnique des Terres Noires. En définissant l'évolution de leurs divers paramètres, lors du passage de la roche saine à la roche altérée, on trouve une explication au comportement particulier de cette dernière.

La troisième partie est consacrée à l'étude de l'emploi des Terres Noires en remblai routier. Pour cela, un sol de référence homogénéisé et compacté au laboratoire est utilisé lors d'essais mettant en évidence son caractère évolutif, essais Proctor, de poinçonnement, oedométrique et de cisaillement rectiligne.

Enfin, la dernière partie, en synthétisant les données précédentes, présente les conclusions que nous en avons tirées.

Ce travail de recherche a été réalisé au sein de l'équipe Géotechnique - Géologie de l'Institut de Recherches Interdisciplinaires de Géologie et de Mécanique (I.R.I.G.M.) à Grenoble, en collaboration avec le Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (C.E.T.E.) de Lyon.

Première partie

Généralités

Chapitre 1 :

Contexte général du secteur étudié

1.1 Aspect général régional

Les secteurs étudiés comprennent le Trièves (au Sud de la vallée du Drac), la fenêtre de Barcelonnette (dans les Alpes-de-Haute-Provence) et le bassin de Draix (dans le massif des Préalpes de Digne). Ils correspondent géographiquement aux chaînes subalpines méridionales et à l'extrême Sud des chaînes subalpines septentrionales (fig.1.1).

Les chaînes subalpines sont formées par des roches sédimentaires résultant de la transformation de vases déposées au fond de la mer. La profondeur et l'étendue des bassins où s'opérait ce dépôt se modifiant avec le temps, le faciès de ces roches est variable, aussi bien dans le sens vertical que dans le sens horizontal. On verra se succéder en alternance des niveaux calcaires ou marneux, et dont la puissance présentera des variations considérables.

C'est ce qui explique la morphologie variée des massifs subalpins, dont le relief est en particulier accidenté par la présence de deux puissants niveaux de calcaires presque purs: les calcaires tithoniques d'âge jurassique supérieur et les calcaires urgoniens d'âge crétacé inférieur (Barrémien-Aptien).

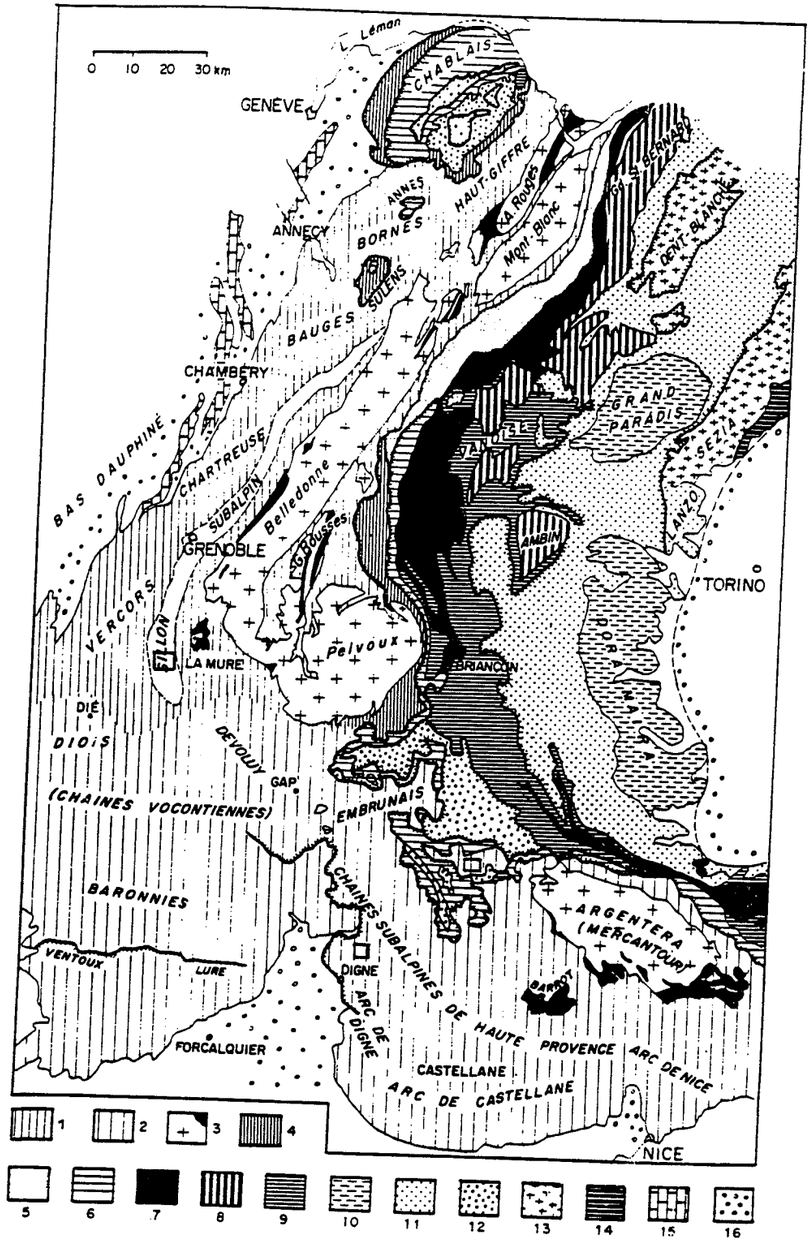
1.2 Description des terrains

1.2.1 Le Trias

Dans la région étudiée, le Trias est mal représenté à l'affleurement. Il se présente en général sous la forme de gypses, de cargneules, de grès ou de dolomies.

1.2.2 Le Jurassique

Les terrains jurassiques dominent largement ; pour cette raison, ils seront décrits de façon plus détaillée.



D'après J. Debelmas et M. Gidon

1. Chaînes subalpines septentrionales. - 2. Chaînes subalpines méridionales. - 3. Massifs cristallins externes et bassins permo-houillers. - 4. Zone ultradauphinoise. - 5.Zone valaisane. - 6. Zone subbriançonnaise. - 7. Zone houillère briançonnaise. - 8. Zone Vanoise - Mont Pourri (Permo-Houiller briançonnais métamorphique). - 9. Mésozoique briançonnais. - 10. Massifs cristallins internes piémontais. - 11. Zone des schistres lustrés piémontais. - 12. Nappes du Flysch à Helminthoides et Flysch dc la Simme sl. - 13. Zone Sesia. - 14. Zone d'Ivrée. - 15. Jura. - 16. Bassins molassiques périalpins.

Fig.1.1: Les secteurs étudiés (□) dans la situation géologique générale

1.2.2.1 Le Lias

Le Lias dauphinois est subdivisé en Lias calcaire (Hettangien, Sinémurien, Carixien) et en Lias schisteux (Domérien, Toarcien). Le Lias calcaire est formé de calcaires argileux noirs qui alternent avec des assises plus argileuses et plus tendres. Le Lias schisteux, formé de schistes noirs, est plus homogène. Il ne comporte pas d'intercalations calcaires.

1.2.2.2 Le Bajocien

Le Bajocien est représenté par des calcaires argileux noirs, avec des délits plus schisteux.

1.2.2.3 Les Terres Noires: étages Bajocien supérieur, Bathonien, Callovien, Oxfordien

Les Terres Noires apparaissent dans certains secteurs que l'érosion a débarassés de leur couverture plus récente.Elles correspondent à une succession d'assises argileuses et marneuses. Pendant longtemps le terme "Terres Noires" désignait les marnes callovo-oxfordiennes. Aujourd'hui, il englobe toutes les formations argileuses de teinte foncée allant du Bajocien supérieur à l'Oxfordien moyen.

Sur le terrain, elles se présentent sous l'aspect des marnes plus ou moins calcaires (photo 1.1), de teinte foncée, noires, grises ou grises-bleuté, dures, par suite d'intercalations de bancs calcaires dans les bancs argileux ou marneux mais, souvent sous l'aspect de schistes noirs argileux, tendres et finement feuilletés (photo 1.2). L'épaisseur de ces Terres Noires est de l'ordre de 500m en Trièves et à Barcelonnette et atteint jusqu'à 1500m dans le bassin de Draix. Les fossiles, y sont rares et souvent déformés.

Le gel-dégel et les alternances d'humidification-séchage sont les facteurs responsables de l'altération des Terres Noires. Leur désagrégation varie en fonction de la présence des discontinuités, diaclases, failles ou joints, de la porosité, du taux de calcaire, de la structure et de la nature de la phase argileuse. Grâce aux plans du litage, les Terres Noires se désagrègent en plaquettes grossières pluricentimétriques (photo 1.3) et

ensuite en paillettes de taille millimétrique (photo 1.4) dès que les blocs sains sont au contact des agents atmosphériques. Le délitage est donc la première étape visible du processus d'altération des Terres Noires, qui aboutit à la formation de limons et limons sableux (photo 1.5).

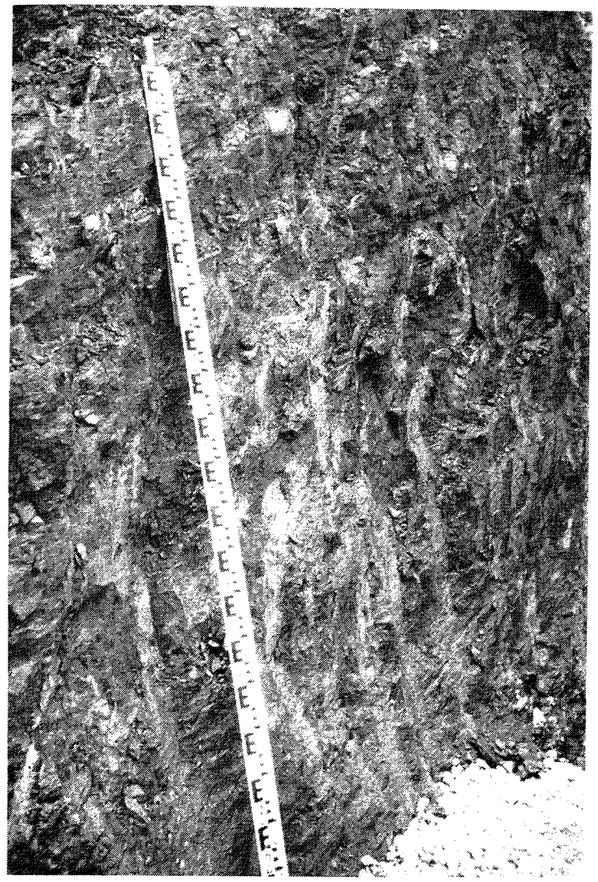


Photo 1.1- Les Terres Noires se présentent sous l'aspect des marnes plus ou moins calcaires (fouille du Fau - Trièves)

Photo 1.2 - L'aspect schisteux des Terres Noires (vallée du Riffol)

Photo 1.3 - Les Terres Noires s'altèrent: en plaquettes pluricentimétriques .....

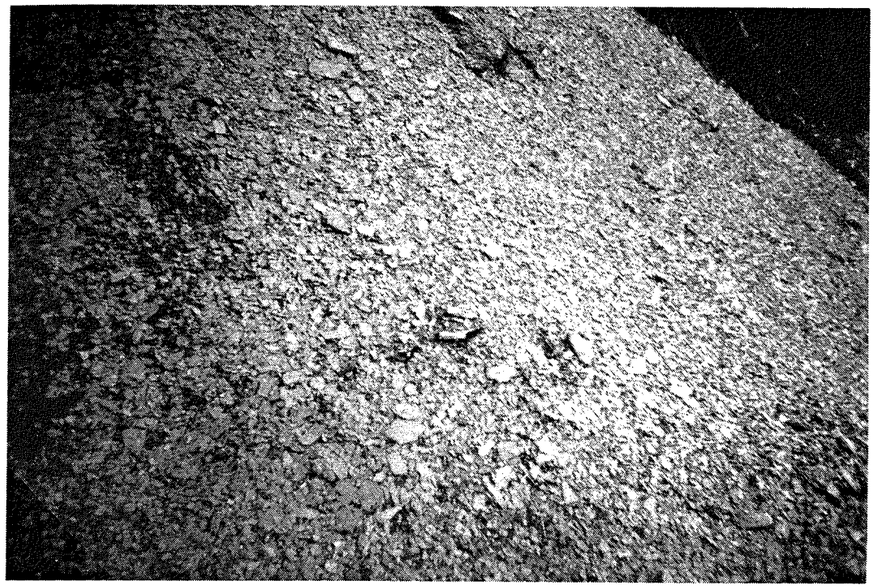


Photo 1.4 - ..... en paillettes millimétriques (Draix) .....

Photo 1.5 - ..... en limons et limons argileux (Draix)

1.2.2.4 Le Kimméridgien

L'augmentation de la teneur en carbonate se manifeste par l'apparition de petits bancs plus durs, séparés par des niveaux schisteux. C'est le Kimméridgien inférieur. Vers la fin du Kimméridgien, l'épaisseur et le nombre des niveaux schisteux diminuent progressivement . Il apparaît des bancs calcaires qui sont de plus en plus épais et clairs.

1.2.2.5 Le Tithonique

Le Jurassique se termine ainsi par de gros bancs de calcaires clairs, durs, massifs, sans interstrates argileux. Il est épais de 50 à 150 mètres et joue un rôle morphologique essentiel dans toutes les chaînes subalpines méridionales.

1.2.3 Le Crétacé

C'est le retour des faciès marneux et marno-calcaires. Les niveaux franchement calcaires sont peu fréquents, sauf une barre de calcaire gris ou blanc, massif avec quelques intercalations marneuses, faciès urgonien, qui affleure largement dans le massif du Vercors. Au-dessus de ce calcaire urgonien, la fin du Crétacé inférieur consiste en sables et grès. Le Crétacé supérieur est représenté par des calcaires pélagiques formant de hautes falaises. Ils sont de teinte blanche ou grise, en bancs massifs ou lités, parfois à silex.

1.2.4 Le Tertiaire

Il est représenté par des sables et des argiles rouges, remplissant des fissures dans les formations urgoniennes ou sénoniennes, des molasses (grès glauconieux calcaires) et des conglomérats deltaïques.

1.2.5 Le Quaternaire

Les terrains quaternaires sont constitués par des éboulis, des cônes de déjection, des tufs, des formations glaciaires et des alluvions fluvio-glaciaires.

1.3 Morphologie

1.3.1 Morphologie générale de la région

Les couches dures calcaires et les couches tendres marneuses se répètent sans cesse dans le substratum. Le rôle morphologique est tenu essentiellement dans les chaînes subalpines du Nord par les calcaires urgonien et tithonique et par la seule barre tithonique dans les chaînes subalpines méridionales. De nombreux réseaux karstiques sont parcourus dans le calcaire urgonien. Des roches plus marneuses de grande épaisseur se trouvent dans les formations d'âge secondaire, caractérisées par l'alternance des calcaires et schistes noirs du Lias, des calcaires argileux du Bajocien et des Terres Noires.

1.3.2 Morphologie des Terres Noires

Les Terres Noires occupent surtout les dépressions et les vallées, que les formations calcaires dominent de leurs falaises et de leurs escarpements. Les Terres Noires ont un relief plus doux de collines basses et parfois dénudées, à la topographie très caractéristique, dite " en dos d'éléphant ". Les versants de Terres Noires* sont sujets à l'érosion par les eaux de ruissellement, qui développent un réseau de petits ravins à écoulement intermittent provoquant des glissements du terrain, notamment superficiels. Vers le Nord, leurs conditions d'affleurement sous le bord subalpin sont moins favorables que dans les massifs méridionaux, en raison de l'abondance des dépôts fluvio-glaciaires et d'une couverture végétale très développée.

1.4 Tectonique

La structure de détail des Terres Noires est très complexe, car elle est dominée par le caractère très déformable de cet ensemble et que les accidents cisaillants prédominent largement. Elle est particulièrement difficile à mettre en évidence par manque de niveaux repères. Les plis sont néanmoins nombreux et leur style et notamment leur déversement varient selon les régions considérées.

Dans notre domaine d'étude, l'apparence de ces séries est généralement monoclinale.

(*): Pour plus de commodité, le terme "Terres Noires" sera remplacée désormais par l'abréviation "TN"

Chapitre 2 :

La stratigraphie et la sédimentologie des Terres Noires

2.1 L'histoire de la formation des Terres Noires

Au début de l'ère secondaire, la mer avance sur le domaine dauphinois, mais elle est seulement épicontinentale et s'évapore activement en laissant des gypses et dolomies. C'est au Jurassique qu'elle submerge tout le domaine et s'installe jusqu'à la fin du Crétacé.

Au Bajocien supérieur, des mouvements tectoniques essentiellement verticaux ont eu lieu dans la zone dauphinoise méridionale. Ils ont divisé la région en plusieurs bassins (bassin vocontien, bassin d'Embrun...) liés par des hauts-fonds. Les dépôts, dont le matériel est issu de reliefs et de rivages, s'accumulent en une série aussi riche en calcaire qu'en argile d'où résulte une puissante formation marneuse connue sous le nom de "Terres Noires".

Au Tertiaire, les TN subalpines directement soumises à la tectonique alpine montrent une forte schistosité à l'approche des massifs cristallins externes. Elles servent aussi de niveau lubrifiant à l'occasion des charriages qui ont lieu, au Miocène, dans les régions d'Embrun et de Barcelonnette.

2.2 La stratigraphie des Terres Noires

En étudiant les différents bassins (bassin de Die-Laragne, bassin de Gap, bassin d'Embrun et bassin des écailles de Digne), P. Artru (1972) a constaté que les TN sont composées de deux membres, que les études stratigraphiques de terrain ont permis de séparer par un niveau repère pratiquement isochrone, appelé "Niveau Repère Médian". De façon classique, on distingue la succession suivante:

- Le Membre inférieur des TN est constitué par des marnes noires en plaquettes, parfois à biohermes ou marnes dolomitiques. On trouve souvent, à sa base, des ammonites pyriteuses .

- Le Niveau médian est caractérisé par des bancs plus résistants à patine rousse, qui

en font un bon repère sur le terrain. Il s'agit d'un calcaire marneux, comportant parfois des débris d'organismes calcaires, qui se présente comme une succession de bancs calcaréo-dolomitiques (ou une alternance à bancs carbonatés) à intercalations marneuses.

- Le Membre supérieur se compose des plaquettes calloviennes et biohermes alternant ou non avec des marnes stériles . On trouve également des marnes à nodules de couleur rouge, blond ou chocolat. Celui-ci prend fin à l'apparition des gros bancs calcaréo-marneux Argovien (P. ARTRU, 1972).

On résume la stratigraphie des TN dans le tableau suivant :

Oxfordien moyen	Membre supérieur
Oxfordien inférieur	
Callovien	Niveau médian
Bathonien	Membre inférieur
Bajocien	

On appelle parfois série inférieure celle qui, du Bajocien supérieur au Callovien inférieur, inclut le Membre inférieur et le Niveau médian, et série supérieure, du Callovien inférieur à l'Oxfordien moyen, celle du Membre supérieur.

Ainsi, la fraction argileuse de cette formation en occupe la partie basse et centrale, sauf le Niveau Repère médian, le sommet étant plutôt caractérisé par des marno-calcaires.

2.3 Les Terres Noires des secteurs étudiés

2.3.1 Le Trièves

Incorporées dans une série sédimentaire quasiment continue du Trias ou du Lias au Cénomanien, les TN participent à l'auréole sédimentaire du massif cristallin externe Pelvoux - Ecrins. Elles occupent une grande partie du Trièves, qui est une dépression, creusée dans les terrains tendres du Malm inférieur et du Dogger (photo 2.1).

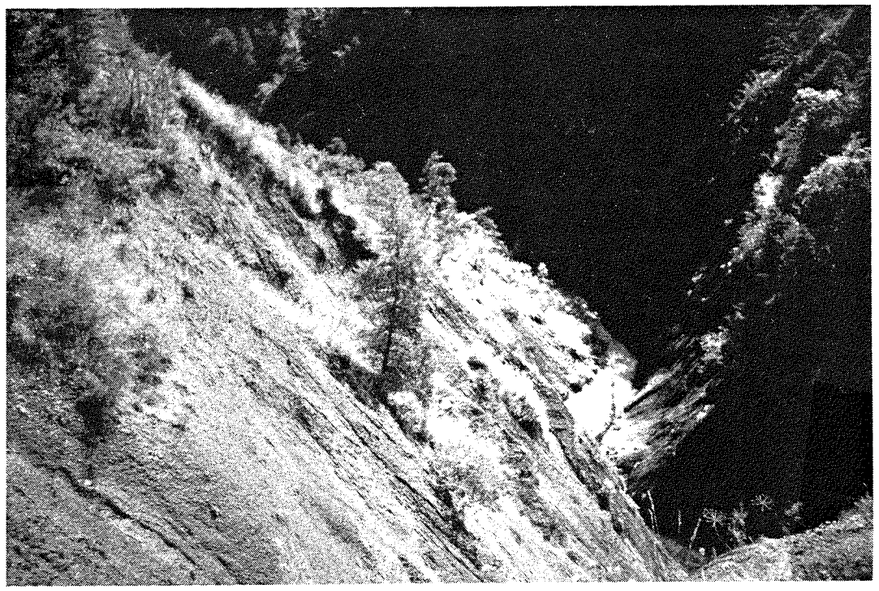


Photo 2.1 - Les Terres Noires de la vallée du Riffol

Au point de vue structure, le rebord occidental du Trièves constitue une grande série isoclinale surmontée par la barre tithonique du bord subalpin. Les bandes d'affleurement des TN ont une direction générale d'environ N160° et une épaisseur d'environ 500m. Cette région est affectée par de nombreuses fractures, notamment la partie méridionale.

Lithologiquement, le Membre Supérieur est constitué par des marnes noires à nodules qui sont des concrétions de calcaires de forme ovoide, dont les dimensions sont centimétriques. Le Membre Inférieur se présente comme des marnes brunes ou noires, appellées "schistes à Posidonomyes" car elles renferment de nombreuses empreintes de

Posidonomya alpina. Le Niveau Médian est révélé par l'alternance de bancs marno-calcaires et de calcaires en plaquettes.

Une coupe au long de la vallée du Riffol (figure 2.1) représente cette série isoclinale.

2.3.2 Les bassins expérimentaux de Draix

Ces bassins, réalisés par l'Office National des Forêts, se situent dans le massif des Préalpes de Digne, où les TN appartiennent à la nappe de Digne. L'architecture générale du relief est soulignée par une série de crêts monoclinaux alignés selon une direction Nord-Sud.

Le Secondaire est lithologiquement caractérisé par la prédominance des faciès marneux. En effet, le Bathonien-Oxfordien, épais d'environ 1500 m, constitué de faciès marno-calcaires et marneux. Seul le Niveau repère médian est un niveau plus calcaire comportant une alternance de bancs calcaires et marneux décimétriques.

Les accidents tectoniques affectent le Niveau médian et la série supérieure, donnant des plis plurimétriques dans le premier, des zones microfaillées et des filons de calcite dans la seconde. Les réseaux de diaclases apparaissent dans toutes les séries des TN.

En s'altérant les marnes schisteuses se débitent en plaquettes et paillettes centimétriques à millimétriques, alors que les marnes plus ou moins calcaires donnent des plaques ou des "frites" décimétriques à centimétriques lorsque leur litage est recoupé par une schistosité. C'est un caractère du débit des TN que l'on observe partout ailleurs.

L'érosion (photo 2.2) fait apparaître dans ce secteur de nombreuses rigoles, des ravins, ainsi que des mouvements en masse, glissements et éboulements. On constate que la pente, la végétation et la structure interne jouent un rôle important dans la répartition des formes d'érosion. Une coupe correspondant au bassin principal, dans la direction Est-Ouest, est représentée dans la figure 2.2.

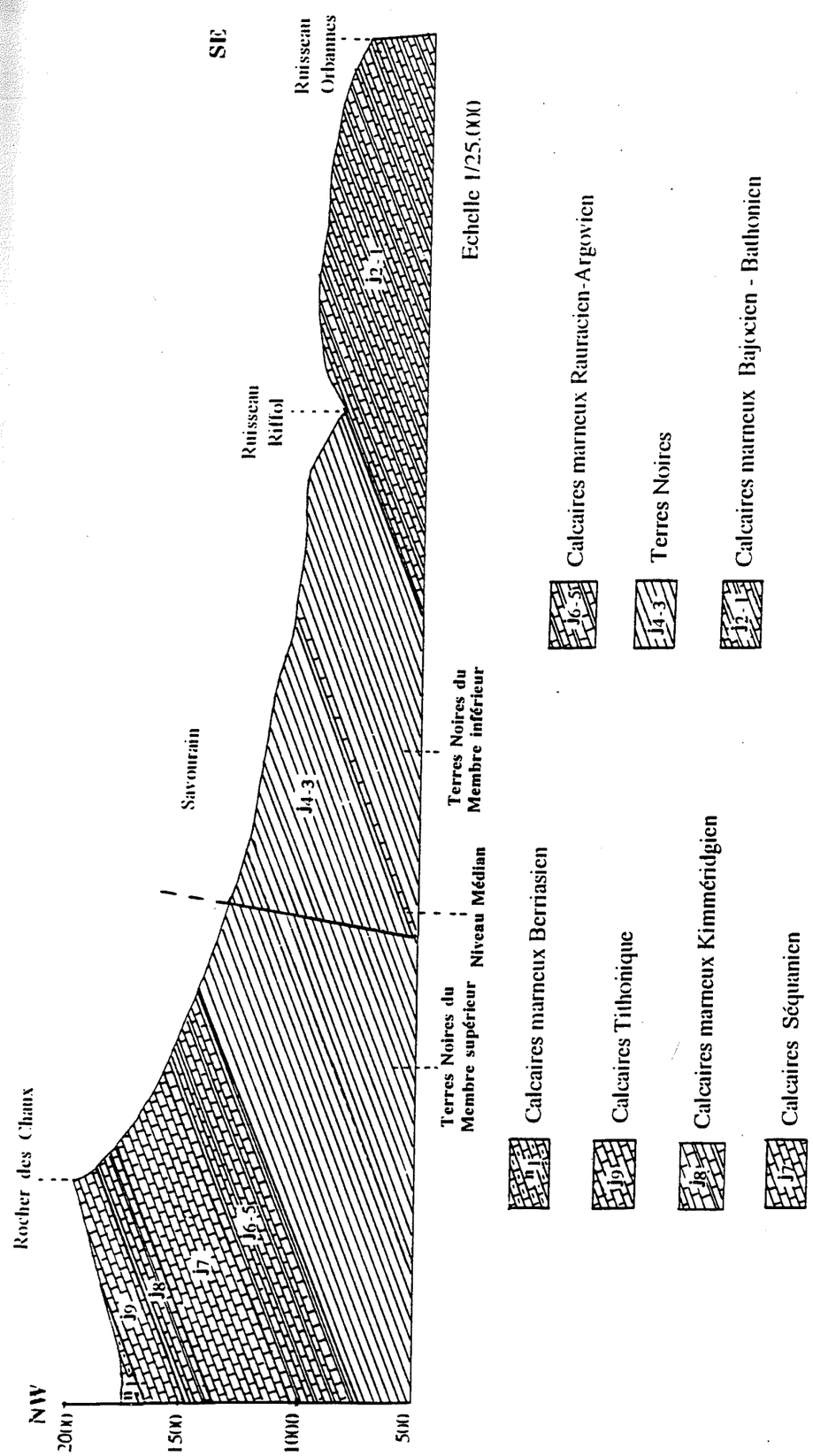
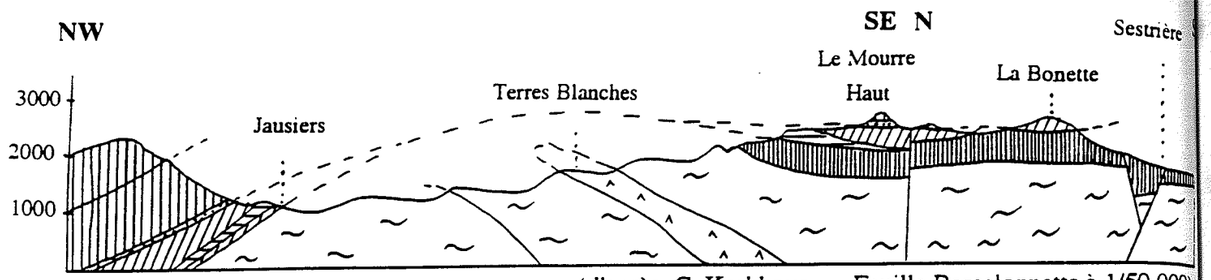


Fig.2.1 - Coupe stratigraphique du Trièves
(Coupe effectuée d'après la feuille Chapelle-en-Vercors 1/25000. Les épaisseurs des divers terrains sont anormalement fortes, ce qui suggèrent des complications tectoniques non mises en évidence).



(d'après C. Kerkhove - Feuille Barcelonnette à 1/50.000)

Echelle 1/100.000

Autochtone

Nappe du Parpaillon

Ecailles basales de la nappe du Parpaillon

Ecailles inférieures de Restefond

Nappe de l'Autapic

Nummulitique

Mésozoïque

Gypses

Fig.2.3 - Coupe tectonique dans la fenêtre de Barcelonnette (environ de Jausiers)

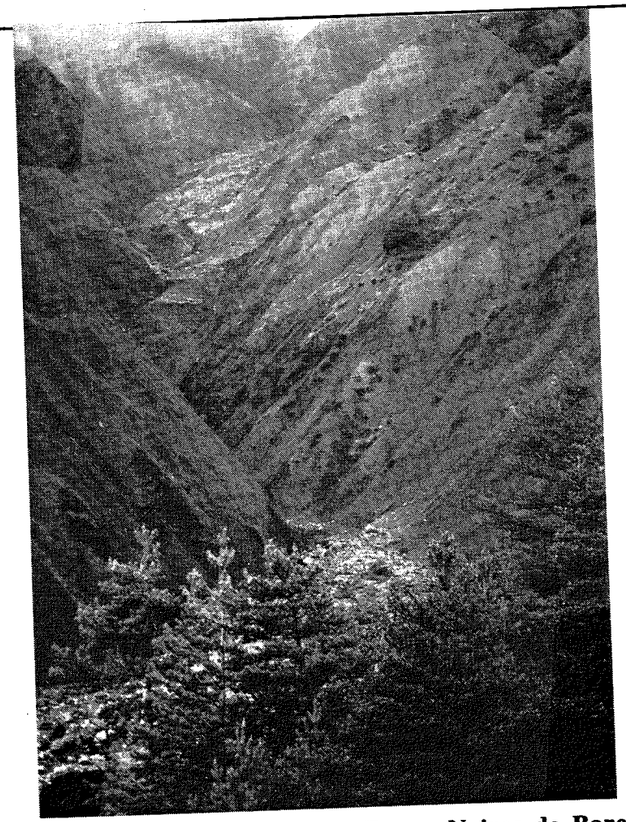


Photo 2.3 - Bad-lands dans les Terres Noires de Barcelonnette

Photo 2.4 - Glissement dans la couverture morainique des TN (route du Col de Restefond, sous le sommet du Gerbier)

Deuxième partie

Les essais d'identification physique et minéralogique

Chapitre 3 :

Prélèvement des échantillons

3.1 Méthode de prélèvement

Le prélèvement d'échantillons destinés aux essais de laboratoire a pour but:

- d'identifier les caractères géotechniques d'ensemble des TN,
- de comparer les caractères des différents ensembles de la série des TN (Membre supérieur et inférieur d'un secteur),
- de comparer leurs caractères dans différents secteurs,
- d'étudier leurs processus d'altération,
- d'étudier leurs caractères évolutifs,
- de comparer, sur le plan minéralogique et physique, les TN avec d'autres marnes, concrètement des marnes aptiennes, valanginiennes, oligocènes. Ces marnes ont été prélevées à Boulc près de Luc-en-Diois.

L'échantillonnage a été réalisé à certains niveaux et en des localités choisies pour leur intérêt géologique ou géotechnique. Les échantillons correspondent aux deux membres principaux de la série des TN, échelonnés entre le Bathonien et l'Oxfordien.

En outre, nous avons bénéficié de deux sondages réalisés par le CETE de Lyon dans le cadre du projet d'autoroute Grenoble-Sisteron: l'un, au remblai des Blancs, l'autre, au Col du Fau.

Au Col du Fau, le sondage carotté X345 atteint 35 m de profondeur. On y trouve des TN schisteuses, finement litées, avec d'importantes fissures sur toute la longueur de la carotte (photo 3.1). C'est seulement sur les deux premiers mètres que l'on voit les produits altérés, qui sont des limons argileux très compacts.

Le remblai de la route RN75, dit remblai "des Blancs", construit il y a plus de 15 ans, présente des déformations. Afin de connaître la nature des sols constituant le remblai et les causes des déformations, le sondage carotté X371 a été exécuté jusqu'à 24,15 m de profondeur. On y trouve de 3,45 m à 7,90 m des TN que l'on a prises comme échantillons de comparaison en tant que matériau de remblai (photo 3.2). En deçà de 3,45 m on rencontre l'enrobé de la chaussée et la couche de fondation. Au delà de 7,90 m ce sont des argiles graveleuses (dépôts morainiques).

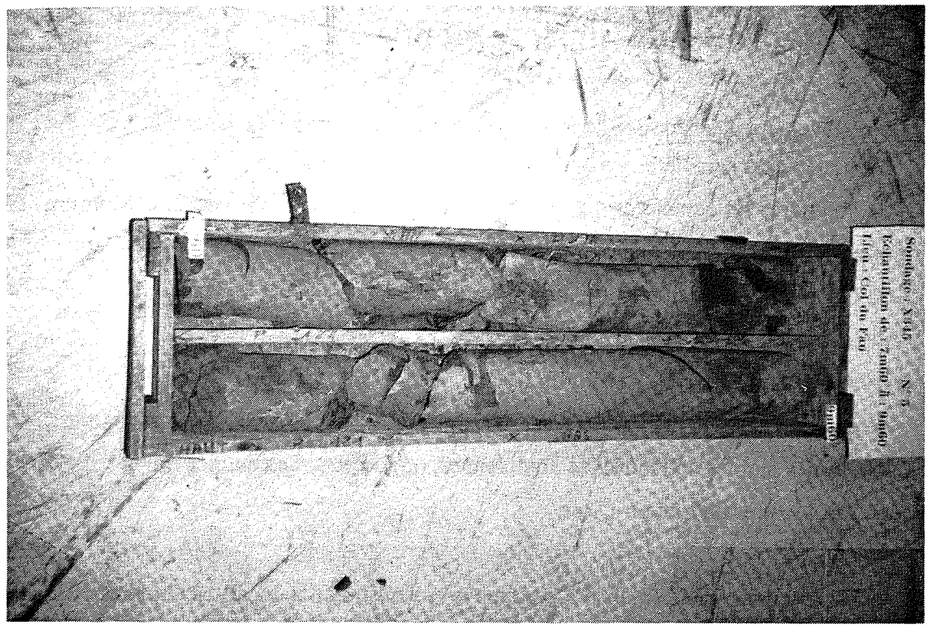


Photo 3.1 - L'échantillon du Col du Fau (Trièves)de 7,60 m à 9,60 m

Photo 3.2 - Les matériaux du remblai des Blancs (sur la route nationale 75, dans le Trièves)

3.2 Modes de prélèvement

Différents types de prélèvements ont été effectués:

- prélèvement d'échantillons altérés en place, superficiels (de la surface jusqu'à quelques dizaines de centimètres de profondeur), au pied ou sur les pentes des déblais et des talus naturels;
- prélèvement d'échantillons moins altérés dans les talus naturels et dans les déblais;
- prélèvement des carottes du remblai des Blancs;
- prélèvement des carottes dans la roche saine au Col du Fau.

La localisation des prélèvements est présentée dans les planches 1, 2, 3 en annexe.

3.3 La fiche de recensement

Deux types de fiches de recensement ont été établis: l'une, pour les faciès altérés et l'autre, pour les roches.Des exemples en sont donnés dans les pages suivantes. Chaque fiche rassemble toutes les informations sur la localisation topographique et stratigraphique, la description géologique du lieu de prélèvement, et tous les résultats des essais géotechniques et minéralogiques.

Sur les trois secteurs étudiés, une quarantaine de fiches ont été rédigées, fournissant un document général sur les TN du Sud-Est de la France.

3.4 Désignation des échantillons

Les échantillons sont identifiés par un chiffre et des lettres:

- le chiffre et la lettre majuscule qui suivit indiquent le numéro de l'échantillon;
- la première lettre minuscule, séparée les précédents par un point, indique son état : **r** pour la roche et **a** pour les produits altérés;
- la deuxième lettre minuscule indique l'ensemble: **s** pour le Membre supérieur et **i** pour le Membre inférieur, **?** pour l'âge inconnu;
- la troisième lettre majuscule désigne le secteur: **T** pour Trièves, **D** pour Draix, **B** pour Barcelonnette.

Exemple: 7A.asT - indique que l'échantillon numéro 7A est un produit altéré (a) appartenant au Membre supérieur (s) prélevé dans le Trièves (T).

Pour les échantillons prélevés à Boulc (près de Luc-en-Diois), la désignation est un peu différente. La deuxième lettre après le point indique l'âge: **a** pour Aptien, **v** pour Valanginien, **o** pour Oligocène et la troisième lettre étant **L** pour désigner le secteur.

Exemple: 39A.aaL - indique que l'échantillon 39A est un produit altéré (a), d'âge aptien (a), prélevé à Boulc près de Luc-en-Diois (L).

FICHIER DES FACIES ALTERES

1) N° de l'échantillon: 9A.asT

2) Date de prélèvement: 31 mars 1990

3) Localisation: tranchée le Chauvinet

X = 44 ° 52 ' 10 "

Y = 5 ° 36 ' 52 "

Z = 847 m

4) Description de l'échantillon:

Plaquettes d'altération superficielle accumulées au bas du talus.

5) Localisation stratigraphique: J_3 - Membre supérieur

6) Essais d'identification:

- Teneur en eau: non effectué.
- Taux de calcaire : 32 - 37 %
- Taux de fines (< 0,074 mm): 76 %
- Limites d'Atterberg: $W_L = 26\%$

  $I_P = 6\%$
- Valeur de bleu: VB 0/D = 1,5

7) Composition minéralogique des fractions argileuses: Illite (58 %), Chlorite (25 %) et des interstratifiés (Illite - Smectite (17 %), Chlorite - Smectite (peu)).

8) Mesure sur terrain:

- Essai pénétrométrique: non effectué.

FICHIER DES FACIES ROCHEUX

1) N° de l'échantillon: 28B.rsT

2) Date de prélèvement: 16 avril 1991

3) Localisation: Le Fau

X = 44° 53' 42"

Y = 5° 36' 50"

Z = 910 m

4) Description de l'échantillon:

Marnes noires, litées, non homogènes, avec des filons de calcite.

5) Localisation stratigraphique: J_4 - Membre supérieur

6) Essais d'identification:

- Teneur en eau: W = 0,6 %
- Poids volumique sec: $\gamma_d = 2,62$ g/cm^3
- Porosité: n = 1 %
- Taux de calcaire: 71 - 79 %
- Valeur de bleu: VB 0/D = 0,8

7) Composition minéralogique: Calcite (66 %), Quartz (17 %), Dolomite (8 %), Plagioclase (3 %), Mica (6 %), Chlorite (peu).

8) Sensibilité dûe aux gonflements: SG = 1,9 %

9) Dégradabilité: $D_G = 1,07$

10) Fragmentabilité: $F_R = 3,6$

Chapitre 4 :

Les essais d'identification

Avant d'aborder les essais d'identification, il convient de décrire le manteau d'altérites des TN.

4.1 Description de la couche d'altération superficielle

En l'absence de couvert végétal, l'observation du terrain nous montre que la structure de la couche d'altération est partout semblable. Du sommet à la base on note:

1) Une tranche superficielle (épaisseur 5-10cm), constituée de marnes complètement désorganisées.On y trouve des "frites", des plaquettes (notamment à Draix), des paillettes et des limons (notamment à Barcelonnette, en Trièves). Cette tranche présente une couleur noire, grise ou rougeâtre à cause de l'existence de fer. L'érosion progresse dans cette tranche dont la substance se retrouve dans les débits solides des cours d'eau.

2)Une tranche moins altérée (épaisseur 10-20cm). On y voit encore la structure litée des TN. Mais la roche est très fragile, si bien qu'elle s'effrite dès qu'on essaye de la prélever. Plus on s'approche de la roche saine, plus la structure est stable et la roche dure. Cette deuxième tranche forme transition entre la roche-mère, saine et la couche superficielle, franchement altérée. Des glissements superficiels, de type plan, affectent souvent cette deuxième tranche au contact avec le substratum sain sous-jacent.

3) La roche saine se situe en moyenne à partir de 20-30, voire même 50 cm de profondeur (Barcelonnette). En certains endroits où l'altération est profonde il arrive qu'on ne l'atteigne pas lors des essais au pénétromètre portatif IRIGM (50 cm) (cf. 5.2). Des glissements localisés apparaissent de temps à autre sur les pentes les plus raides.

Les TN, sous une couverture végétale dense (par exemple forêt), ont une couche d'altération beaucoup plus épaisse, la première tranche (épaisseur 50 -100 cm) étant formée de terre végétale et la deuxième d'une roche plus ou moins altérée. La roche saine pouvant se trouver à 2-3 m. Le premier type de glissement défini ci-dessus constitue alors un désordre d'une certaine importance.

Pour faciliter la lecture des résultats des essais, la description des échantillons sera faite au paragraphe 4.3, tab. 4.3. Il faut souligner que, parmi tous nos échantillons, seuls, les 28A.rsT, 28B.rsT et 30.rsT sont vraiment sains, appartenant à la troisième tranche. Les autres échantillons, prélevés dans la deuxième tranche, sont pourtant désignés aussi par **r**, pour les différencier de ceux désignés par **a**, extraits de la première tranche.

4.2 La teneur en eau

La teneur en eau naturelle a été mesurée sur certains échantillons de TN altérées et sur les carottes du remblai des Blancs. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.1 et 4.2.

Profondeur (m)	W (%)
3,45	7,5
3,85	9,1
4,13	11,2
4,45	11,1
4,80	13,5
5,34	10,3
5,65	12,9
6,00	11,9
6,40	8,5
6,90	10,9
7,40	9,6
7,60	10,8

Tab. 4.1 - Teneur en eau selon la profondeur du remblai des Blancs

Echantillon	W (%)	Echantillon	W (%)
4A.asT	4,7	32A.aiB	10,0
4B.rsT	6,7	32B.aiB	16,2
4C.rsT	6,9	33A.aiB	7,0
4D.asT	10,0	33B.riB	6,5
4E.asT	10,7	33C.riB	5,6
5A.asT	2,9	35A.rsB	2,8
5B.asT	13,0	35B.asB	4,1
28A.rsT	1,5	36.a?B	20,0
28B.rsT	0,6	37A.asB	14,8
28C.rsT	12,2	37B.asB	5,7
28D.rsT	3,1	38A.asB	18,5
28E.rsT	9,4	38B.rsB	9,6
31A.aiT	22,0	38C.a?B	18,1
31B.aiT	22,7	10A.aiD	4,2
43A.aiT	10,0	12.aiD	5,7
43B.riT	7,2	21.asD	4,0
44A.riT	4,5	24.asD	5,5
44B.aiT	8,9	39A.aaL	19,5
45A.aiT	4,5	39B.raL	10,1
45B.riT	3,1	40A.avL	19,0
		40B.rvL	9,0
		41A.aoL	11,3
		41B.roL	5,8
		42A.avL	19,9
		42B.rvL	16,3

Tab. 4. 2 - Teneur en eau des TN saines et altérées

A conditions climatiques égales, la teneur en eau des TN saines est très basse: 1,5 % (28A.rsT) voire 0,6 % (28B.rsT) en cas des calcaires argileux. Elle est à 9,4 % pour 28E.rsT, TN plus ou moins altérées. En effet, le phénomène d'altération a libéré ou formé de nouvelles quantités d'argile, ce qui sera vérifié par les essais au bleu de méthylène (cf. 4.8) et ceux de dégradation par gonflement (cf. 6.3).

De 3,45 m à 7,90 m, les matériaux du remblai des Blancs sont constitués de graviers et de cailloux de TN peu altérées enrobés dans une matrice argileuse résultant de leur altération. Leur teneur en eau varie entre 7,5 et 13,5 % (moyenne 10,6 %).

4.3 La teneur en carbonate

La teneur en carbonate a été obtenue à l'aide du calcimètre Bernard dont le principe est de mesurer, à la pression atmosphérique, le volume de gaz carbonique dégagé par l'attaque du calcaire à l'acide chlorhydrique.

Dans le cas d'une roche, les échantillons sont broyés, séchés et tamisés au tamis de 1mm. Dans le cas de produits altérés, on supprime l'étape de broyage. La prise d'essai est égale à 0,5 g et l'attaque se fait par une dose de 5 ml d'HCl N/6.

Dans la pratique, la précision est suffisante si l'on mesure le volume de gaz à une température assez voisine de 20 °C. En réalité, la température du laboratoire n'est pas toujours à 20 °C. Une correction est obtenue en utilisant les multiplicateurs 0,40 en été, 0,41 au printemps et à l'automne et 0,42 en hiver. On obtient donc le taux de calcaire en multipliant le volume du gaz carbonique mesuré par 0,40 ou 0,41 ou 0,42, selon la saison, et ensuite par 2 (puisqu'on ne prend que 0,5 g d'échantillon pour faire l'essai). Ainsi, le volume du gaz carbonique mesuré en été étant de 51,7 ml, on en déduit que la terre essayée est à 51,7 x 0,4 x 2, c'est-à-dire : 41,36 % de calcaire.

Les essais de teneur en carbonate ont été réalisés sur 122 échantillons du Trièves, 40 du remblai des Blancs, 168 de Draix, 52 de Barcelonnette et 24 de Boulc.

Echantillon	Age	Localité	Taux de calcaire (%)	Description lithologique
1.asT	J_3	Col du Fau	28 - 37	Plaquettes et paillettes de surface
4A.asT	J_3	Vallée du Riffol	30 - 38	Plaquettes de surface
4B.rsT			21 - 33	Dallette homogène sans fissure, au-dessous de 4A.asT
4C.rsT			20 - 29	Niveau massif, peu altéré, au-dessous de 4B.rsT 5 cm
4D.asT			33 - 38	Plaquettes argileuses, en haut d'un ressaut
4E.asT			28 - 44 *	Produits complètement altérés, en bas du ressaut
5A.asT			26 - 31	Produits très altérés : limons sableux
5B.asT			25 - 32	Limons sableux, au-dessous de 5A.asT 13 cm
7A.asT			36 - 54 *	Mélange de niveau profond et superficiel
7B.asT			33 - 58 *	Des plaquettes de surface
7C.asT			40 - 42	Limons sableux au-dessous de 7B.asT
7D.rsT			62 - 69	Niveau carbonaté
8.rsT			35 - 36	TN homogènes, feuilletées
9A.asT	J_3	Tranchée de Chauvinet	32 - 37	Plaquettes en bas du talus
9B.rsT			31 - 36	TN homogènes, feuilletées
28A.rsT	J_4	Le Fau	43 - 53	TN saines avec des lits carbonatés et marneux
28B.rsT			71 - 79	Calcaire argileux sain
28C.rsT			28 - 32	TN altérées
28D.rsT			36 - 63	Niveau plus calcaire, moins altéré
28E.rsT			29 - 69*	TN altérées
29.asT	J_{3-4}	Remblai des Blancs	11 - 31	Cailloux et produits altérés du remblai à 3,45-7,9 m de profondeur
30.rsT	J_3	Col du Fau	27 - 40	TN saines, homogènes, litées à 7,60-9,60 m de profondeur
31A.aiT	J_{1-2}	Vallée du Riffol	32 - 38	Matériaux fins superficiels sur le talus
31B.aiT	-		30 - 35	Matériaux superficiels au pied du talus
43A.aiT	J_2		21-25	Produits superficiels: matériaus fins+petites plaquettes
43B.riT	-		28-34	Matériaux moins altérés
44A.riT	-		28-39	TN saines dans le ruisseau
44B.aiT	-		26-27	Matériaux fins + petites plaquettes en contrebas de 43A.aiT: 30 m
45A.aiT	-		25-28	Matériaux altérés
45B.riT	-		23-49	TN saines dans le ruisseau

Tab. 4. 3 - Teneur en carbonate des TN et des marnes de Luc-en-Diois

Echantillon	Age	Localité	Taux de calcaire (%)	Description lithologique
10A.aiD			35	TN à texture litée. Paillettes d'altération
10B.aiD			37 -38	Au-dessous de 10A.aiD 12 cm. Produits d'altération: paillettes
10C.aiD			33 - 36	Sur un autre talus espacé au 10A.aiD 1 m. Produits fins
10D.aiD			31 - 34	Au-dessous de 10C.aiD 10 cm
10E.aiD			34	Au-dessous de 10C.aiD 25 cm. Les plaquettes d'altération sont humides et se cassent facilement
11.aiD			53 - 58	Produits altérés fins avec paillettes et petites plaquettes
12.aiD			44 - 46	Produits altérés superficiels: fines et paillettes
13.aiD			37 - 42	Produits altérés superficiels: fines et paillettes
14A.aiD	J2	bassin du Francon	40 - 83*	Produits altérés superficiels: fines et paillettes
14B.riD			43 - 74	TN moins altérées au-dessous de la surface topographique 23 cm
15A.aiD			37 - 42	Produits altérés superficiels: fines et paillettes
15B.riD			27 - 41	TN moins altérées au-dessous de la surface topographique 27 cm
16A.aiD			27 - 46	Produits altérés fins et plaquettes plus durs que les autres échantillons
16B.riD			29 - 35	TN moins altérées au-dessous de la surface topographique 41 cm
17.aiD			46 - 49	Plaquettes de surface
18.aiD			42 - 45	Produits altérés superficiels: fines et paillettes
19.riD	J2 inférieur		60 - 61	Marne bathonienne finement feuilletée
20.aiD	J2		39 - 51*	Produits altérés superficiels: fines et paillettes
21.asD			24 - 36	Produits altérés superficiels: plaquettes et paillettes brunes
22A.asD			23 - 43*	Produits de ruissellement sur les talus: éléments fins, couleur brune
22B.asD			13 - 46*	TN altérées en place, brunes
23A.asD	J3-4	bassin de Laval	33 - 40	Produits altérés superficiels: fines et paillettes
23B.rsD			41 - 46	TN feuilletées, altérées en plaquettes
24A.asD			31 - 40	Produits altérés superficiels: fines et paillettes
24B.rsD			23 - 53	TN saines prises dans le ruisseau

Il faut noter que l'échantillon 21.asD se compose de 21A jusqu'à 21D. Ce sont uniquement des TN brunes altérées du Membre supérieur.

Echantillon	Age	Localité	Taux de $CaCO_3$	Description lithologique
32A.aiB			25 - 34	Limons et paillettes au-dessous de la surface 30 cm
32B.aiB		Terres	25 - 44*	Limons et paillettes au-dessous de la surface 5 cm
33A.aiB	J2-3	Plaines	28 - 31	Limons sableux superficiels
33B.riB			30 - 32	Plaquettes au bord d'un ravin
33C.riB			31 - 33	Plaquettes dans le ravin, même niveau que 33B.riB
34.a?B		Torrent	35 -37	Produits d'une coulée torrentielle
35A.rsB	J3-4	de	26 - 27	TN de la tranche moins altérée
35B.asB		Poche	33 - 37	Paillettes superficielles
36.a?B			25 - 33	Matériaux très fins de la coulée à l'aval de 34a?B
37A.asB	J3-4	Ferme	25 - 27	Matériaux fins au pied du talus
37B.asB		la Vallette	17 - 21	Plaquettes altérées sur le talus au-dessous de la surface 5 cm
38A.asB		Riou	32 - 34	Matériaux fins superficiels
38B.rsB	J3-4	Bourdoux	12 - 28*	TN altérées en plaquettes
38C.a?B			28 - 29	Produits de décantation du lit torrentiel
39A.aaL	n6		47	Produits altérés sur le talus
39B.raL	n6		48 - 49	Marnes noires, feuilletées, moins altérées
40A.avL	n2		58 - 66	Produits fins superficiels
40B.rvL	n2	Luc-	69 - 74	Calcaires argileux gris-jaunes, feuilletés, moins altérés d'un ravin
41A.aoL	g	en-	57 - 62	Matériaux fins + petites plaquettes
41B.roL	g	Diois	60 - 65	Marnes rouges, très calcaires , moins altérées
42A.avL	n2		41 - 49	Produits fins superficiels
42B.rvL	n2		45 - 47	Marnes gris-blanches, moins altérées

*: Les fourchettes des valeurs pour ces échantillons sont trop ouvertes pour être représentatives. Elles traduisent des formations calcaires restant dans des zones superficielles.

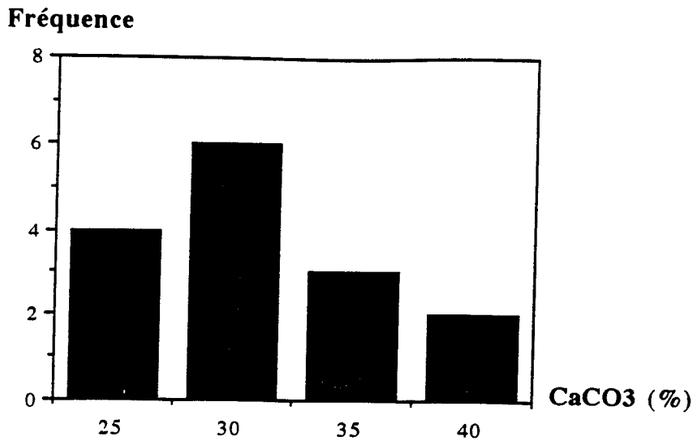


Fig.4.1a - Histogramme de % CaCO3 des TN altérées du Membre inférieur du Trièves

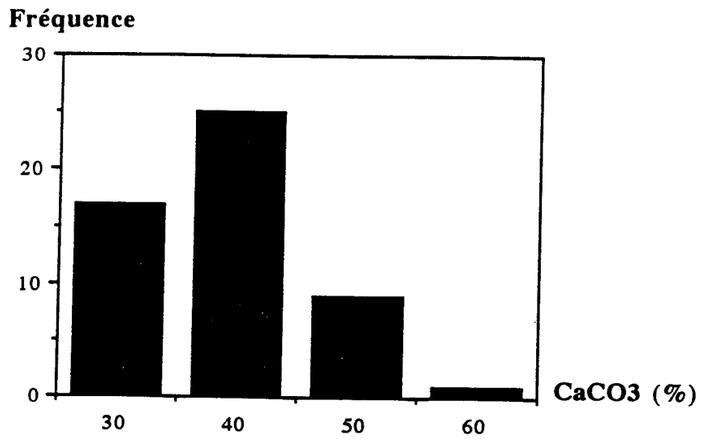


Fig.4.1b - Histogramme de % CaCO3 des TN altérées du Membre supérieur du Trièves

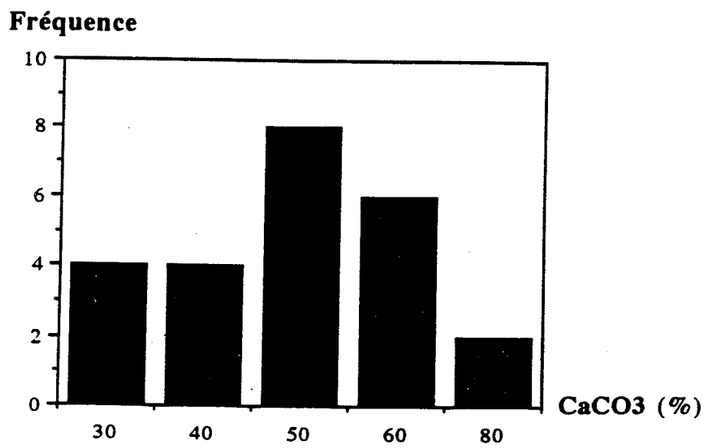


Fig.4.1c - Histogramme de % CaCO3 des TN rocheuses du Membre inférieur de Draix

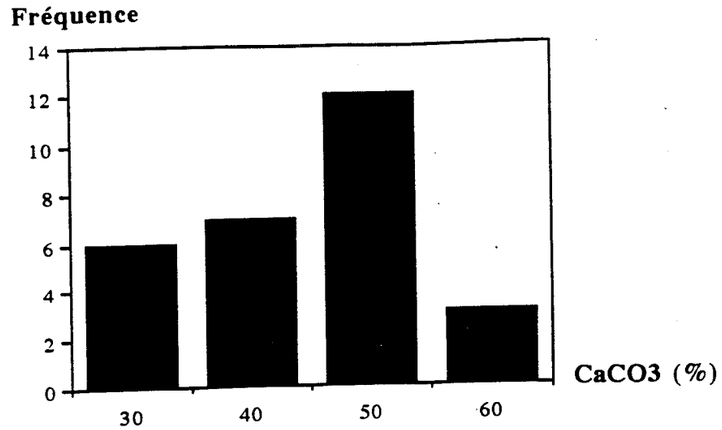


Fig.4.1d - Histogramme de % CaCO3 des TN rocheuses du Membre supérieur de Draix

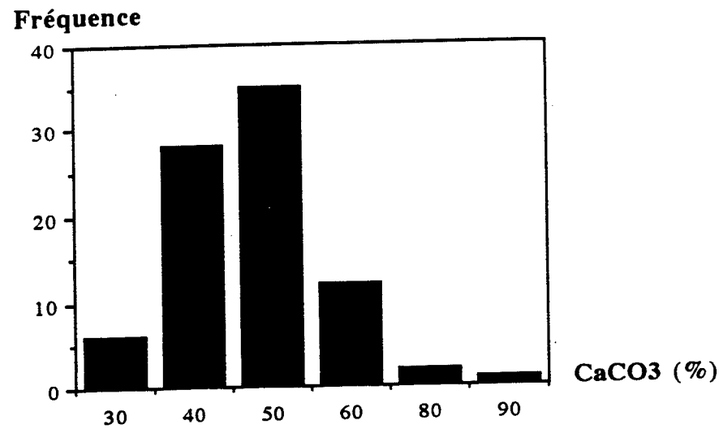


Fig.4.1e - Histogramme de % CaCO3 des TN altérées du Membre inférieur de Draix

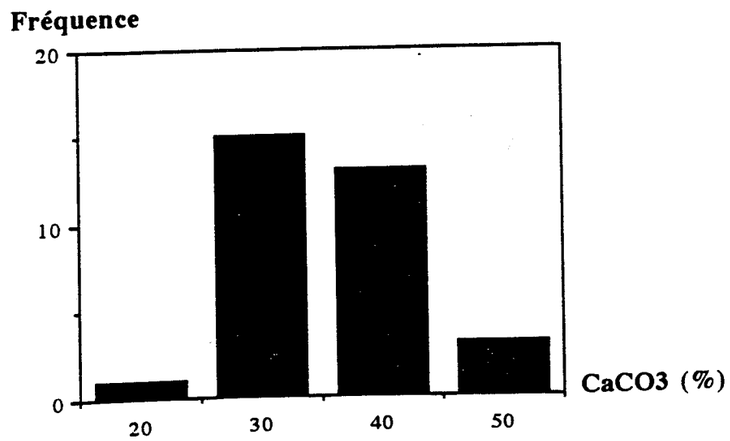


Fig.4.1f - Histogramme de % CaCO3 des TN altérées du Membre supérieur de Draix

Le tableau 4.3 donne les résultats que nous examinerons ci-après pour chaque secteur. Quelques histogrammes sont aussi présentés dans les figures 4.1 a,.....f.

Dans le Trièves

Selon ce tableau et les histogrammes 4.1 a, b on voit que les TN sont relativement hétérogènes quant à leur teneur en carbonate. Celle-ci varie selon les bancs échantillonnés, le degré d'altération, et même d'un échantillon à l'autre. Ainsi on notera:

- dans le Membre inférieur:
  - TN rocheuses: valeurs limites 23 et 49 %; valeur moyenne 33 %.
  - TN altérées: limites 21 et 38 %; moyenne 29 %.

- dans le Membre supérieur:
  - TN rocheuses: limites 20 et 79 %; moyenne 45 %.
  - TN altérées: limites 25 et 54 %; moyenne 35 %.

Dans le détail des TN saines on note:

-J_3: limites 20 et 40 %; moyenne 29 %.

-J_{3-4}: limites 35 et 69 %; moyenne 55 %.

-J_4: limites 43 et 79 %; moyenne 61 %.

Dans le détail des TN altérées on note:

-J_3: limites 25 et 44 %; moyenne 31 %.

-J_{3-4}: limites 33 et 54 %; moyenne 41 %.

-J_4: limites 28 et 69 %; moyenne 39 %.

On constate que:

- Les TN du Membre supérieur ont une teneur en carbonate nettement supérieure à celles du Membre inférieur. En examinant seulement le Membre supérieur, on trouve aussi que les TN d'âge J_4 contiennent plus de calcaire que celles d'âge J_3.

- Pour un même âge, les bancs marneux sont évidemment moins carbonatés que des bancs plus calcaires comme le montrent les résultats du tableau 4.3. L'échantillon 28A.rsT appartenant à un banc marneux contient en moyenne 46 % de calcaire, alors que

l'échantillon 28B.rsT, extrait d'un banc calcaire, en contient en moyenne 77 %.

- La teneur en carbonate varie toutefois dans un même banc. Les résultats du banc marneux 28A.rsT sont compris entre 43 et 53 %. De même, 9 essais effectués sur des échantillons du Col du Fau apparemment homogènes donnent des résultats qui s'étendent entre 27 et 40 %. Il existe ainsi des concrétions calcaires dans ces TN. C'est pour cela que l'on trouve dans la première couche d'altération, des échantillons ayant une teneur en carbonate très élevée comme 14A.aiD, 83 %, 7B.asT, 58 % (voir les * du tableau 4.3). Ce sont ces concrétions qui augmentent localement la teneur en carbonate et qui résistent le mieux au phénomène d'altération.

- A cause de la dissolution du calcaire dans le temps, le taux de carbonate diminue nettement dans les TN altérées: 28A.rsT en contient 43-53 % et 28C.rsT, 28-32 %.Dans les talus naturels, le phénomène se produit parfois en sens inverse, surtout dans les premiers centimètres. En consultant le tableau 4.3, on voit que les plaquettes de surface (4A.asT) contiennent entre 30 et 38 % de calcaire, tandis que le niveau massif peu altéré 4C.asT, situé à un dizaine de cm au-dessous de 4A.asT n'a que 20-29 % de calcaire. Ce paradoxe apparent tient au fait que:

+ l'eau, qui attaque la roche saine, monte dans les pores par capillarité et s'évapore en surface en "carbonatant" les produits meubles;

+ la perméabilité est bien plus forte dans les tranches 1 et 2 que dans le niveau 3 et une circulation hypodermique s'établit à chaque pluie au voisinage du contact 2/3, entraînant un lessivage du $CaCO_3$ dans les niveaux 1 et 2 et son accumulation au bas du talus.

Le phénomène de "carbonatation" produit un effet d'enduit sur la surface des talus. En saison sèche, on peut observer que les petites plaquettes et les paillettes sont solidarisées en surface et bien qu'apparemment noyées dans une matrice argileuse. Pourtant, l'essai de sédimentométrie (cf. 4.7) nous révèle une teneur en argile peu élevée, généralement inférieure à 10%. A part l'argile, l'enduit de carbonate a probablement contribué à coller les particules et augmenter la cohésion, ce qui sera révélé par l'essai de résistance au cisaillement à la boîte de Casagrande (cf. 5.1). L'effet d'enduit ne se produit pas entre des plaquettes dont la dimension est supérieure au centimètre.

Profondeur (m)	Teneur en $CaCO_3$ (%)	
	Cailloux	Sols fins
3,45	19,6 - 31,1	20,6
4,45	21,0 - 23,0	20,6
5,35	18,2 - 20,6	19,9
5,85	27,1 - 21,9	19,8
6,00	20,3 - 22,7	19,5
6,40	17,4 - 18,1	18,2
6,90	16,6 - 15,8	19,8
7,40	20,9 - 22,9	19,8
7,60	22,1 - 17,5	17,5
Fourchette des valeurs	16,6---31,1	17,5---20,6
Valeur moyenne	21,0	19,5

Tab 4.4 - Teneur en carbonate selon la profondeur et la taille des éléments des matériaux du remblai des Blancs

- Grâce à la dissolution et à la redistribution des carbonates dissous, la teneur en carbonate des sols fins du remblai des Blancs est plus homogène que celle des cailloux (les TN peu altérées) (tableau 4.4). La teneur moyenne en carbonate est de 21 %. C'est intéressant si l'on sait que les matériaux du remblai ont été extraits de l'affleurement voisin, qui est d'âge J_{3-4}. Auparavant, la roche saine était donc beaucoup plus carbonatée que les matériaux actuels. Si l'on suppose que le matériau initial contient 31 % de carbonate, il en aurait perdu 10 % en 17 ans. Mais compte tenu de ce que nous connaissons sur les TN saines, nous pouvons estimer que le faciès initial pouvait contenir 55 % de carbonate. Il en aurait perdu donc 34 % en 17 ans, soit 2 % par an. Cette perte de

calcaire est un chiffre non négligeable.

A Draix

Dans le bassin de Draix, les échantillons sont surtout les produits altérés superficiels et les produits de ruissellement sur les talus. Les TN moins altérées sont prises à quelques dizaines de centimètres en-dessous de la surface topographique (14B.riD, 15B.riD, 16B.riD).Seul l'échantillon 24B.rsD est une roche saine appartenant au lit rocheux du ruisseau.

La teneur en carbonate est très variable comme le montrent le tableau 4.3 et les histogrammes (4.1c,d,e,f)

- dans le Membre inférieur:
  - TN rocheuses: valeurs limites 27 et 74 %; valeur moyenne 45 %.
  - TN altérées: limites 27 et 83 %; moyenne 44 %.

- dans le Membre supérieur:
  - TN rocheuses: limites 23 et 53 % ; moyenne 38 %.
  - TN altérées: limites 13 et 46 %; moyenne 30 %.

- Sur l'histogramme 4.1c, les valeurs autour de 80 semblent trop élevées. Elles proviennent probablement des paillettes du banc carbonaté déposées sur la surface du talus, alors que les autres plaquettes marneuses s'effritent en éléments fins au cours de la ségrégation des matériaux.

- Ici, on retrouve le même résultat que celui du Trièves. Les produits altérés superficiels ont un taux de calcaire un peu plus élevé que les TN moins altérées sous-jacentes. Le 15A.aiD contient entre 37 et 42 % de carbonate tandis que le 15B.riD en contient entre 27 et 41 %. De même pour les échantillons 16A.aiD (27 et 46 %) et 16B.riD (29 et 35 %).

- On trouve que les TN du Membre inférieur contiennent plus de carbonate que ceux

du Membre supérieur. Ceci peut-être expliqué par le fait du prélèvement. En effet, les échantillons du Membre inférieur s'étendent entre la série alternée de bancs marno-calcaires et marneux du Bathonien moyen et le Niveau Médian. Les échantillons prélevés près de la série alternée contiennent plus de carbonate qu'ailleurs (11.aiD: 53 - 58 %, 17.aiD: 46 - 49 %, 18.aiD: 42 - 45 %). Cependant, la série supérieure a été prélevée en plein centre des TN, qui est marneux comme d'habitude.

- Le Niveau médian du bassin de Draix, qui sépare les deux Membres inférieur et supérieur est formé d'une alternance des bancs calcaires et marneux décimétriques. C'est donc le niveau le plus carbonaté dans la série des TN. Par contre, les zones encadrant ce niveau ne contiennent plus de calcaires par rapport aux autres. Le 16B.riD et le 23B.rsD ont été échantillonnés à une trentaine de mètres du Niveau médian. Or, leur teneur en carbonate n'est plus aussi élevée que dans les autres échantillons, voire très basse. En effet le 16B.riD contient entre 29 et 35 % de carbonate et le 23B.rsD en contient entre 41 et 46 %. Ceci montre qu'il s'est produit un changement brusque des apports continentaux dans le bassin de sédimentation pendant la période bathono-callovienne qui correspond au Niveau Repère Médian.

A Barcelonnette

Le tableau 4.3 nous montre la teneur en carbonate des produits altérés. On ne présente pas les histogrammes pour les échantillons de Barcelonnette car leurs résultats ne sont pas représentatifs, faute de nombre d'échantillons insuffisants.

- dans le Membre inférieur:
  - TN rocheuses: valeurs limites 30 et 33 %; valeur moyenne 31 %.
  - TN altérées: limites 25 et 44 %; moyenne 30 %.

- dans le Membre supérieur:
  - TN rocheuses: limites 12 et 28 %; moyenne 23 %.
  - TN altérées: limites 17 et 37 %; moyenne 30 %.

- Comme à Draix et en Trièves, on trouve toujours que la teneur en carbonate des produits altérés est plus élevée que celles des TN moins altérées comme le prouvent les

échantillons 35A.rsB: 26 - 27 %, 35B.asB: 33 - 37 %; 38A.asB: 32 - 34 %, 38B.rsB: 12 - 28 %.

- Les TN de Barcelonnette contiennent moins de carbonate que celles des deux autres secteurs.

A Boulc

La teneur en carbonate des marnes aptiennes, valanginiennes, oligocènes de Boulc semble être plus élevée que celles des TN, aussi bien dans la partie moins altérée que dans la tranche superficielle. On note aussi que les produits altérés contiennent moins de carbonate que les matériaux de transition. L'effet d'enduit n'a pas été observé dans ces marnes, au moins sur les lieux de prélèvement.

On peut conclure que le processus d'altération des TN est lié à la décarbonatation. Les TN possèdent un litage fin. On verra au paragraphe 4.12 (observations au microscope électronique à balayage) qu'entre les lits on observe des argiles, rarement des cristaux de carbonate, qui semblent noyés dans les paquets argileux. Les lits sont mal cimentés. Lorsque ces TN ont été mises à l'affleurement, la contrainte normale s'exerçant sur le plan de litage a fortement diminué. Les lits s'écartent, sous l'action des intempéries, la roche se désagrège rapidement en plaquettes. L'eau de ruissellement dissout le carbonate ce qui rend les plaquettes encore plus fragiles. Au M.E.B, la dissolution a été observée dans les TN saines et laisse des traces de calcaire dissous. Le processus se poursuit, les plaquettes se fragmentent en paillettes puis en limons sableux. Décarbonatation et délitage sont donc deux actions conjuguées.

4.4 La masse volumique humide

Comme la teneur en eau, la masse volumique humide (γ_h) n'a pas d'intérêt en général mais le remblai des Blancs est cité pour l'intérêt pratique. Elle est mesurée sur des carottes du remblai des Blancs, (sondage X371). Elle varie entre 2.007 et 2.05 g/cm^3, sauf entre 4,80 et 6,05 m de profondeur, où elle est de l'ordre de 1.81 g/cm^3 (tab.4.5).

Profondeur (m)	γ_h (g/cm³)
3,45 - 4,45	2,05
4,80 - 6,05	1,81
6,05 - 7,15	2,02
7,15 - 7,90	2,01

Tab. 4.5 - Masse volumique humide des carottes du remblai des Blancs

Si on prend la teneur en eau moyenne des carottes du remblai des Blancs égale à 10,6% et la masse volumique humide moyenne égale à 2,02 g/cm³, on aura une densité sèche moyenne égale à 1,83. C'est une valeur peu élevée pour les remblais routiers de même type.

Nous avons essayé de mesurer la masse volumique des plaquettes et des paillettes des TN selon la méthode au mercure afin d'établir la relation entre la teneur en carbonate et la masse volumique des plaquettes. Malheureusement, les résultats sont trop dispersés si bien qu'on ne peut les utiliser.

4.5 La masse volumique sèche.

La masse volumique sèche (γ_d) est mesurée par immersion. L'échantillon est carotté en éprouvettes de 39 - 50mm de diamètre et de 30 - 71mm de hauteur. Les tailles des éprouvettes ne sont pas identiques à cause du manque d'échantillons et des difficultés au cours du carottage (présentées ci-après). Ensuite il est séché et paraffiné. Le volume de l'échantillon est mesuré dans l'eau.

Seule la masse volumique sèche des échantillons extraits de la fouille du Fau au Trièves pouvait être obtenue selon la méthode décrite ci-dessus, car les échantillons sains

du Col du Fau ont posé beaucoup de problèmes pendant le carottage. A cause de la structure litée, des microfissures au long du litage et de la texture poreuse, l'échantillon s'effrite immédiatement au contact de l'eau qui sert à refroidir le carottier. La mesure de la masse volumique sèche du 30.rsT a enfin été réalisée directement sur les carottes venues du chantier. Les autres échantillons de type rocheux plus ou moins altéré de Draix et de Barcelonnette se délitent, eux aussi, facilement au moment de l'extraction si bien qu'on n'arrive pas à réaliser cette mesure.

Echantillon	γ_d (g/cm³)
28A.rsT	2,49
28B.rsT	2,62
28C.rsT	2,16
30.rsT	2,56

Tab. 4.6 - Masse volumique sèche des TN du Trièves

Les résultats présentés dans le tableau 4.6 montrent que la masse volumique sèche des TN de la fouille du Fau est de 2,16 g/cm³ pour le matériau peu altéré, 2,49 - 2,56 g/cm³ pour le matériau contenant environ 46 % de carbonate et 2,62 pour le matériau ayant plus de 72 % de calcaire. Sans commentaires pour l'échantillon 30.rsT, puisque la mesure a été faite par une méthode différente.

4.6 La porosité totale

On a réutilisé les échantillons après mesure de la masse volumique sèche pour calculer la porosité totale (n). Les dimensions des échantillons cylindriques 28A.rsT et 28B.rsT sont respectivement énumérées ci-après: 49,70 et 38,59 mm de diamètre; 71,00 et 30,52 mm de hauteur.

Les éprouvettes ont subi d'abord une désorption sous vide pendant 4 heures, puis

une immersion partielle sous vide dans de l'eau dégazée pendant 2 heures, et enfin une immersion entière avant le rétablissement de la pression atmosphérique. La durée de la dernière immersion est de 48 heures. Après celle-ci, les éprouvettes ont été séchées pendant 24 heures à l'étuve ventilée à 105 °C.

On calcule la porosité totale à l'aide de la masse de l'éprouvette saturée puis séchée. On a le rapport:

$$\frac{m_w - m_s}{V.\gamma_w} 100$$

où m_w : masse de l'éprouvette après 48h d'immersion

m_s : masse de l'éprouvette après 24h de séchage

V : volume de l'éprouvette

γ_w : masse volumique de l'eau prise en général égale à $1 g/cm^3$

L'échantillon marneux a une porosité totale plus élevée que l'échantillon plus carbonaté soit n= 10,4 % (28A.rsT) et n= 2,5 % (28B.rsT). Ainsi l'échantillon 28B.rsT a une structure dense avec une armature calcaire où les grains de calcite (ou de quartz) sont liés. Une chute de 20 à 30 % du carbonate (28A.rsT) amène un quadruplement de la porosité. Ceci peut-être expliqué par une texture plus lâche de l'échantillon, où le calcaire ne tient plus le rôle d'armature.

On ne peut pas mesurer la porosité totale pour les échantillons 28C.rsT et 30.rsT parce qu'ils s'effritent en présence d'eau, le 28C.rsT étant une TN altérée alors que le 30.rsT a une structure finement litée non stable. Si l'on mesure la porosité totale à l'aide de la formule ci-après:

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

où γ_s : densité des grains est égale à 2,65

Les résultats sont présentés dans le tableau 4.7. La porosité totale calculée est inférieure à celle mesurée (tab. 4.7) mais on a une idée sur l'échantillon 28C.rsT ayant une porosité de 19%. Ceci prouve que l'altération est un processus qui provoque

l'augmentation de l'indice des vides du sol au repos, définition établie par CHANDLER (1969) .

Echantillon	n (%)
28A.rsT	6
28B.rsT	1
28C.rsT	19
30.rsT	3

Tab.4.7: Porosité des échantillons du Trièves

4.7 Granulométrie et sédimentométrie

Réaliser un fractionnement sur ce type de matériau est une opération difficile et les résultats en sont dispersés. En effet, le tamisage par voie sèche donne une teneur en fines peu élevée, parce que les éléments fins s'accolent entre eux. Par contre, le tamisage par voie humide donne une teneur en fines très élevée, puisque les plaquettes rocheuses se délitent alors facilement. La variation de la teneur en fines en tamisant par voie humide dépend de plusieurs facteurs. Les facteurs opératoires sont le temps de tamisage et la quantité d'eau écoulée.Les facteurs intrinsèques sont la teneur en carbonate, la répartition relative entre les grains de calcite et les particules argileuses dans la structure et la qualité du collage des lits.

Si l'on adopte le tamisage par voie humide comme moyen pour établir une courbe granulométrique relativement fiable, combien de temps, au maximum, doit durer le tamisage? La méthode que nous avons utilisée pour comparer les résultats par voie sèche et humide est décrite ci-dessous.

Le tamisage par voie sèche est réalisé normalement, après avoir séché les échantillons.

Le tamisage par voie humide a été effectué pendant une demi-heure sous un petit filet d'eau. Au bout de ce temps, l'eau sortait claire, preuve d'une action relativement discrète sur le matériau.

Pour les échantillons du remblai des Blancs très différents des autres cas (cailloux ou graviers collés ou noyés dans une matrice argileuse) on a adopté une démarche différente.

- par voie sèche: on opère le tamisage traditionnel c'est-à-dire avec la série normalisée des mailles 20 ...0,074 mm;

- par voie humide: Le tamisage comporte 3 étapes:

. lavage de l'échantillon sur le tamis à maille de 1 mm.

. - séchage des éléments retenus
  - tamisage à sec sur la série normalisée 20 ...0,074 mm
  - pesée des refus.

. sédimentométrie des éléments < 0,074 mm.

La première étape permet de détacher les éléments fins collés aux plus gros, mais ce lavage étant rapide le délitage des éléments volumineux est réduit au minimum et leur taille initiale relativement préservée.

La différence granulométrique entre le tamisage par voie humide et par voie sèche est mise en évidence dans le tableau 4.8. Il faut noter que le tamisage par voie sèche des échantillons de Barcelonnette n'a pas été réalisé car ils étaient au début très humides, et après séchage, les paillettes se retrouvaient collées. Mais en tentant de les détacher à la main, elles se brisaient partiellement, tant elles étaient altérées.

D'après le tableau 4.8, on constate que:

- un produit altéré peut libérer plus de 80 % de fines au tamisage par voie humide, au lieu de 2 % par voie sèche (5B.asT, 23A.asD). Ce fait sera bien illustré par les courbes granulométriques (fig. 4.2 et annexe 2). On voit que les tamisages du même matériau par deux voies différentes se traduisent par des courbes décalées de 2 ou 3 puissances de 10.

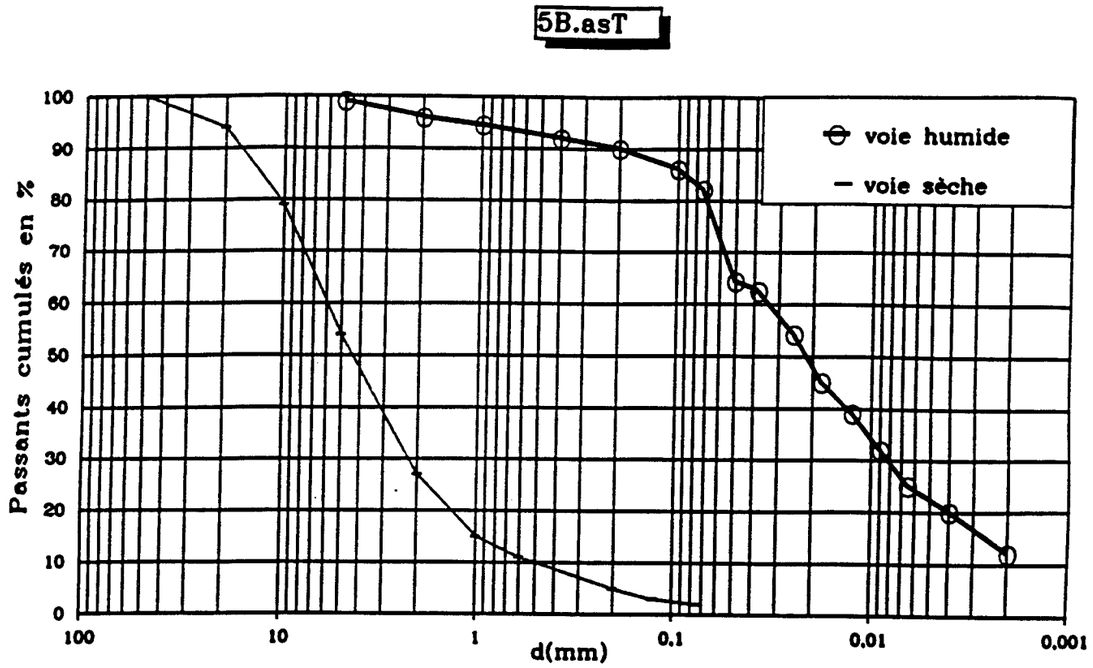
Echantillon	Voie sèche % < 74 µm	Voie humide	
		% < 74 µm	% < 2µm
5B.asT	2	82	12
7C.asT	1.7	56	11
9A.asT	4	76	4
29.asT	18 - 27	30 - 60	5
43A.aiT	-	89	2
45A.aiT	-	82	1
10A.aiD	-	85	6
21D.asD	3	68	8
23A.asD	4	86	10
36.a?B	-	73	3
37A.asB	-	87	5
37B.asB	-	63	3
38C.a?B	-	80	5
39A.aaL	-	96	10
40A.avL	-	90	8
41A.aoL	-	87	4
42A.avL	-	87	14

tout Poche

) La Vallette

) R.Bdx

Tab. 4.8 - Différences granulométriques introduites par le mode de tamisage



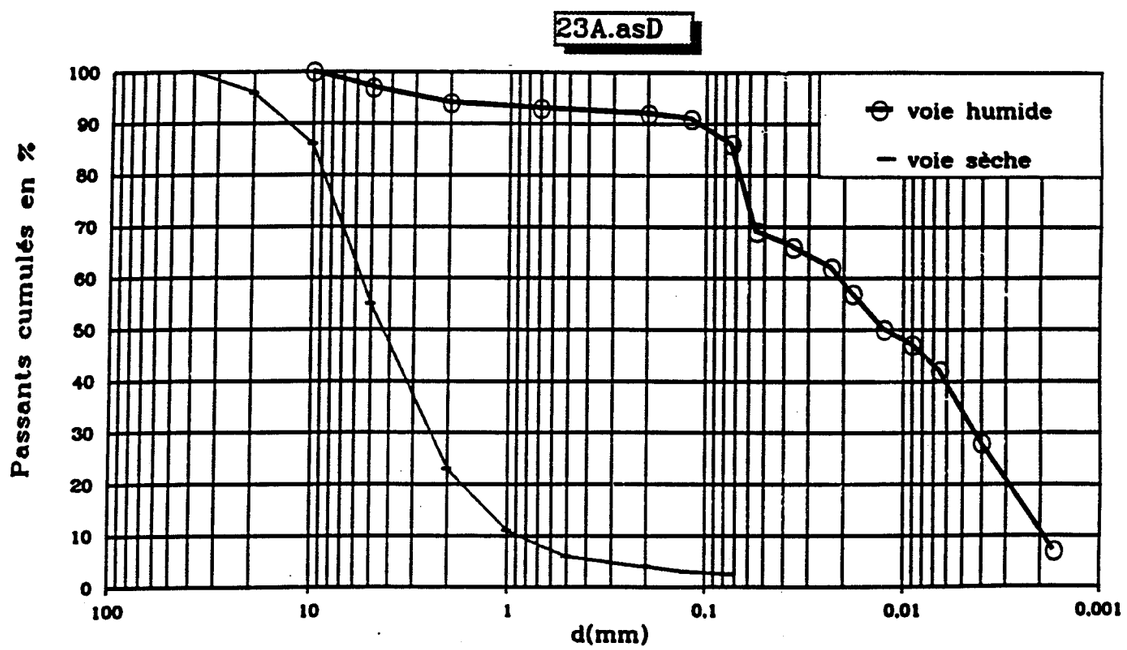
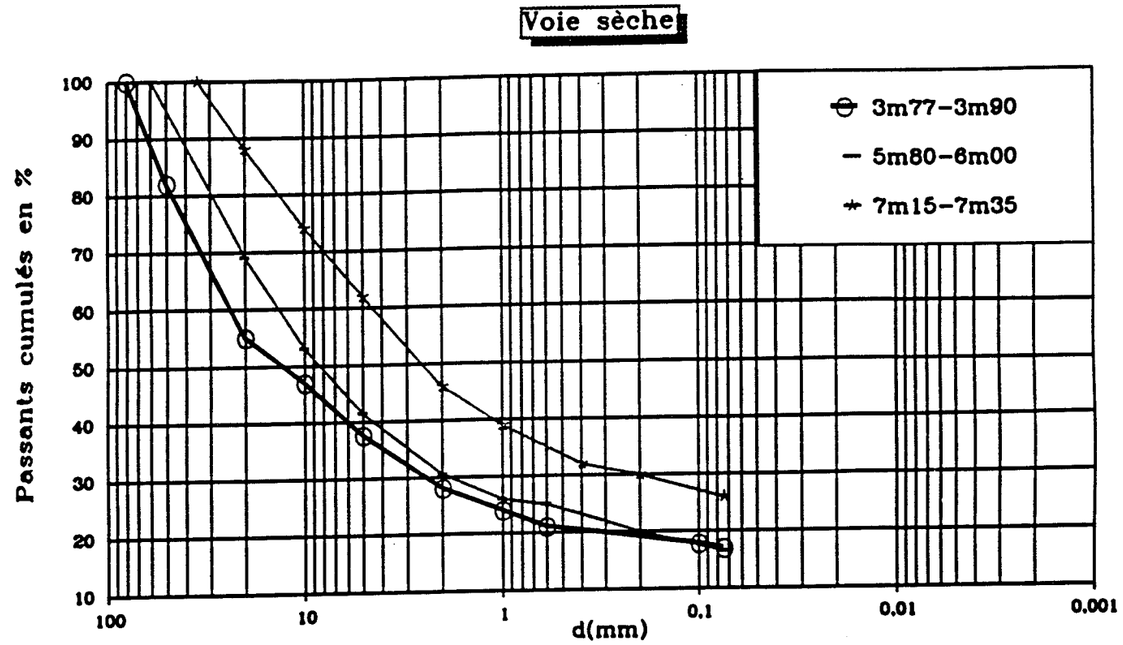


Fig.4.2a - Courbes granulométriques comparées voie sèche - voie humide



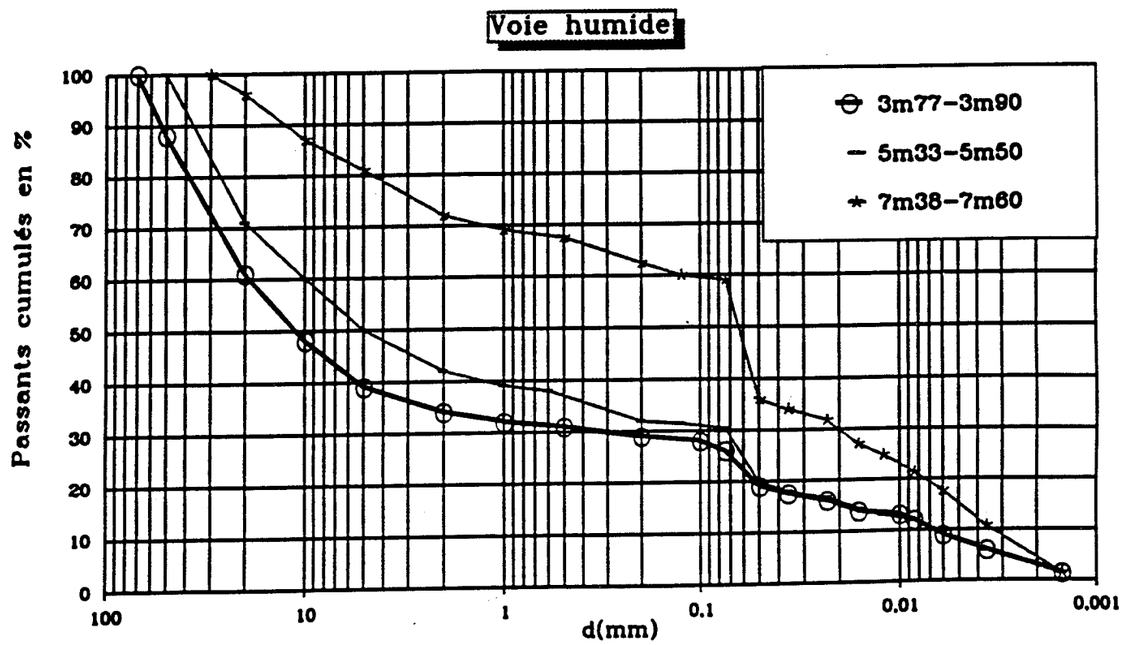


Fig. 4.2b - Courbes granulométriques des matériaux du remblai des Blancs

Tirée vers la droite, la courbe de la voie humide indique l'abondance des fines. Ce décalage peut traduire individuellement que les grains ont subi une réduction comprise entre 100 et 1000 fois. La signification des teneurs en fines ou en argiles de ce matériau n'a donc q'un sens relatif;

- la partie inférieure à 0,1 mm de la courbe "voie humide" a une allure semblable à celle de la courbe "voie sèche". Seule la partie supérieure à 0,1 mm de la première, existant en petite quantité, révèle des corps étrangers dans les constituants comme des cailloux de calcaires;

- les courbes granulométriques étalées révèlent des sols mal gradués;

- la teneur en argiles des TN altérées est très basse, surtout en ce qui concerne les échantillons de Barcelonnette. En effet elles contiennent de 56 à 87 % de fines (éléments < 0,074 mm) mais seulement 1 à 12 % de particules < 2 µm. Les TN sont donc des limons argileux;

- les courbes granulométriques des matériaux du remblai des Blancs (29.asT) nous montrent que leur teneur en fines varie en fonction de la profondeur. A 5,33 et 7,38 m, on a une teneur en fines respectivement de 30 et 60 %. La teneur en argiles ne varie pratiquement pas car elle est très faible. L'augmentation des fractions fines en fonction de la profondeur s'explique par l'existence des formations quaternaires très humides à 7,90 m qui favorise l'altération de la couche sus-jacente.

4.8 Les limites d'Atterberg

Ce type d'essai a été réalisé sur **des produits altérés**.Les échantillons ont été lavés au tamis 0,4mm avant d'être soumis aux essais de limite de liquidité puis de limite de plasticité.Les valeurs mesurées sont indiquées dans le tableau 4.9. Globalement, les limites d'Atterberg des Membres supérieur et inférieur des trois secteurs ont des valeurs rapprochées:

Echantillon	Limites d'Atterberg		
	W_L (%)	Wp (%)	Ip (%)
1.asT	31	14	17
4A.asT	25	14	11
4D.asT	30	20	10
4E.asT	30	22	8
5A.asT	29	19	10
5B.asT	31	17	14
7B.asT	25	13	12
7C.asT	25	13	12
9A.asT	26	20	6
29.asT	24	16	8
31A.aiT	30	21	9
31B.aiT	26	18	8
43A.aiT	29	18	11
44B.aiT	31	20	11
45A.aiT	29	18	11
10A. aiD	29	20	9
10C.aiD	31	21	10
10D.aiD	32	22	10
11.aiD	27	13	14
12.aiD	28	20	8
13.aiD	29	20	9
14A.aiD	29	14	15
15A.aiD	29	19	10
16A.aiD	30	21	9
21.asD	27	13	14
22A.asD	29	13	16
23A.asD	37	28	9

Tab. 4.9 - Limites d'Atterberg des TN altérées

Echantillon	Limites d'Atterberg		
	WL (%)	Wp (%)	Ip (%)
32A.aiB	31	19	12
32B.aiB	37	29	8
33A.aiB	30	18	12
34.a?B	32	21	11
35B.asB	30	18	12
36.a?B	30	20	10
37A.asB	26	17	9
37B.asB	26	18	8
38A.asB	32	20	12
38C.a?B	26	16	10
39A.aaL	40	23	17
40A.avL	44	25	19
41A.aoL	26	14	12
42A.avL	42	24	18

- Dans le cas du Trièves, la limite de liquidité (W_L) varie entre 24 et 31 % (valeur moyenne, 28 %), l'indice de plasticité (Ip) entre 6 et 17 % (moyenne, 11 %).

- Pour le bassin de Draix, W_L varie entre 27 et 37 % (moyenne, 30 %) et Ip de 8 à 16 % (moyenne, 11 %).

- A Barcelonnette, W_L va de 26 à 37 % (moyenne, 30 %) et Ip de 8 à 12 % (moyenne, 11 %).

On constate que, pour toutes ces TN, la fraction inférieure à 0,4 mm manifeste un comportement homogène et que les Ip sont très faibles ce qui montre bien la dominante silteuse.

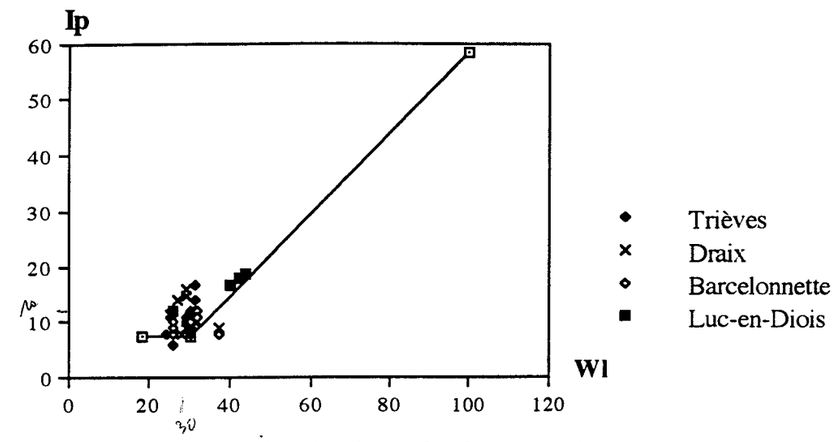


Fig.4.3 : Diagramme de plasticité de Casagrande

Les points présentés sur le diagramme de plasticité de Casagrande (fig. 4.3) sont assez concentrés. Ils se répartissent autour des valeurs 30 pour W_L et 10 pour Ip. Selon ce diagramme, les produits d'altération des TN doivent être classés dans le groupe des argiles peu plastiques Ap. Comparées aux TN, les marnes de Boulc ont des limites d'Atterberg un peu plus élevées. Leur limite de liquidité varie entre 40 et 44 % et leur indice de plasticité entre 17 et 19%. Seuls les marnes oligocènes (41A.aoL) ont des limites d'Atterberg semblables à celles des TN: W_L= 26 % et Ip= 12 %. Elles appartiennent aussi au groupe "argiles peu plastiques".

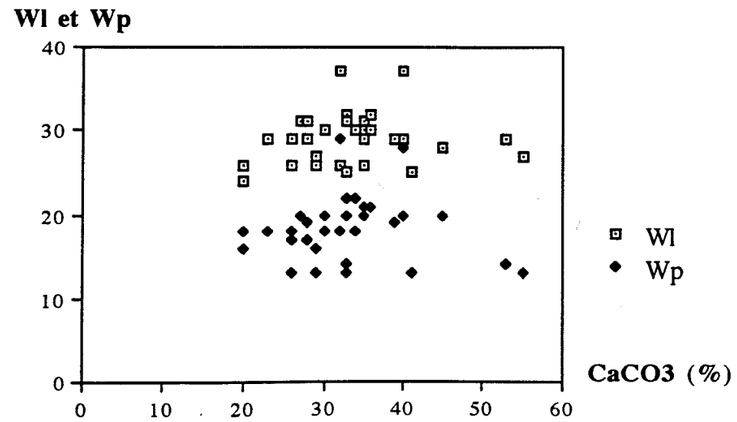


Fig. 4.4 - Variation des teneurs en carbonate en fonction de Wl et Wp

Le diagramme présentant correspondance entre teneur en carbonate, limite de

liquidité et limite de plasticité a été établi afin de mettre en évidence les paramètres les plus représentatifs (fig.4.4). On y voit nettement que les limites d'Atterberg sont indépendantes de la teneur en carbonate

Les passages aux rayons X révèlent des interstratifiés illite - smectite dans la composition minéralogique des échantillons du Trièves et de Draix mais ceux de Barcelonnette n'en comportent pratiquement pas. Pourtant, tous ces sols ont une W_L et un Ip également faibles, et ce dernier indice a une valeur constante pour tous les échantillons. L'existence des smectites semble donc n'y avoir aucune influence sur les limites d'Atterberg. Ce fait peut être expliqué par une faible proportion d'argiles gonflantes, une teneur en particules < 2µm peu élevée (1 à 12%) et une grande teneur en limons (50 à 70%), qui neutralisent l'effet lubrifiant des particules argileuses dans le mortier. Or c'est cette lubrification qui rompt la structure initiale du matériau, lui conférant plasticité puis liquidité, mais, dans le cas présent elle ne peut se produire, faute d'une proportion suffisante de phase argileuse. D. LAUTRIN (1989) a précisé que le seuil granulométrique au delà duquel cette phase argileuse impose son comportement se situe vers 20 - 25 % vis-à-vis de W_L et 30 - 35 % pour Ip. En deçà, les limites d'Atterberg ne traduisent pratiquement rien de la présence des argiles.

A l'aide des résultats des tableaux 4.8 et 4.9, on peut calculer le coefficient d'activité de Skempton, défini par le rapport de l'indice de plasticité à la teneur en argile:

$$A_c = \frac{Ip}{\% < 2\mu m}$$

Par référence à l'Ac, Skempton a défini, en 1963, cinq groupes de sols.

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
Sol inactif	Sol inactif	Sol normal	Sol actif	Sol très actif
$A_c<0.5$	$0.5<A_c<0.75$	$0.75<A_c<1.25$	$1.25<A_c<2$	$A_c>2$

Nous avons calculé le coefficient de Skempton pour quelques échantillons de TN (tab.4.10).

Echantillon	Ip	% < 2µm	A_c	Classification
43A.aiT	11	2	5,5	très actif
21.asD	14	8	1,7	actif
36.a?B	10	3	3,3	très actif
37B.asB	8	3	2,7	très actif
38C.asB	10	5	2	très actif

Tab. 4.10 - Valeurs du coefficient de Skempton

A priori, les valeurs obtenues pour A_c nous paraissent trop élevées (voire l'échantillon 43A.aiT a un A_c égal à 5,5), puisqu'elles cantonnent les TN altérées parmi des matériaux actifs ou très actifs. Or, puisque les argiles gonflantes (cf.4.10) n'y sont pas prépondérantes, cette valeur élevée ne peut tenir qu'à une sous-estimation de la fraction inférieure à 2µm ou à une surestimation de Ip. En ce qui concerne Ip, les valeurs de bleu (cf. 4.9), qui varient entre 1 et 2,5 correspondent aux valeurs de Ip compris entre 6 et 12 %. Finalement, l'anomalie est donc obligatoirement liée à une sous-estimation de la teneur en fraction inférieure à 2µm. Il est probable que cette sous-estimation est due au fait que la solution à 5 % d'hexamétaphosphate de sodium de défloculant ne parvient pas à bien séparer les grains. En effet, les TN contiennent des matières organiques qui cimentent les particules argileuses et gênent l'action des produits défloculant: elles ont été observées sous le microscope polarisant.

4.9 L'essai au bleu de méthylène

4.9.1 Définition

Cet essai permet de mesurer la capacité d'adsorption ionique d'un sol à l'aide de bleu de méthylène, et a pour but de caractériser globalement la fraction argileuse qu'il contient.

On appelle valeur de bleu des fines (VB) la quantité de bleu de méthylène, exprimée en g, adsorbée par 100 g de fines.

4.9.2 Principe de l'essai

Cet essai a été réalisé sur les produits altérés selon la norme AFNOR P18-592.
Une prise d'essai égale à

$$M_h = \frac{f'\ (w+100)}{f} \qquad (1)$$

où M_h : masse humide de la prise d'essai (g)
w : teneur en eau (%)
f : teneur en fines (%)
f' : quantité de fines qu'il est souhaitable d'avoir dans la prise d'essai (g). On choisit entre 10, 20, 30 g. Ici, f' a toujours été prise à 30 g

est mise dans un bécher de 500 cc avec 200 cc d'eau distillée.

A l'aide d'un agitateur à ailettes, l'ensemble est agité à 700 tr/mn pendant une minute, puis 400 tr/mn pendant toute la durée de l'essai. Les ailettes sont situées à 1cm au-dessus du fond du récipient.

A l'aide d'une burette, on injecte dans le bécher une dose de 5 cc de solution de bleu dosée à 10 g/l de bleu de méthylène. Cette addition est suivie du test de la tache sur le papier filtre à l'aide d'une baguette de verre. La goutte de suspension qu'on dépose sur

le papier forme une tache composée d'un dépôt central de matériau coloré d'un bleu sombre et entouré d'une zone humide (auréole) incolore.

Le test est dit positif si, dans cette zone humide, on a une couleur bleu clair; il est dit négatif si la zone est incolore.

On recommence l'injection jusqu'à ce que le test devienne positif. On cesse alors l'injection et laisse s'opérer l'adsorption du bleu, tout en effectuant des tests de minute en minute.

. Si l'auréole bleu-clair persiste à la 5e minute, l'essai est terminé.

. Si l'auréole bleu-clair se décolore avant la 5e minute, on procède à de nouvelles additions élémentaires de bleu:

.. soit de 5 cc si le volume de solution déjà introduit est supérieur ou égal à 30 cc.

.. soit de 2 cc si ce volume est inférieur à 30 cc.

- La valeur de bleu des fines, exprimée en grammes de bleu pour 100 g de fines, est donnée par la formule:

$$VB = \frac{V}{f'} \qquad (2)$$

où VB: valeur de bleu pour 100 g de fines (g)
V : volume final de solution injectée (cc)

4.9.3 Exécution de l'essai

Au premier temps, nous avons réalisé l'essai sur des fractions granulométriques différentes, selon le type d'échantillon.

Pour les TN altérées, l'essai a été réalisé sur l'échantillon complet. La valeur de bleu mesurée est celle du sol global (VB0/D). On l'appelle **"VB0/D mesurée"**.

Pour les matériaux du remblai des Blancs (29.asT), l'essai a été réalisé sur les fractions fines. L'échantillon a été lavé au tamis 0,074 mm et le tamisat a été pris pour effectuer l'essai. La valeur de bleu ainsi mesurée est celle de la fraction 0/74 µm

(VB0/74). On en déduit une valeur de bleu du sol global en se référant à la courbe granulométrique (Tran Ngoc Lan, 1981), c'est-à-dire:

$$VB0/D = VB0/74\ \mu m \ \times\ \%\ 0/74\ \mu m \qquad (3)$$

On nomme cette valeur de bleu "**VB0/D calculée**".

Pour les TN saines ou moins altérées, à l'heure actuelle, nous n'avons pas encore une norme d'essai au bleu pour des roches. Nous avons donc adopté une procédure qui consiste à broyer finement l'échantillon et à utiliser pour l'essai la totalité de la fraction fine (< 0,074 mm) ainsi obtenue . La valeur de bleu mesurée est bien celle du sol global, mais n'est pas comparable à la valeur "VB0/D mesurée". Les valeurs obtenues pour ce dernier sont signalées par un astérisque.

4.9.4 Résultats

Les résultats sont regroupés dans le tableau 4.11. D'après ces résultats on constate que:

- les valeurs de bleu mesurées sont très faibles ce qui est en accord avec la plupart des autres mesures;

- les TN de Draix et du Trièves ont des valeurs de bleu semblables mais celles de Barcelonnette sont un peu moins élevées. Les valeurs diffèrent selon que les faciès sont rocheux ou altérés, mais non pas entre Membre supérieur ou inférieur.

Pour chaque tranche de l'horizon d'altération, on note:

- les TN saines (troisième tranche) ont des valeurs de bleu variant de 0,8 à 1,3 selon la teneur en carbonate (28B.rsT: 0,8; 28A.rsT:1,1; 30.rsT: 1,3);

- les TN moins altérées (deuxième tranche) de Draix et du Trièves ont des valeurs de bleu de 1,2 à 1,8 selon l'état d'altération, c'est-à-dire selon la teneur en argiles. Plus les roches sont altérées, plus les argiles se libèrent, plus leur valeur de bleu augmente.

Echantillon	VB 0/D mesurée	Echantillon	VB 0/D mesurée
1.asT	2,3	10A.aiD	2,4
4A.asT	1,8	10B.aiD	1,2
4B.rsT*	1,3*	10C.aiD	2,2
4C.rsT*	1,3 *	10D.aiD	1,8
4D.asT	1,7	10E.aiD	1,5
4E.asT	2,5	11.aiD	1,0
5A.asT	2,5	12.aiD	1,2
5B.asT	2,5	13.aiD	1,2
7A.asT	1,3	14A.aiD	1,4
7B.asT	1,3	15A.aiD	1,2
7C.asT	2,5	16A.aiD	1,4
8.rsT*	1,7*	21C.asD	3,2
9A.asT	1,5	21D.asD	2,2
9B.rsT*	1,2*	23A.asD	2,0
28A.rsT*	1,1*	32A.aiB	0,8
28B.rsT*	0,8*	33A.aiB	1,3
28C.rsT*	1,8*	33B.aiB	0,5
28D.rsT*	1,5*	33C.riB*	0,5*
28E.rsT*	1,6*	35A.rsB*	0,6*
30.rsT*	1,3*	36.a?B	1,0
31A.aiT	1,0	37A.asB	0,7
31B.aiT	1,1	37B.asB	1,0
43B.riT*	0,7*	38B.asB	0,6
44A.riT*	1,0*	38C.a?B	1,1
45B.riT*	0,7*		

Tab. 4.11 - Valeur de bleu des TN saines et altérées

Ainsi, le 28C.rsT est plus altéré que le 28E.rsT. L'un a une valeur de bleu de 1,8 et l'autre de 1,6. Les deux échantillons de Barcelonnette ont une valeur de bleu basse: environ 0,5 (33C.riB, 35A.rsB);

- les valeurs de bleu des TN altérées (première tranche) du Trièves, à part celles du remblai des Blancs, varient de 1,3 à 2,5 (moyenne, 2,1). Celles de Draix varient entre 1,0 et 3,2 (moyenne, 1,8). Celles de Barcelonnette entre 0,5 et 1,3 (moyenne, 0,7).

Les valeurs de bleu des matériaux du remblai des Blancs varient de 0,4 à 1,1 (tab.4.12). Elles augmentent apparemment avec la profondeur du remblai, c'est-à-dire avec l'augmentation de la teneur en fines.

Profondeur	VB 0/74 µm	VBO/D calculée
3,77 - 3,90 m	2,5	0,4
5,33 - 5,50 m	3,0	0,5
7,15 - 7,35 m	3,2	0,8
7,38 - 7,60 m	2,8	1,1

Tab. 4.12 - Valeur de bleu des matériaux du remblai des Blancs

Au deuxième temps, nous constatons que l'usage du paramètre **f** (teneur en fines) dans la formule de la prise d'essai (1) constituant une gêne. Nous avons en effet souligné (cf. 4.7) qu'il ne traduit pas une propriété intrinsèque du matériau mais varie avec le mode opératoire (sec ou humide) choisi. Pour révéler son influence sur la valeur de bleu, nous avons pensé qu'il serait intéressant de disposer, pour un certain nombre d'échantillons, des deux valeurs de VB0/D mesurée et calculée définies précédemment, afin de les confronter systématiquement.

Les valeurs du tableau 4.13 nous montrent que la VB0/D calculée est bien différente et souvent inférieure à la VB0/D mesurée. Cette infériorité est due à la sous estimation de la teneur en fines, qui diminue la VB0/D calculée dans la formule (3), et au contraire

augmente la VB0/D mesurée en amenant à augmenter la prise d'essai dans la formule (1).

Echantillon	VB 0/74µm	VB 0/D calculée	VB 0/D mesurée
5B.asT	3,3	2,7	2,5
7C.asT	2,5	1,4	2,5
9A.asT	2,6	2,0	1,5
9B.asT	2,0	1,0	1,2
31A.aiT	1,0	0,5	1,0
31B.aiT	1,2	0,5	1,1
10A.aiD	2,8	2,4	2,4
21C.asD	2,8	0,9	3,2
21D.asD	2,8	2,0	2,2
23A.asD	2,2	1,9	2,0
32A.aiB	1,7	0,3	0,8
33A.aiB	1,5	1,3	1,3
33B.aiB	1,3	0,4	0,5
36.a?B	1,6	1,2	1,0
37A.asB	1,0	0,9	0,7
37B.asB	1,2	0,8	1,0
38B.asB	1,5	0,8	0,6
38C.asB	1,3	1,1	1,1

Tab.4.13 - Comparaison entre les VB0/D calculées et les VB0/D mesurées

Si l'on examine la nouvelle classification des matériaux, (édition 1992 de la RTR - Recommandations des Terrassements Routiers, page 71), on voit y apparaître l'usage d'une nouvelle "valeur de bleu". On a redéfini la valeur de bleu d'un sol par le paramètre

VBS comme suit: " La quantité de bleu de méthylène adsorbée par l'échantillon soumis à l'essai n'est pas rapportée à 100 g de fines (< 80 µm), comme indiqué dans le norme Afnor P 18-592, mais à 100 g du sol étudié ou à 100 g de sa fraction 0/50 s'il contient des éléments supérieurs à 50 mm."

Et si l'on examine les formules (1), (2), (3) et la nouvelle définition on constate que la VB0/D calculée est exactement la VBS. L'explication détaillée de la méthode calculée est exposée dans l'annexe 3.

C'est pour cette raison que nous proposons de parler pour les TN altérées:

- soit, de la valeur de bleu des fractions fines VB0/74 µm, au lieu de valeur de bleu du sol global VB0/D, car c'est la première qui est vraiment la propriété intrinsèque des fines du matériau et qui peut exprimer quantitativement "l'argilosité" du sol;

- soit, de la VBS déduite de la VB0/74 µm (ou VB0/D calculée), pour comparer et classer la totalité des sols naturels.

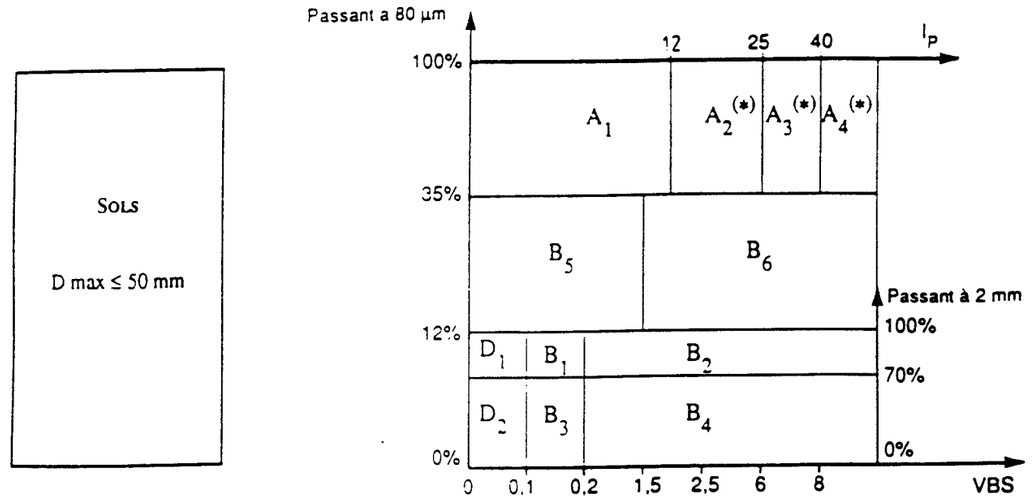
Pour faciliter la lecture, le tableau 4.14a récapitule tous les résultats de VB0/74 µm, VB0/D calculée et VB0/D mesurée.

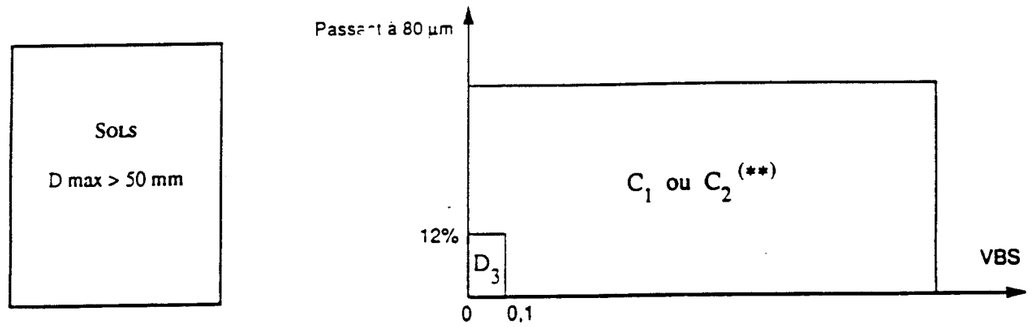
Il faut souligner que les échantillons 8.asT et 9B.asT ont été altérés au labotatoire par 5 cycles de séchage - humidification. Ils donnent une valeur de bleu semblable aux autres échantillons altérés naturellement. Les commentaires de ce résultat seront détaillés au paragraphe 6.1.

A propos des marnes de Boulc (tab. 4.14b), on constate que:

- les valeurs de bleu sont nettement supérieures à celles des TN, ce qui rejoint un caractère déjà signalé à propos de Ip;

- l'échantillon 41A.aoL a des limites d'Atterberg semblable à celles des TN altérées mais sa valeur de bleu est nettement supérieure. L'augmentation de cette dernière est





MATÉRIAUX ROCHEUX	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R_1
			Calcaires	R_2
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R_3
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R_4
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R_5
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites..., gneiss..., schistes métamorphiques et ardoisiers...		R_6
MATERIAUX PARTICULIERS	Sols organiques, sous-produits industriels			F

* Matériaux pour lesquels la mesure de l'I_p est à retenir comme base de classement. Pour les autres matériaux on utilisera la VBS.

** C_1 matériaux roulés et materiaux anguleux peu charpentés (0/50 > 60 à 80 %)

C_2 matériaux anguleux très charpentés (0/50 ≤ 60 à 80 %)

Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature (RTR 92)

Echantillon	VB 0/74 µm	VB 0/D calculée	VB 0/D mesurée
10A.aiD	2,8	2,4	2,4
10B.aiD	-	-	1,2
10C.aiD	-	-	2,2
10D.aiD	-	-	1,8
10E.aiD	-	-	1,5
11.aiD	-	-	1,0
12.aiD	-	-	1,2
13.aiD	-	-	1,2
14A.aiD	-	-	1,4
15A.aiD	-	-	1,2
16A.aiD	-	-	1,4
21C.asD	2,8	0,9	3,2
21D.asD	2,8	2,0	2,2
23A.asD	2,2	1,9	2,0
32A.aiB	1,7	0,3	0,8
32B.aiB	1,7	1,1	-
33A.aiB	1,5	1,3	1,3
33B.aiB	1,3	0,4	0,5
33C.riB*	-	-	0,5*
34.a?B	1,4	1,0	-
35A.rsB*	-	-	0,6*
35B.asB	1,3	0,5	-
36.a?B	1,6	1,2	1,0
37A.asB	1,0	0,9	0,7
37B.asB	1,2	0,8	1,0
38A.asB	1,3	1,2	-
38B.asB	1,5	0,8	0,6
38C.a?B	1,3	1,1	1,1

Tab. 4 .14a - Récapitulation des valeurs de bleu des TN

Echantillon	VB 0/74 µm	VB 0/D calculée	VB 0/D mesurée
1.asT	-	-	2,3
4A.asT	-	-	1,8
4B.rsT*	-	-	1,3*
4C.rsT*	-	-	1,3*
4D.asT	-	-	1,7
4E.asT	-	-	2,5
5A.asT	-	-	2,5
5B.asT	3,3	2,7	2,5
7A.asT	-	-	1,3
7B.asT	-	-	1,3
7C.asT	2,5	1,4	2,5
8.rsT*	-	-	1,7*
8.asT	3,3	1,6	-
9A.asT	2,6	2,0	1,5
9B.asT	2,0	1,0	1,2
28A.rsT*	-	-	1,1*
28B.rsT*	-	-	0,8*
28C.rsT*	-	-	1,8*
28D.rsT*	-	-	1,5*
28E.rsT*	-	-	1,6*
29.asT	-	0,4 - 1,1	-
30.rsT*	-	-	1,3*
31A.aiT	1,0	0,5	1,0
31B.aiT	1,2	0,5	1,1
43A.aiT	2,0	1,8	-
43B.riT*	-	-	0,7*
44A.riT*	-	-	1,0*
44B.aiT	2,2	1,4	-
45A.aiT	2,2	1,8	-
45B.riT*	-	-	0,7*

Tab. 4 .14a - Récapitulation des valeurs de bleu des TN

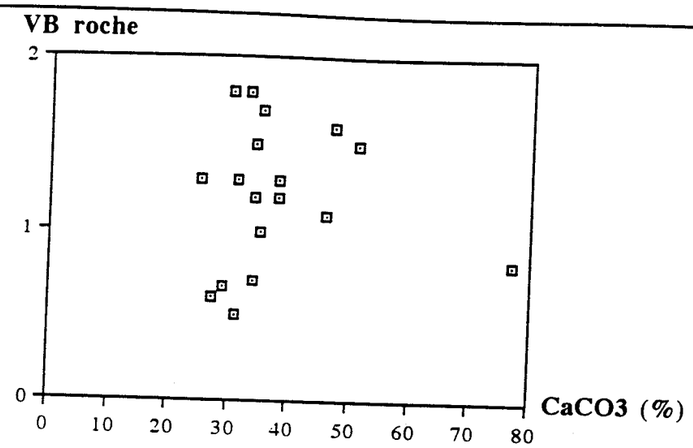


Fig.4.5a: Variation de la valeur de bleu en fonction de la teneur en carbonate des faciès rocheux

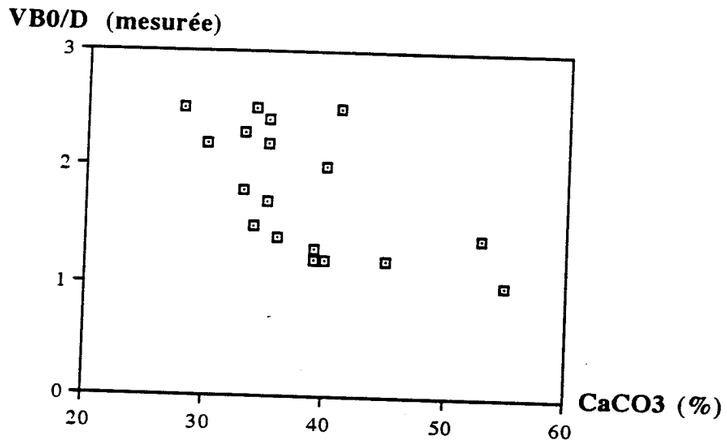


Fig.4.5b: Variation de la valeur de bleu en fonction de la teneur en carbonate des TN altérées

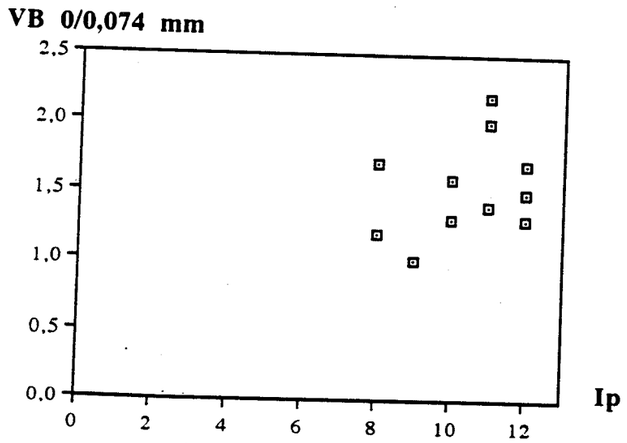


Fig. 4.6 - Variation de la valeur de bleu des fractions 0/0,074 mm en fonction de l'indice de plasticité

provoquée par l'existence de montmorillonite, révélée par le passage de l'échantillon aux rayons X .

Echantillon	VB 0/74µm	VB 0/D calculée	VB 0/D mesurée
39A.aaL	5,0	4,8	-
39B.raL*	-	-	2,3*
40A.avL	4,3	3,9	-
40B.rvL*	-	-	1,8*
41A.aoL	4,2	3,6	-
41B.roL*	-	-	1,7*
42A.avL	6,8	5,9	-
42B.rvL*	-	-	4,2*

Tab.4.14b - Valeur de bleu des marnes de Boulc

Selon la nouvelle classification de RTR (page 71), partant de la granulométrie, des limites d'Atterberg et de la valeur de bleu, on peut placer:

- les TN altérées dans les groupes A_1 et A_2;
- les marnes de Boulc dans A_2.

Les diagrammes 4.5a, 4.5b et 4.6 ont été établis afin de déceler une relation éventuelle entre valeur de bleu, teneur en carbonate et indice de plasticité. Il n'apparaît pas de corrélation flagrante entre ces paramètres, mais tout au plus une tendance à la diminution de la valeur de bleu lorsque la teneur en carbonate des TN augmente, et à l'augmentation si l'indice de plasticité croît. Les carbonates gêneraient-ils la pénétration de bleu entre les feuillets argileux? Et d'autre part, la corrélation entre % $CaCO_3$ et VB qui semble se dégager des diagrammes suivants est hasardeuse car:

- les échantillons de Barcelonnette ont à la fois la teneur en carbonate et la valeur de bleu les moins élevées des 3 secteurs,
- la valeur de bleu est principalement affectée par la minéralogie des argiles.

Connaissant la valeur de bleu, on peut calculer une autre indice appelé nocivité de la fraction argileuse (D. Lautrin , 1989) défini par le rapport :

$$N = \frac{100 \times VB0/D}{\% < 2\ \mu m}$$

Un diagramme de nocivité (fig.4.7), basé sur les valeurs de N et sur la composition minéralogique de la phase argileuse, permet de classer les sols en groupes, selon l'intensité de leur action.

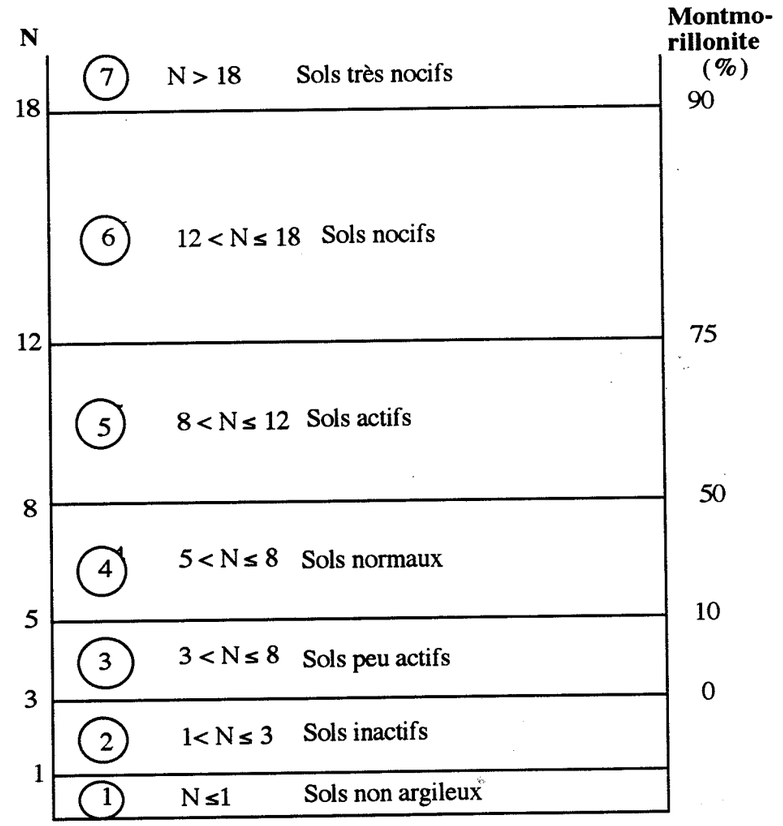


Fig.4.7 - Diagramme de nocivité

Les valeurs de l'indice de nocivité qui sont rassemblées dans le tableau 4.15 révèlent le caractère très nocif des argiles dans les TN altérées, car elles sont presque

toutes supérieures à 20, ce qui correspond à une teneur en montmorillonite supérieure à

Echantillon	VBO/D calculée	% < 2µm	N	Classification
5B.asT	2.7	12	22	très nocif
7C.asT	1,4	11	13	nocif
9A.asT	2,0	4	50	très nocif
29.asT	1,1	5	22	très nocif
43A.aiT	1,8	2	90	très nocif
45A.aiT	1,8	1	180	très nocif
10A.aiD	2,4	6	40	très nocif
21D.asD	2,0	8	25	très nocif
23A.asD	1,9	10	19	très nocif
36.a?B	1,2	3	40	très nocif
37A.asB	0,9	5	18	nocif
37B.asB	0,8	3	27	très nocif
38C.asB	1,1	5	22	très nocif
39A.aaL	4,8	10	48	très nocif
40A.avL	3,9	8	49	très nocif
41A.aoL	3,6	4	90	très nocif
42A.avL	5,9	14	42	très nocif

Tab. 4.15 - Valeurs de l'indice de nocivité

75 % selon le diagramme de nocivité. Par contre, le passage aux rayons X (cf. 4.10) révèle que les interstratifiés I/S n'existent qu'en proportion moyenne, environ 20 %. Encore une fois, on voit que l'indice de nocivité est exagéré par la faible teneur en particules < 2 µm comme dans le cas du coefficient de Skempton. Ainsi, ces deux types de coefficient ne s'adaptent-ils pas bien à la caractérisation des TN.

4.10 Les analyses de diffraction aux rayons X

4.10.1 Etude minéralogique de la roche totale

Cette étude a été faite sur la poudre non orientée. Les résultats sont donnés dans la figure 4.8.

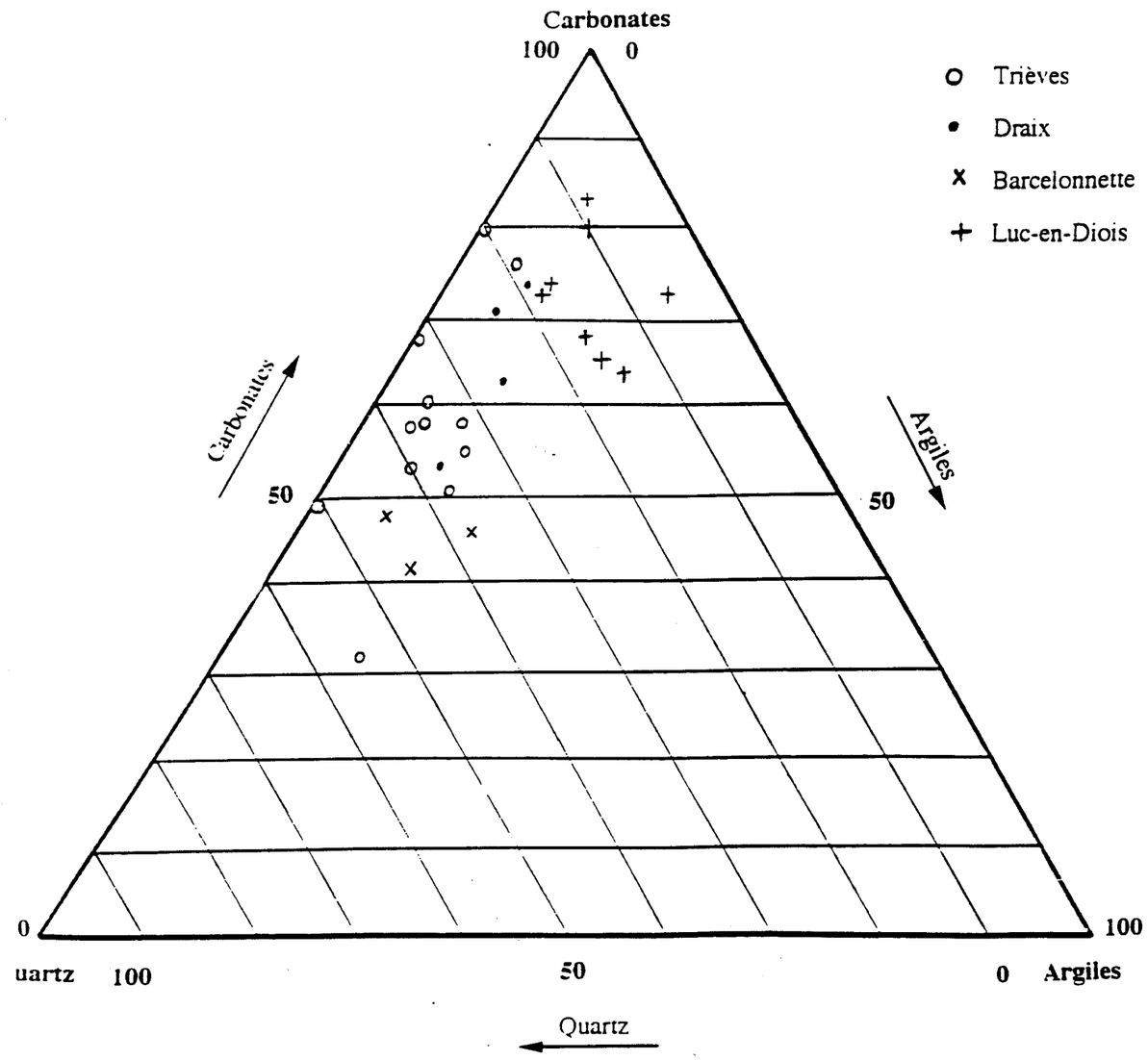


Fig.4.8 - Diagramme quartz - argiles - carbonates

Nous constatons que:

- La calcite domine le cortège minéralogique des TN. Viennent ensuite le quartz et les minéraux phylliteux: mica et chlorite. On y trouve également des plagioclases et parfois de la dolomie en petite quantité.

- La proportion entre les trois groupes minéraux principaux, carbonates, silicates et phyllosilicates, est variable. A Barcelonnette, elle est sensiblement équivalente, tandis que, à Draix et en Trièves, les carbonates sont largement dominants.

- Qualitativement, la composition minéralogique ne varie pratiquement pas du faciès rocheux des TN aux produits altérés. Seule la proportion des minéraux est variable d'un échantillon à l'autre et encore les écarts sont-ils limités.

- Tous les faciès marneux de la région de Boulc contiennent, une grande quantité de calcite, plus encore que les TN. On y trouve aussi du quartz et du plagioclase. Parmi les minéraux phylliteux, la montmorillonite est majoritaire, accompagnée de mica et de kaolinite.

4.10.2 Etude minéralogique des fractions inférieures à 2 µm

a) Traitement des échantillons

Les matériaux ont été séchés, broyés finement, décarbonatés, homogénéisés, sédimentés, et la fraction inférieure à 2 µm a été récupérée pour réaliser les agrégats orientés.

Pour chaque échantillon, on a effectué une série de trois enregistrements au diffractomètre aux rayons X : un enregistrement du matériau orienté initial, un enregistrement à partir du matériau soumis aux vapeurs d'éthylène-glycol, et un enregistrement à partir du matériau chauffé à 500 °C pendant 48 heures

b) Dépouillement des diffractogrammes

Les distances réticulaires sont indiquées à partir des valeurs des angles des pics exprimés en 2 θ. Les minéraux sont ensuite identifiés à partir des fiches ASTM de référence. La méthode semi-quantitative adpotée consiste à mesurer la hauteur de la réflexion pour chaque minéral. La composition du mélange est obtenue en ramenant la somme à 100 % après avoir introduit les facteurs correctifs qui tiennent compte de l'état de cristallisation du minéral. La précision de la méthode est estimée à environ 5 %.

c) Résultats

Le tableau 4.16 rassemble les constatations effectués et les figures 4.9 présentent des diagrammes types.

- Dans le cortège minéralogique des TN, l'illite est dominante et constitue une fraction permanente et majeure des minéraux argileux.

- Comme l'illite, la chlorite s'observe dans tous les échantillons, mais en quantité bien moindre. Le rapport des réflexions d(002) / d(001), très élevé, surtout à Barcelonnette, révèle le caractère ferrifère des chlorites.

- La kaolinite existe en petite quantité dans les échantillons de Draix, très peu en Trièves et disparaît complètement à Barcelonnette.

- Les interstratifiés irréguliers, eux aussi, en constituent une fraction permanente. Comme élément de traces, l'interstratifié chlorite - smectite se révèle au diffractogramme, sur l'essai chauffé, par la présence d'un épaulement entre 10 et 14 Å. L'interstatifié illite - smectite du type R1 est plus abondant , contenant plus de 70 % de feuillets d'illite. Il se traduit par un dôme situé entre 10 et 11 Å à l'essai naturel, qui se déplace vers 13Å à l'essai glycolé et se contracte à 10Å à l'essai chauffé. Sur quelques diffractogrammes, un sursaut à 25Å a été observé, traduisant une amorce de régularisation de l'illite - smectite, menant à un interstratifié régulier nommé allevardite.

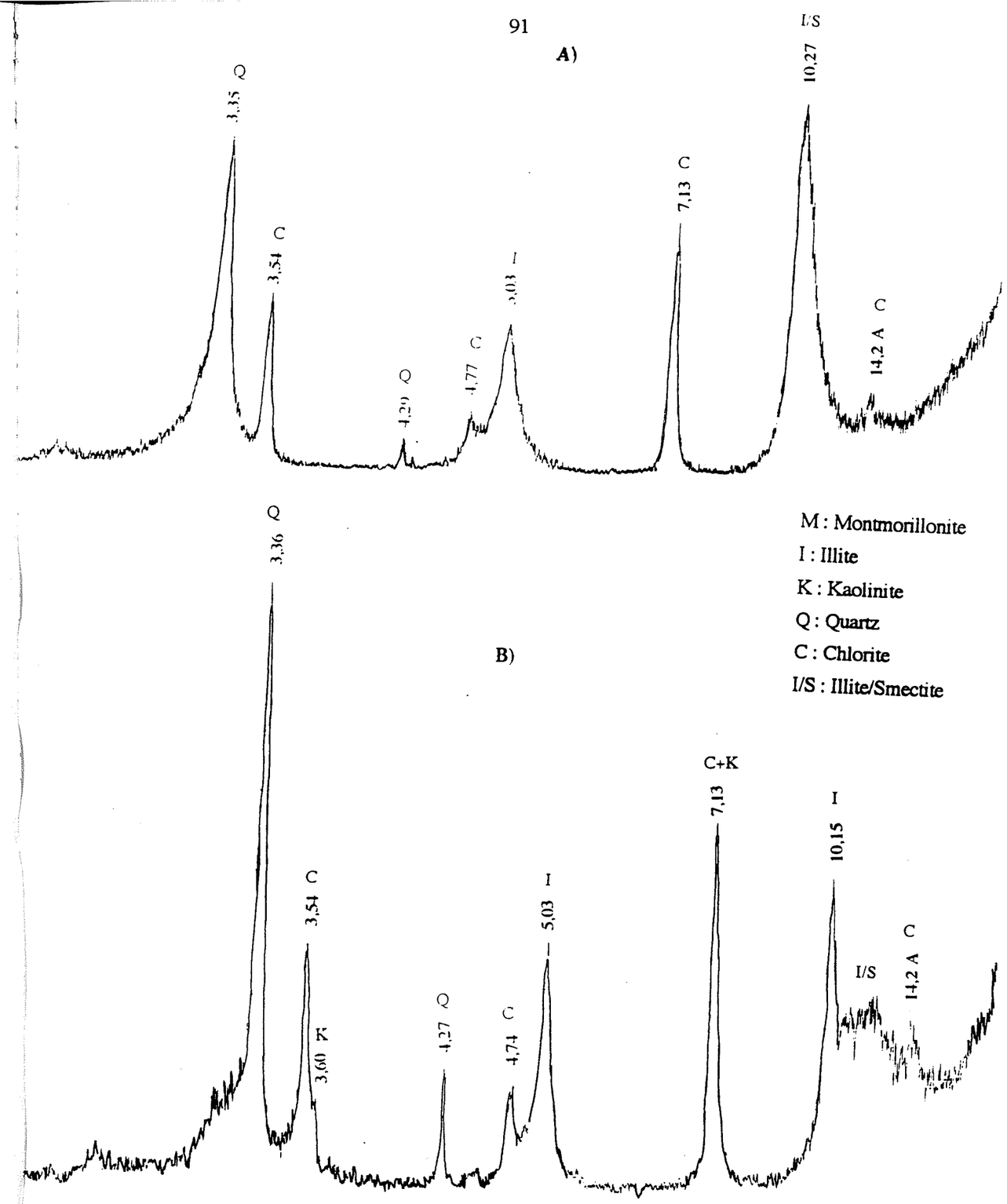


Fig. 4.9 A - Diagramme type de la fraction argileuse des Terres Noires du Trièves

B - Diagramme type de la fraction argileuse des Terres Noires de Draix

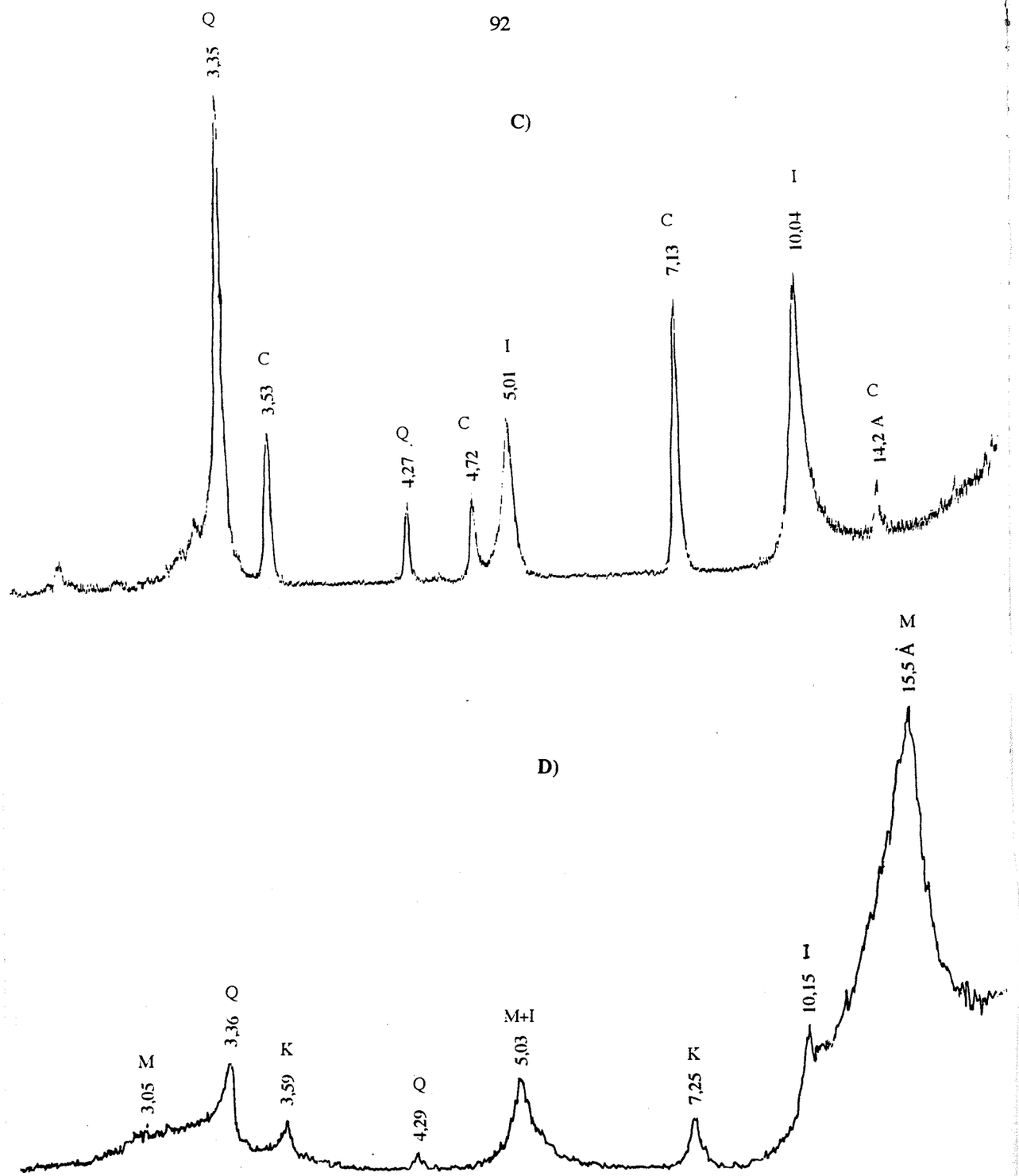


Fig. 4.9 C - Diagramme type de la fraction argileuse des Terres Noires de Barcelonnette

D - Diagramme de la fraction argileuse des marnes aptiennes de Luc-en-Diois

Echantillon	Illite (%)	Chlorite (%)	Kaolinite (%)	I/S (%)	C/S (%)
1.asT	81	-	peu	18	peu
4A.asT	55	17	peu	28	peu
4B.rsT	52	27	-	21	peu
4C.rsT	50	29	-	21	peu
4D.asT	57	16	-	27	peu
4E.asT	54	26	-	20	peu
5A.asT	50	24	-	26	peu
5B.asT	55	17	-	28	peu
7B.asT	43	27	-	30	peu
7C.asT	55	31	-	14	peu
9A.asT	58	25	-	17	peu
9B.rsT	60	22	-	18	peu
26	62	28	peu	10	peu
28A.rsT	36	44	peu	20	peu
28B.rsT	67	peu	15	18	peu
28C.rsT	69	12	-	19	peu
28E.rsT	68	7	8	17	peu
31B.aiT	54	46	peu	peu	peu
43A.aiT	61	30	-	9	peu
44A.riT	71	18	-	11	peu
44B.aiT	45	36	-	9	peu
45A.aiT	51	42	-	7	peu
10A.aiD	55	29	6	10	peu
10C.aiD	57	28	4	11	peu
10D.aiD	42	33	17	8	peu
11.aiD	50	25	-	25	-
12.aiD	59	19	-	22	-
13A.aiD	56	25	-	19	-
16A.aiD	62	20	-	18	-

Tab. 4.16 - Composition minéralogique des fractions argileuses

Echantillon	Illite (%)	Chlorite (%)	Kaolinite (%)	I/S (%)	C/S (%)	Montmo-rillonite
22A.asD	70	10	5	-	-	-
22B.asD	61	8	13	-	-	-
23A.asD	68	27	-	-	-	-
32A.aiB	58	42	-	-	-	-
32B.aiB	90	10	-	-	-	-
33A.aiB	70	30	-	-	-	-
33B.riB	66	34	-	-	-	-
33C.riB	65	35	-	-	-	-
34.a?B	84	16	-	-	-	-
35A.rsB	89	11	-	-	-	-
35B.asB	70	30	-	-	-	-
36.a?B	82	18	-	peu	-	-
37A.asB	72	28	-	-	-	-
37B.asB	76	24	-	-	-	-
38A.asB	90	10	-	-	-	-
38B.rsB	82	18	-	-	-	-
38C.a?B	84	16	-	-	-	-
39A.aaL	25	peu	15	peu	peu	60
40A.avL	20	-	4	peu	peu	76
41A.aoL	23	-	5	peu	peu	72
42A.avL	18	-	6	peu	peu	76

- Les interstratifiés ont totalement disparu dans les échantillons de Barcelonnette, qui ne contiennent que de la chlorite et de l'illite, caractérisant les TN de l'Ubaye. Cette absence a bien traduit la valeur de bleu la moins élevée. L'illite est une illite ouverte, c'est-à-dire une illite normale ayant subi un lessivage partiel. Cette altération modérée

provoque le bâillement des feuillets et donne une réflexion d(001) dissymétrique, plus large vers les petits angles. La largeur du pic d(001) reste la même sur les trois passages, naturel, éthylène-glycol et chauffage: cette illite ouverte a donc le comportement d'une chlorite (T. HOLTZAPFFEL, 1985).

- Dans le tableau 4.16, l'échantillon 26 (l'aménagement du Buëch) a été introduit pour être comparé aux TN des trois secteurs étudiés. Il provient d'un déblai de TN saines extrait de la galerie du barrage de Riou. Sa composition minéralogique s'intègre bien parmi les autres.

- A part ces minéraux argileux, on trouve encore, dans la fraction inférieure à 2 µm, le quartz, du plagioclase et parfois de la goethite.

- La montmorillonite, l'illite et la kaolinite sont les minéraux permanents des marnes valanginiennes, aptiennes et oligocènes de Boulc. La première est un élément prédominant, expliquant de nombreux glissements de terrain dans cette formation. En effet, l'alternance humidification-séchage provoque le gonflement et le retrait des montmorillonites. A part la pression exercée dans le sol par le gonflement, l'effet gonflement-retrait réoriente la montmorillonite et cause la réduction et même la disparition complète de la cohésion du sol. D'autre part, on trouve également dans ces marnes des interstratifiés irréguliers illite - smectite et chlorite - smectite, mais en petite quantité.

Echantillon	Illite (%)	Chlorite (%)	Kaolinite (%)	I/S (%)	C/S (%)
Remblai des Blancs					
4,13 m	39	32	18	11	peu
7,38 m	39	32	17	11	peu
Tranchée des Blancs	55	15	6	24	peu

Tab.4.17 - Composition minéralogique des fractions argileuses des matériaux du remblai et de la tranchée des Blancs

- Le tableau 4.17 concerne les minéraux constituant la fraction argileuse des échantillons du remblai des Blancs. Les échantillons de la tranchée, qui est à 200m , sont des matériaux altérés pris sur le remblai. La kaolinite y existe plus abondamment en comparant aux autres échantillons du Trièves.

Ces résultats confirment les conclusions de P. ARTRU (1967) relatives à la composition minéralogique des TN. L'illite prédomine, associée à:

- une kaolinite d'origine détritique, provenant du Massif Central latérisé et érodé, absente dans le bassin de Barcelonnette;

- une chlorite, provenant de reliefs émergés situés dans la zone interne des Alpes, présente dans tous les bassins.

4.11 Observations au microscope polarisant

Ces observations ont été réalisés sur des plaques minces de roches à l'Institut Dolomieu. En lumière naturelle, les échantillons présentent une couleur brun clair. Les Terres Noires renferment de très nombreux éléments accessoires dont le rôle est prépondérant pour la constitution de la structure observable, tels que grains de quartz, paillettes de micas, fragments de tests d'organismes marines ... La structure litée est bien visible, à cause de l'alignement de nombreux minéraux. Toutefois, dans les échantillons des roches altérées, cette structure litée n'existe plus. La calcite se présente sous forme granulaire et de ciment sparitique. Sur certaines lames, les plages de calcite se situent à côté d'une matrice brun clair qui contient des matières organiques, des sulfures, des argiles. Sur d'autres lames, la matrice se présente comme un agrégat cimenté par la calcite.

En résumé, la différence entre les roches saines et les plaquettes altérées observée sous le microscope polarisant est la suivante :

- roche saine : calcite largement cristallisée et structure litée.
- plaquettes altérées : calcite cryptocristalline, la structure litée s'estompe.

4.12 Observations au microscope électronique à balayage (M.E.B)

Les géologues et les pétrologistes ont donné depuis longtemps la définition des marnes. Une marne est une roche constituée par le mélange de minéraux de nature carbonatée (essentiellement calcite, parfois dolomite) et de nature argileuse.

Il existe en plus une nomenclature détaillée: argiles - argiles calcaires - marnes - calcaires argileux - calcaires. La teneur en carbonate augmente d'argiles (contenant < 5 % de $CaCO_3$) aux calcaires (contenant > 95 % de $CaCO_3$). On réserve le nom de marnes aux roches dont la teneur en carbonate varie entre 35 et 65 %. Les TN, contenant de 20 à 80% de carbonate, sont donc des marnes et des calcaires argileux. Elles diffèrent des marnes par le fait qu'elles ne contiennent pas uniquement carbonates et argiles, mais aussi quartz et feldspaths détritiques.

D'après Le Roux (1972), le comportement d'un matériau ne dépend pas uniquement de la nature de la fraction argileuse mais aussi des proportions des composants et de la texture initiale du matériau. La nature minéralogique des argiles ne devient l'élément moteur du comportement qu'à partir d'un certain pourcentage d'argile. Ce seuil est de 30% environ. En-deçà de 30%, c'est la texture qui aura une action déterminante sur le comportement.

On appelle texture l'arrangement spatial des minéraux d'une roche ou d'un sol (R. Brousse, 1967). Le Roux a complété cette définition comme suit: " La texture désigne la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein de la roche". Il s'agit du mode d'arrangement des minéraux de la roche, du type et du nombre de liaisons entre les grains.

Les TN ont une faible pourcentage d'argile (< 10%): la connaissance de leur texture est donc indispensable pour mieux comprendre leur comportement afin de prévoir leur évolution dans le temps.

Trièves

- 28B.rsT : Cet échantillon de calcaire argileux contenant plus de 70% de carbonate donne une texture meilleure que tous les autres du secteur. Des cristaux de calcite sont bien cristallisés en rhomboèdres.Grâce à nombreux pores laissés par les grains de calcite ou de quartz (dont la taille est inférieure à 3 µm) on constate que leurs liaisons ne sont pas fortes et que les argiles sont coincées entre les grains. Sur la photo 4.1a, on observe de nombreux pores de toutes tailles qui sont les images en creux des cristaux de calcite arrachés au moment de la fragmentation de l'échantillon. Le phénomène d'altération a été constaté grâce à un grand grain de calcite d'environ 12 µm, corrodé à la surface (photo 4.1b).

- 28ArsT : Les feuillets d'argile (photo 4.2a) empilés les uns sur les autres assurent la cohésion de la roche. Quelques grains de calcite ou de quartz de petite taille (<10µm) sont disséminés et noyés dans la matrice argileuse. En haut, à gauche on voit bien un grain de calcite en voie de dissolution. Ce phénomène se produit souvent au contact entre le grain et l'argile et se propage progressivement. Le grossissement 2000 (photo 4.2b) montre les paillettes argileuses contournées, laissant des pores entre elles. Les grains de calcite corrodés sont aussi observables.

- 28C.rsT : Empilement de paillettes argileuses (photo 4.3) mêlées à de petits grains cristallins. Les feuillets d'argile sont plus serrés que ceux de 28A.rsT: la calcite s'étant dissoute, elles ont pu se tasser. Il semble que ce soient les grains de calcite disséminés dans l'échantillon qui gênent l'orientation des paillettes dans un plan à peu près constant et ce qui par conséquent augmentent la cohésion du matériau. Leur disparition favorise donc tassements et glissements.

- 29.rsT : L'échantillon du remblai des Blancs donne la même image que le 28C.rsT. Au grossissement 500 (photo 4.4), on voit des feuillets d'argile empilés. Des grains de calcite noyés dans les paquets argileux, corrodés à la surface, sont également visibles.

- 30.rsT: Des grains cristallins, bien formés, d'une taille de 10 µm, sont noyés dans la matrice argileuse (photo 4.5a). La photo 4.5b et 4.5c montrent comment les particules

argileuses se collent sur les grains et les enrobent. La dissolution des grains de calcite montre la cohésion argile-calcite par un effet de soustraction. Ceci explique la facilité du départ des grains lors de la préparation des échantillons par entraînement mécanique: ils laissent de nombreux pores de forme cubique.

- 45B.riT: La vue (photo 4.6a) prise au grossissement 160, montre la texture très lâche des TN du Membre inférieur de la vallée du Riffol. Des agrégats de la phase argileuse laissent entre eux de nombreux pores ayant la taille de 50 à 100 µm . Le grossissement 2000 montre en détail un agrégat formé par des paillettes argileuses collées les unes aux autres (photo 4.6b). Des flocons, formés par la phase argileuse et entourés par des phyllosilicates, sont souvent observables. Par analogie on peut désigner cette texture du nom de floconneuse. Les flocons eux-mêmes, présentent une texture alvéolée où les particules argileuses se disposent dans tous les sens. Aucun grain cristallin n'a été observé. Cette texture en micro-agrégats ou floconneuse confère aux TN des caractéristiques mécaniques médiocres, et explique l'instabilité des versants constitués par ce matériau.

Draix

- 16.riD: La photo 4.7 illustre la juxtaposition de petits éléments squamiformes. On observe même le décollement de deux micro-agrégats, dont l'un ayant une taille de plus de 700 µm. Cet aspect rend bien compte de la desquamation du matériau, qui fournit des éléments de toutes tailles.

- 14.riD: Les constituants sont beaucoup plus fins que dans les échantillons du Trièves. Au grossissement 500, on ne parvient pas à bien les distinguer les constituants du matériau, seuls de nombreux trous sur la surface et des fissures parallèles ont été observés (photo 4.8a). Ces fissures pourraient être attribuées à une schistosité sensiblement orthogonale à la stratififcation. Dans cet échantillon une particularité importante est l'apparition de formes en voile généralement attribuées à la néoformation (photo 4.8b). Un îlot de carbonate a été observé (photo 4.8c). Ce type d'îlot est trop rare pour influencer le comportement global du matériau.

- 24.rsD: Il faut atteindre le grossissement 2000 pour mieux observer les paillettes argileuses disposées à plat et les micrograins de calcite ou de quartz qui les parsèment (photo 4.9). C'est un mélange intime entre ces constituants.

Barcelonnette

- 37B.rsB: Une texture en micro-agrégats donne de nombreux vides (photo 4.10a). La photo 10b illustre en détail un micro-agrégat d'écailles argileuses empilées, mêlées de grains cristallins (photo 4.10b).

- Les photos 4.10c (37B.rsB) et 4.11a (38B.rsB) au grossissement 500 illustrent l'aspect vacuolaire des échantillons de Barcelonnette où aucune liaison intercristalline n'est visible . L'aspect lâche de la texture est comparable à celle des TN de la vallée du Riffol (45B.riT).

- La photo 4.11b (38B.rsB) au grossissement 2000 montre une texture alvéolée avec de nombreux vides entre les particules argileuses et 4.11c (38B.rsB) montre un gros grain de calcite corrodée.

- La photo 4.12 (33C.riB) montre un grain de 15 µm noyé dans la matrice argileuse où la liaison entre eux est médiocre.

- La photo 4.13 (35A.rsB) montre un nodule de pyrite framboïde. Ce constituant est souvent observé dans les échantillons de Barcelonnette, bien qu'il n'apparaisse pas sur les diffractogrammes. L'existence de cette pyrite favorise le processus de désagrégation du matériau. L'oxydation de la pyrite en présence de calcite fournit de l'acide sulfurique qui provoque des effets divers:

- attaque de la calcite et formation de gypse, accompagnés par un doublement du volume, qui désorganise la roche;

- attaque de la fraction chloriteuse da la matrice argileuse

Ces processus, subord à une action chimique, ont un effet cumulatif. Celui-ci, s'il concerne, au long de fissures, des zones plus ou moins profondes, peut mettre en cause la stabilité des versants marneux. La photo 4.18 montre un bloc de TN de la coulée du torrent de Poche en cours d'exfoliation.

Boulc

- Parmi les échantillons de cette région, les marnes oligocènes (41B.roL) semblent avoir la texture la plus compacte. Pourtant deux fissures sont visibles sur la photo 4.14a. Le grossissement 2000 montre un empilement des feuillets d'argile laissant entre eux de petites cavités (photo 4.14b).

- Les marnes aptiennes (39B.raL) ont une texture apparemment semblable à celle de 41B.roL, mais avec nombreux vides de 2 µm (photo 4.15a). La photo 4.15b montre un mélange d'argiles, de coccosphères, de coccolithes et quelques îlots carbonatés.

- La texture la plus lâche est celle des marnes valanginiennes. Les fossiles sont très abondants dans l'échantillon 40B.rvL et 42B.rvL. On trouve partout des coccolithes ayant une taille de 1 µm, de forme sphérique percée d'un trou au milieu (photo 4.16a et 4.16b), se collant sur les paillettes argileuses. Ces coccolithes jouent certainement un rôle prépondérant dans la teneur en carbonate et contribuent à augmenter la porosité de ces marnes. Les constituant sont fins: mélange d'argiles, de fossiles et de petits grains de calcite (photo 4.17a et 4.17b).

D'après ces observations, on peut conclure que :

- A faible grossissement, la texture des TN se révèle souvent faite de micro-agrégats laissant des pores entre eux. A fort grossissement, les micro-agrégats se montrent constitués d'un mélange d'argile et de carbonate ou de quartz. Les argiles elles-mêmes ont parfois une texture alvéolaire ou floconneuse. Ces vides déterminent une évolution rapide du matériau en présence d'eau.

- Une liaison forte entre les grains cristallins confère au matériau un comportement de roche.Pourtant, la liaison, dans les TN, est assurée par les particules argileuses, les grains de calcite ou de quartz, souvent de petite dimension, étant disséminés ou noyés dans la matrice. Il existe pourtant des îlots de carbonates possédant une liaison intercristalline, mais ils ne sont pas assez nombreux pour jouer un rôle essentiel. Malgré leur aspect rocheux, les TN ont donc un comportement de sol.

- Déjà, sur échantillons de roche saine, les grains de calcite corrodés au bord et en

surface montrent que la texture alvéolée facilite une circulation d'eau. La diminution de la teneur en carbonate au cours de l'altération des TN est bien décelée au M.E.B.Les grains de calcite, souvent observés dans les échantillons des TN saines paraissent, par contre, peu dans les TN altérées.

- Les argiles néoformées sont observées dans les échantillons de Draix et de Barcelonnette. Les néoformations paraissent souvent sur le bord de particules détritiques et dans les pores, et assurent une liaison dans la roche. L'existence des néoformations prouvent que les TN de ces secteurs ont subi, au cours du temps, une diagenèse intense voire un début de métamorphisme.

- En comparant les échantillons des trois secteurs, on remarque que ceux de Barcelonnette ont une texture plus lâche, liée à la présence de nodules pyriteux, disséminés dans la matrice argileuse. En présence d'eau, cette texture est défavorable, notamment pour la stabilité des versants.

- Les marnes aptiennes et valanginiennes de Boulc ont une fraction fine très importante, avec nombreux coccolithes, coccosphères (que l'on n'a pas observés dans les TN), et de nombreux micro-vides, alors que les minéraux cristallins de grande taille en sont absents. Les nanofossiles créent un système complètement désorganisé dans la structure de ces marnes qui pour autant devrait augmenter leur cohésion. En réalité, ce système n'est pas stable. Ceci est expliqué par la texture "nid d'abeilles" due aux nombreux micro-vides qui facilite la circulation d'eau et le gonflement de la montmorillonite, très abondante dans la partie argileuse, et y provoque de nombreuses coulées (photo 4.19). Ces dernières sont faites par réorientations successives de particules argileuses à chaque cycle hydratation-déshydratation et par la dissolution du carbonate des coccolithes. Les fossiles sont absents dans les marnes oligocènes.

Grâce à ces observations au microscope électronique à balayage (M.E.B.), on comprend les raisons pour lesquelles les TN s'effritent aussitôt qu'elles sont exposées à l'air. Ainsi, l'utilisation du M.E.B. aide-t-elle beaucoup à comprendre le comportement du matériau . Ces observations, utilisées conjointement avec des essais d'identification traditionnels, donnent un image globale de leurs caractéristiques.

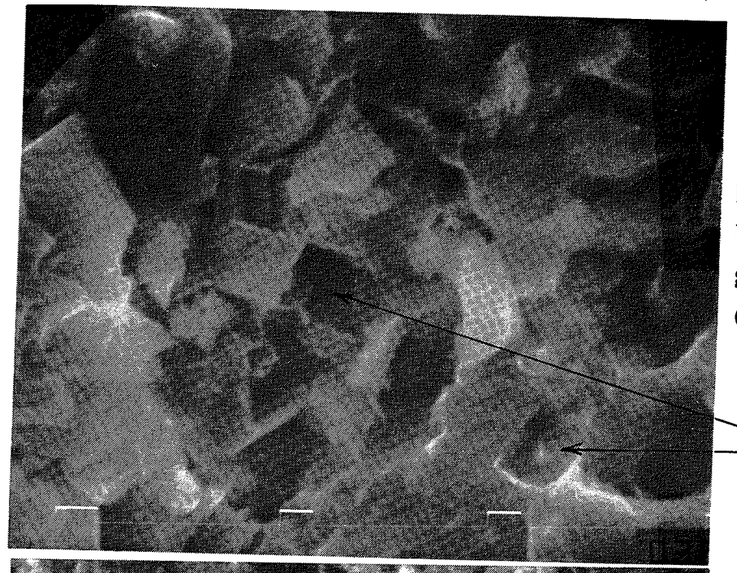


Photo 4.1a - Grossissement 2000 - Une liaison faible entre les grains de calcite et les argiles (28B.rsT)

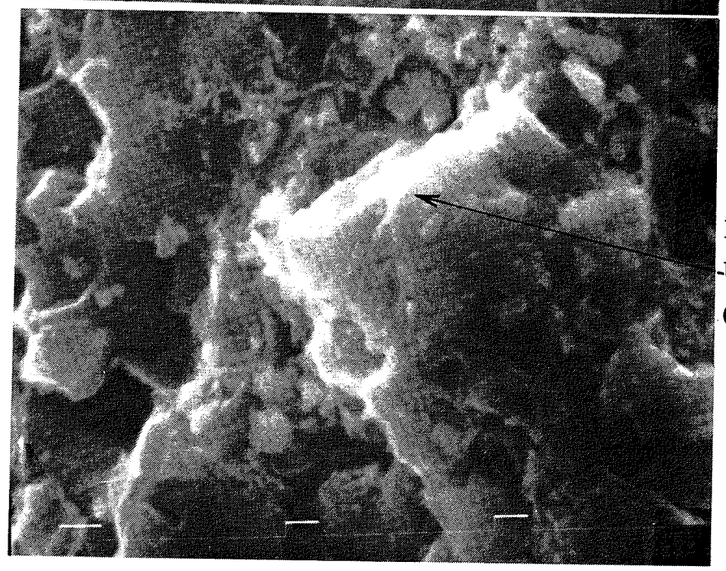


Photo 4.1b - Grossissement 2000 - Un grain de calcite corrodée (28B.rsT)

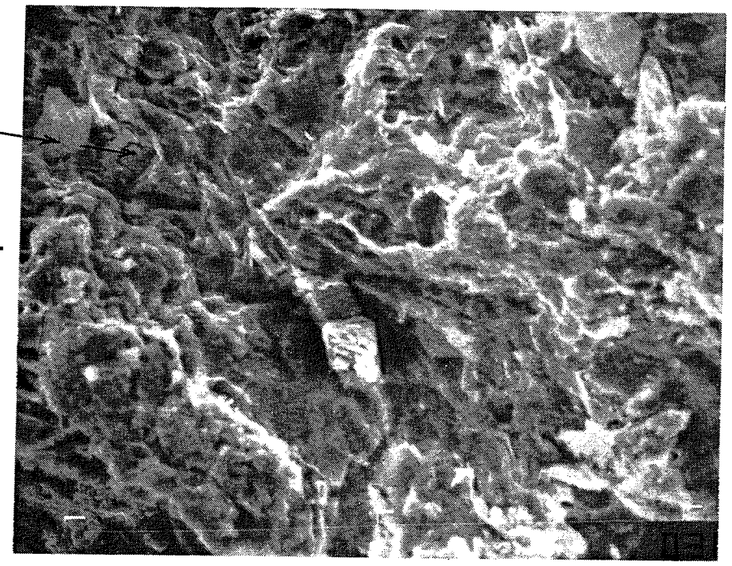


Photo 4.2a - Grossissement 500 - Les feuillets d'argile sont empilés entre eux (28A.rsT)

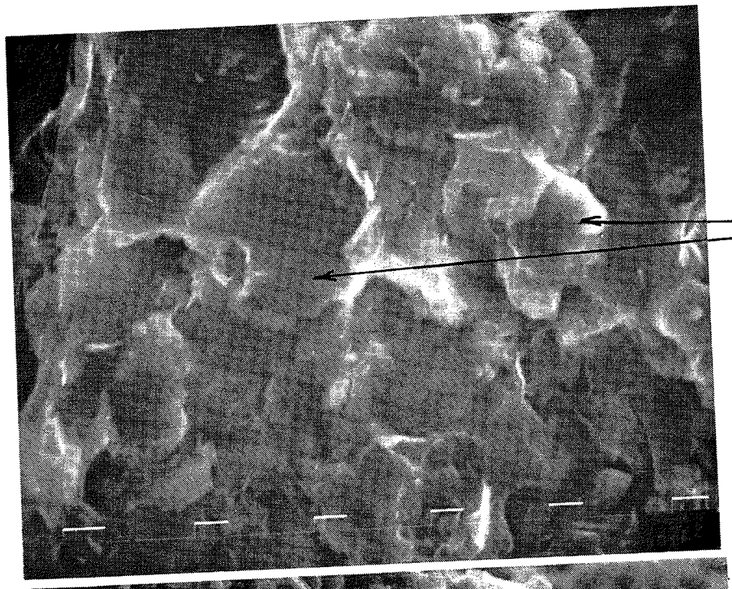


Photo 4.2b - Grossissement 2000 - Texture alvéolée (28A.rsT)

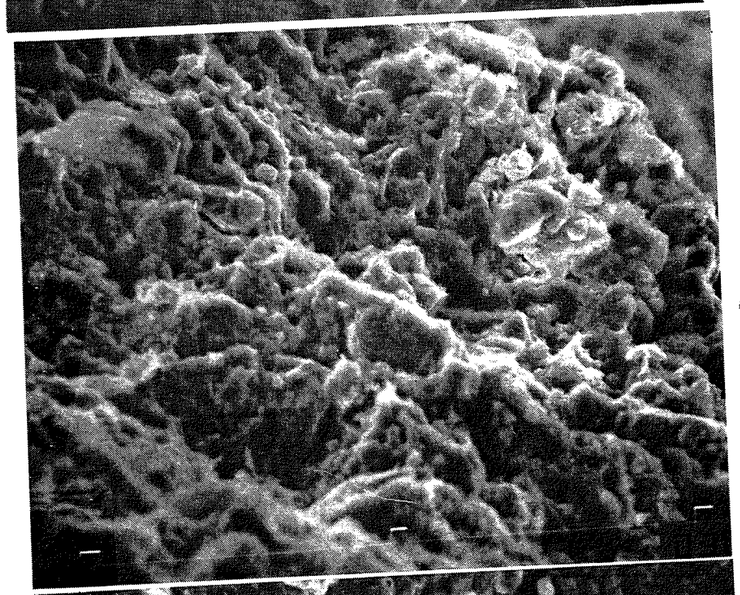


Photo 4.3 - Grossissement 500 - Les feuillets d'argile sont plus serrés dans les échantillons altérés (28C.rsT)

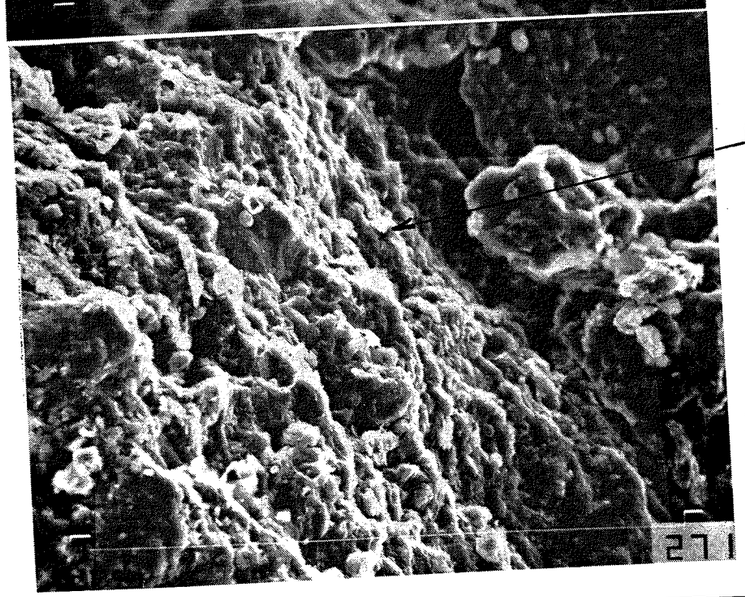
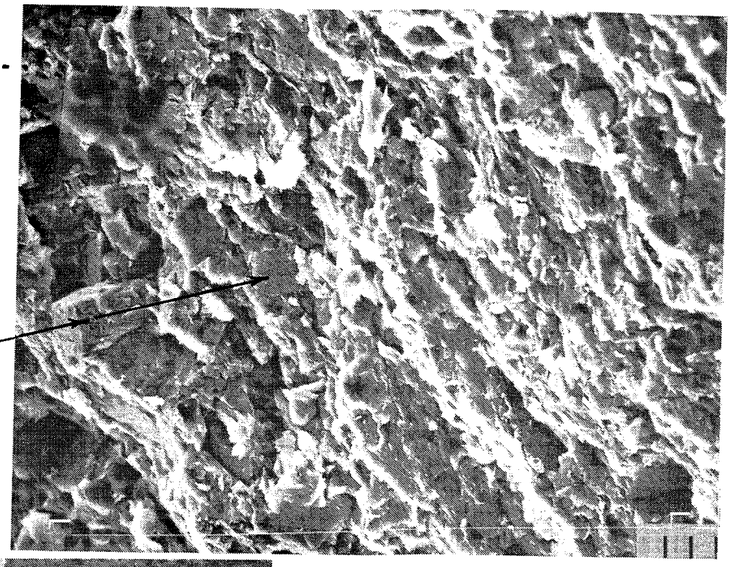


Photo 4.4 - Grossissement 500 - Même aspect que 28C.rsT. Les paillettes argileuses se sont disposées à plat (29.rsT)

Photo 4.5a - Grossissement 500 - Les grains de calcite bien cristallisés sont noyés dans une matrice argileuse (30.rsT)



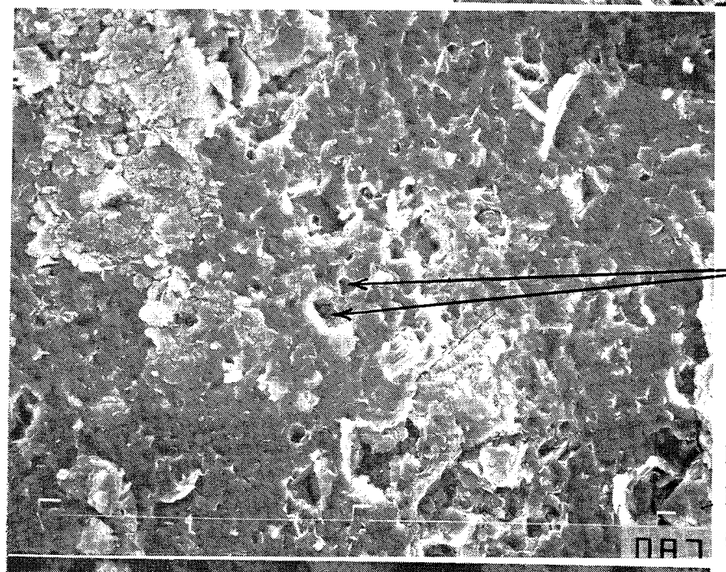


Photo 4.5b - Grossissement 500 - Nombreux pores dans la texture (30.rsT)

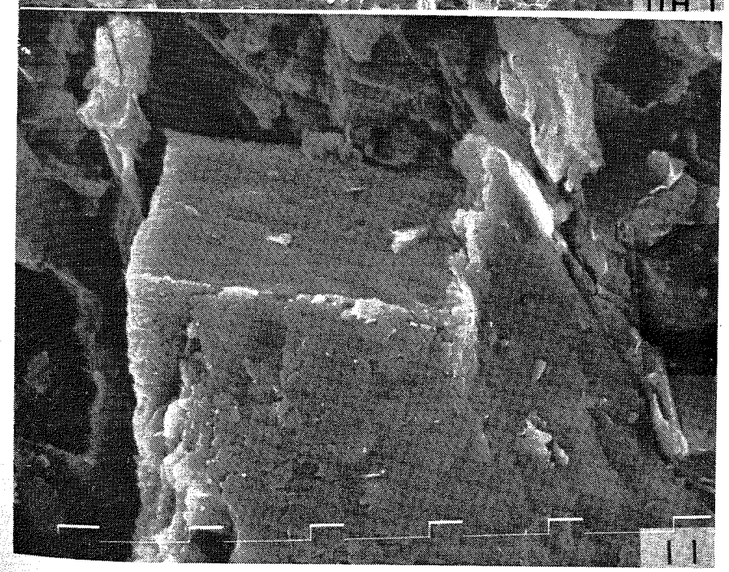


Photo 4.5c - Grossissement 2000 - Liaison lâche entre calcite et argile (30.rsT)

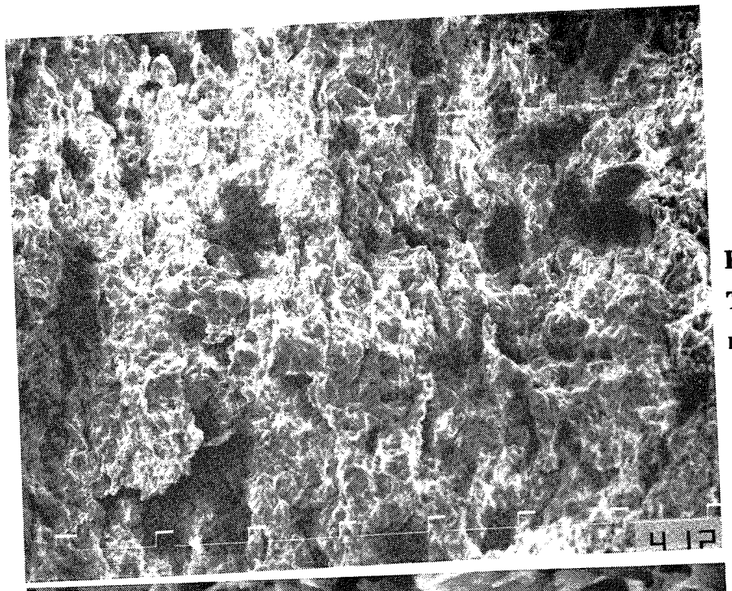


Photo 4.6a - Grossissement 160 - Texture en micro-agrégats avec nombreux vides (45B.riT)

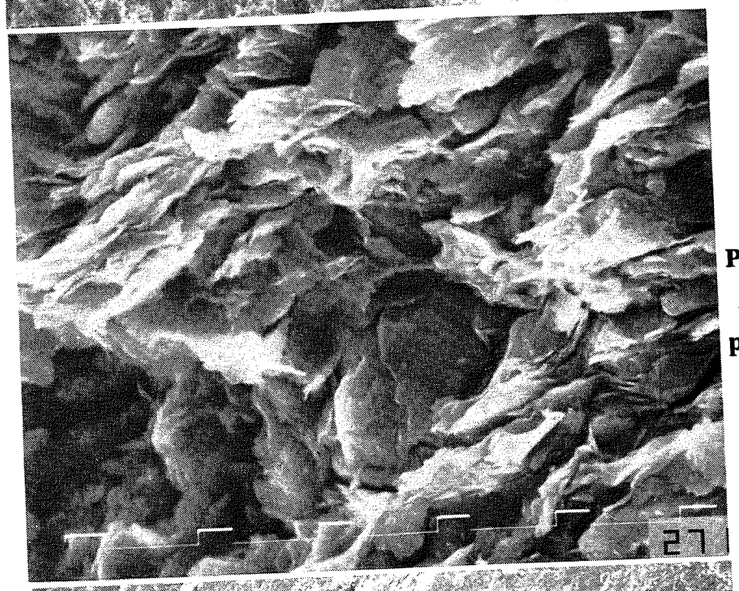
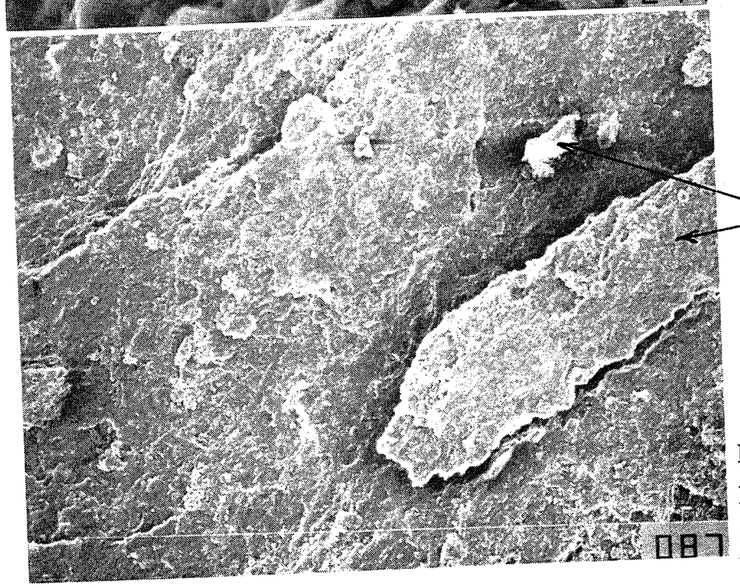


Photo 4.6b - Grossissement 2000 - Agrégat formé par des paillettes argileuses (45B.riT)



éléments squamiformes

Photo 4.7 - Grossissement 100 - La juxtaposition des éléments (16.riD)

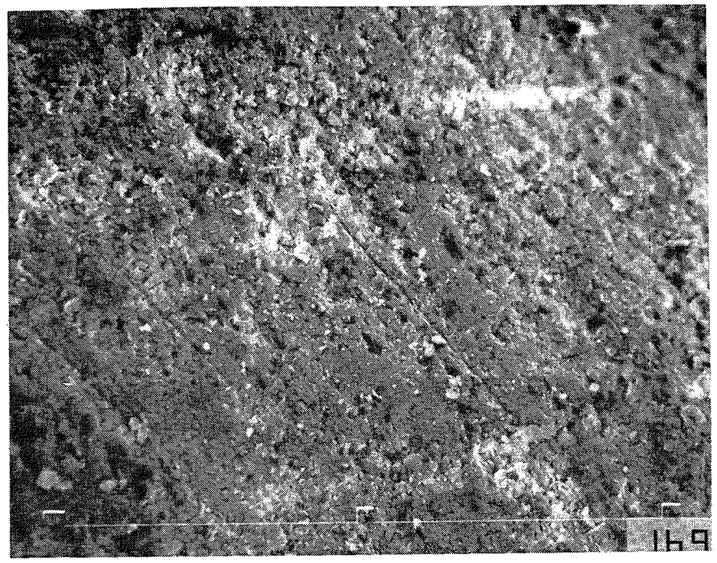


Photo 4.8a - Grossissement 500 - Constituants très fins, fissures et nombreux vides (14.riD)

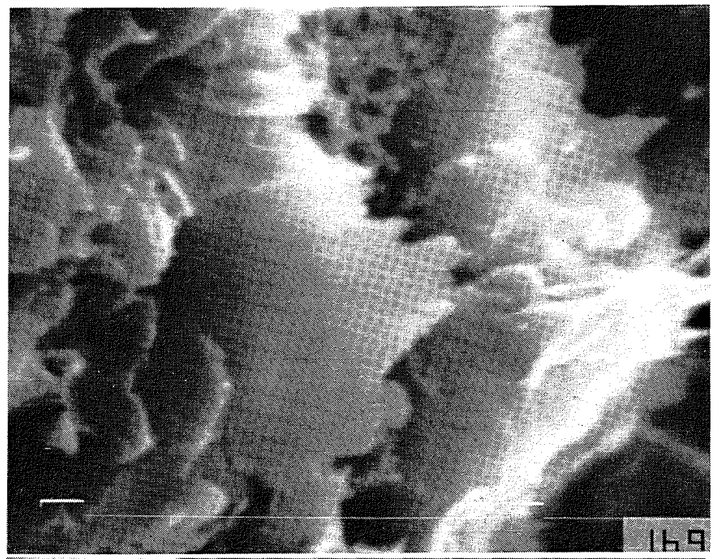


Photo 4.8b - Grossissement 7500 - Argile néoformée (14.riD)

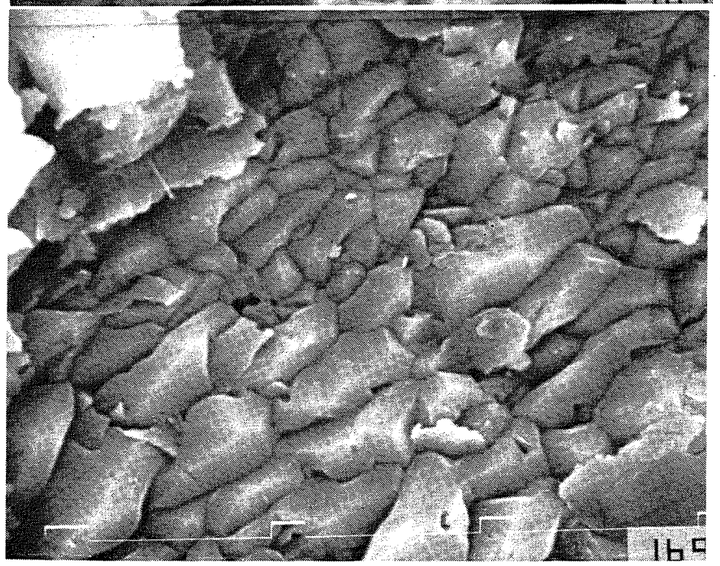


Photo 4.8c - Grossissement 3500 - Ilot de carbonate (14.riD)

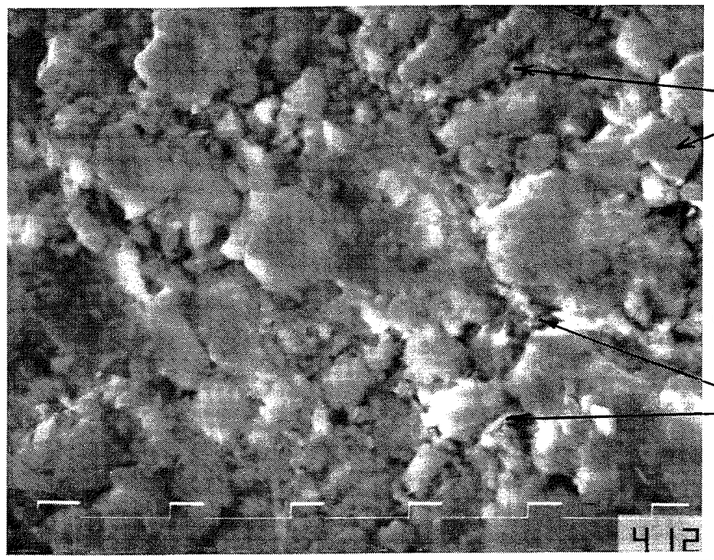


Photo 4.9 - Grossissement 2000 - Mélange de paillettes argileuses et de grains cristallins (24.riD)

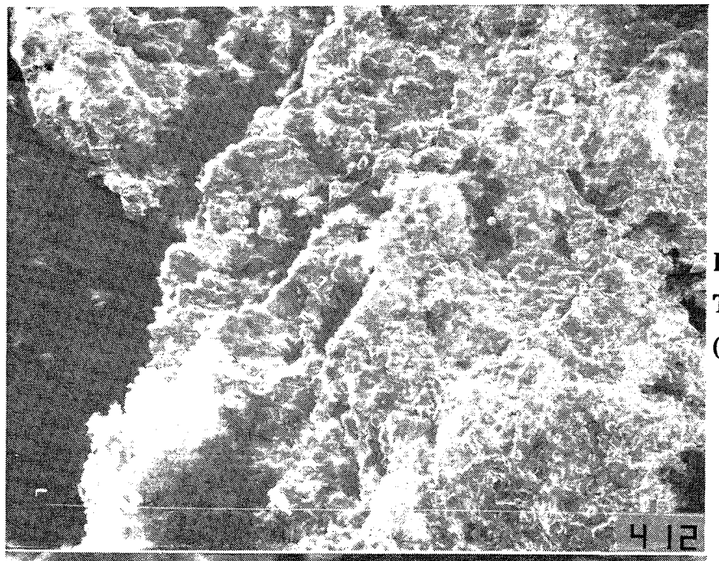


Photo 4.10a - Grossissement 100 - Texture en micro-agrégats (37B.rsB)

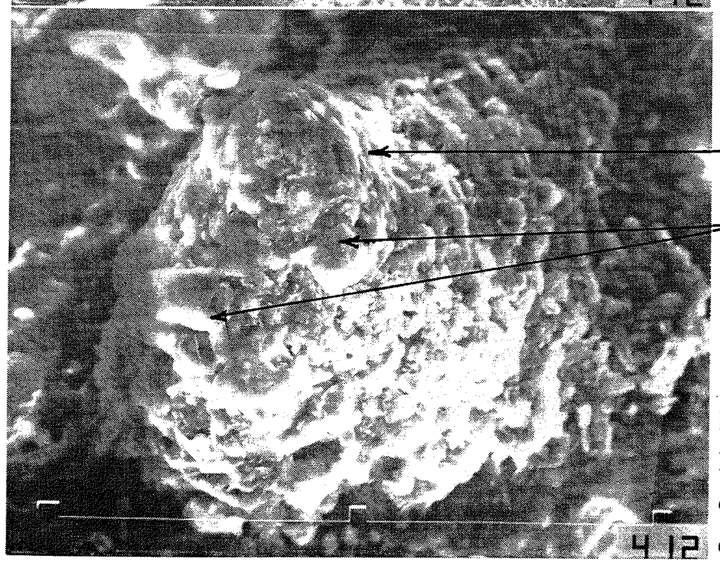


Photo 4.10b - Grossissement 500 - Détail d'un micro-agrégat: piles de feuillets argileux et cristaux de calcite (37B.rsB)

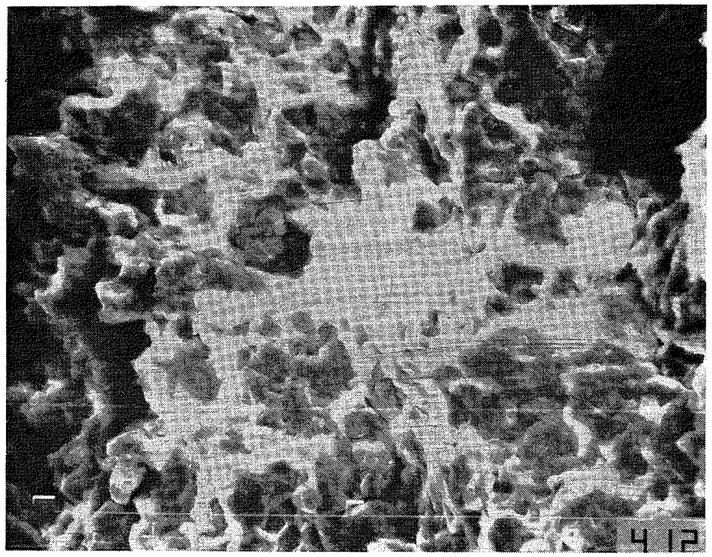


Photo 4.10c - Grossissement 500 - Aspect vacuolaire de la texture (37B.rsB)

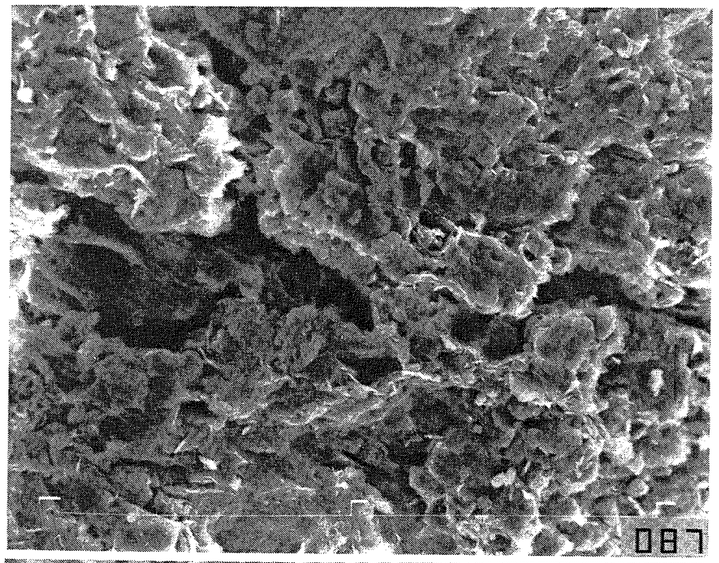


Photo 4.11a - Grossissement 500 - Même image que 37B.rsB. L'aspect vacuolaire de 38B.rsB

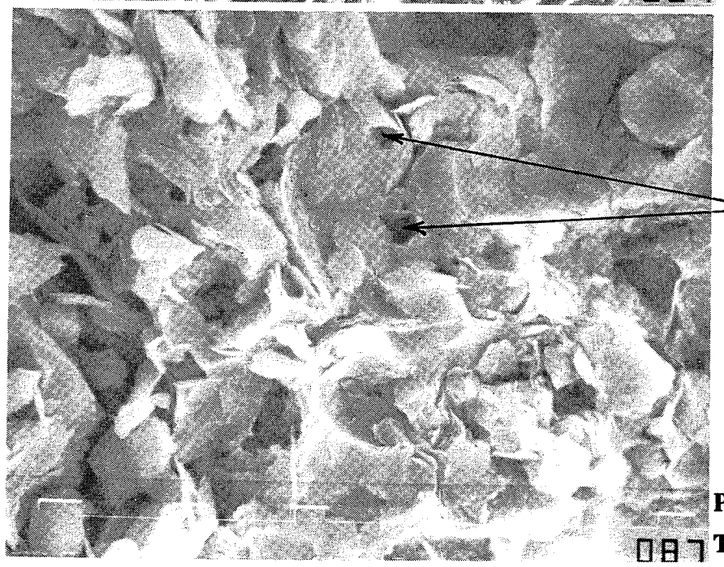


Photo 4.11b - Grossissement 2000 - Texture alvéolée (38B.rsB)

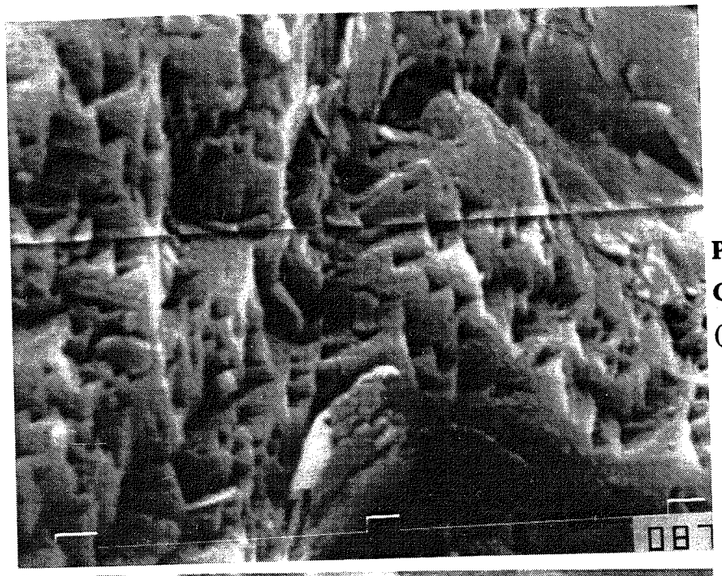


Photo 4.11c - Grossissement 5000 - Gros grain de calcite corrodée (38B.rsB)

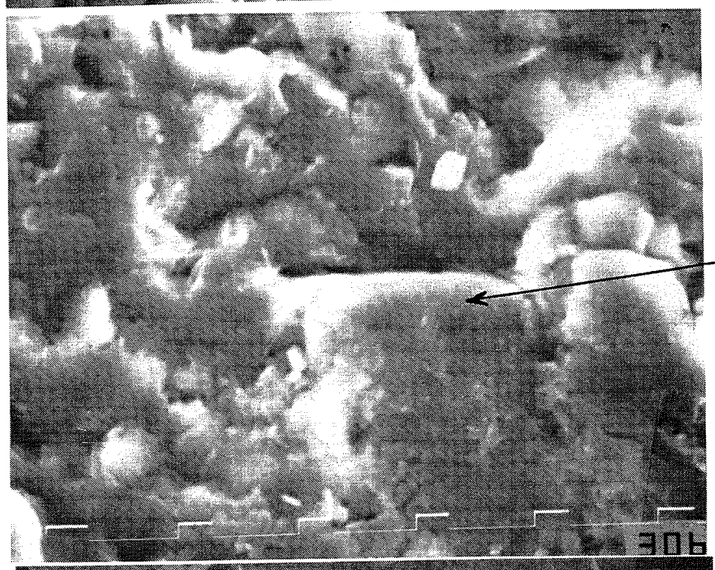


Photo 4.12 - Grossissement 2000 - Argiles emballant un grain cristallin (33C.riB)

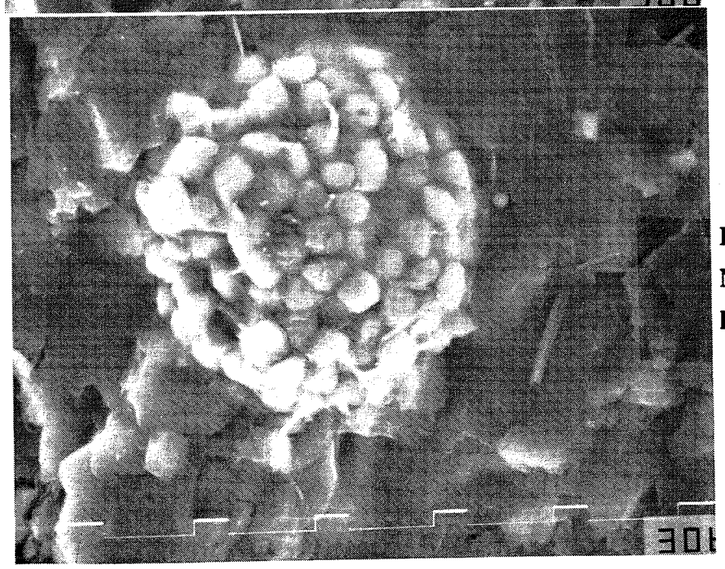


Photo 4.13 - Grossissement 2000 - Nodule de pyrite inclus dans les argiles (35A.rsB)

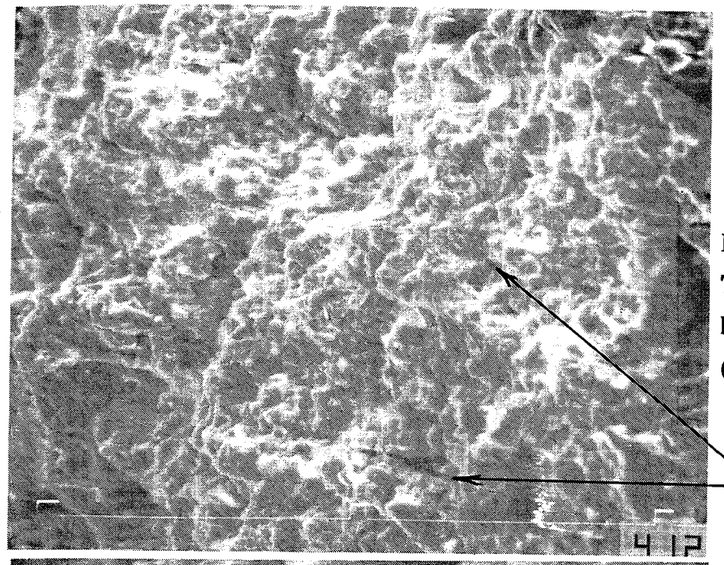


Photo 4.14a - Grossissement 500 - Texture la plus compacte parmi les marnes de Luc-en-Dios (41B.roL)

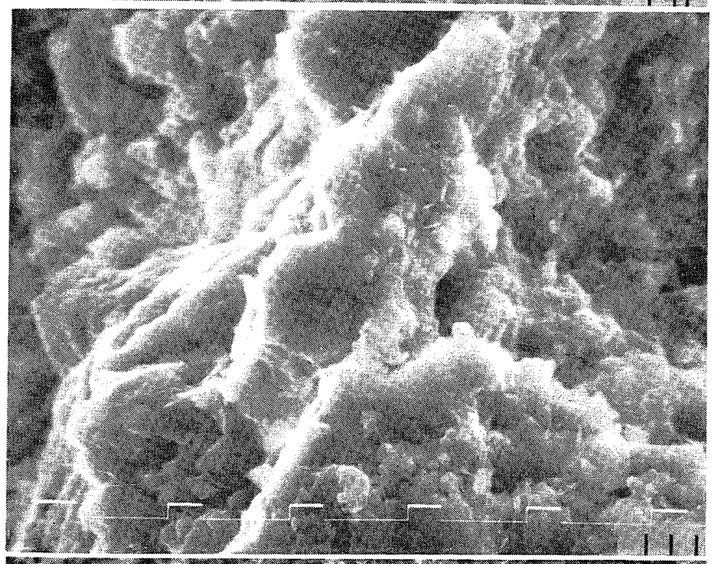


Photo 4.14b - Grossissement 2000 - Vides entre les argiles (41B.roL)

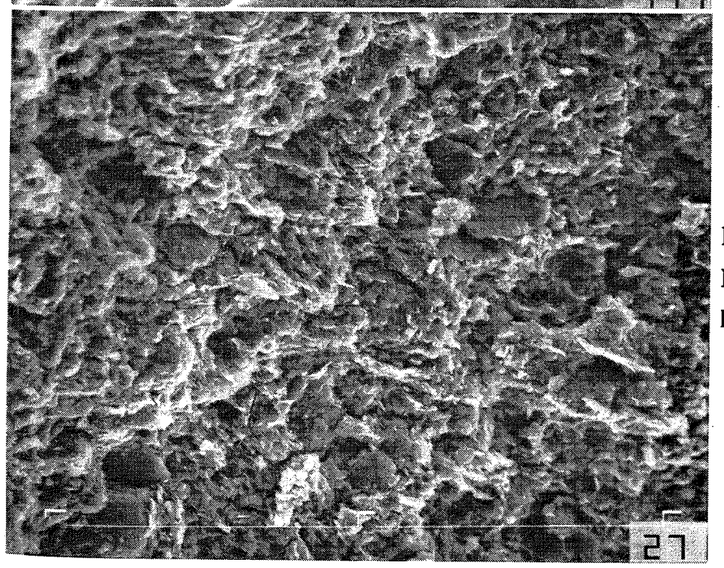


Photo 4.15a - Grossissement 500 - Nombreux micro-vides dans les marnes aptiennes (39B.raL)

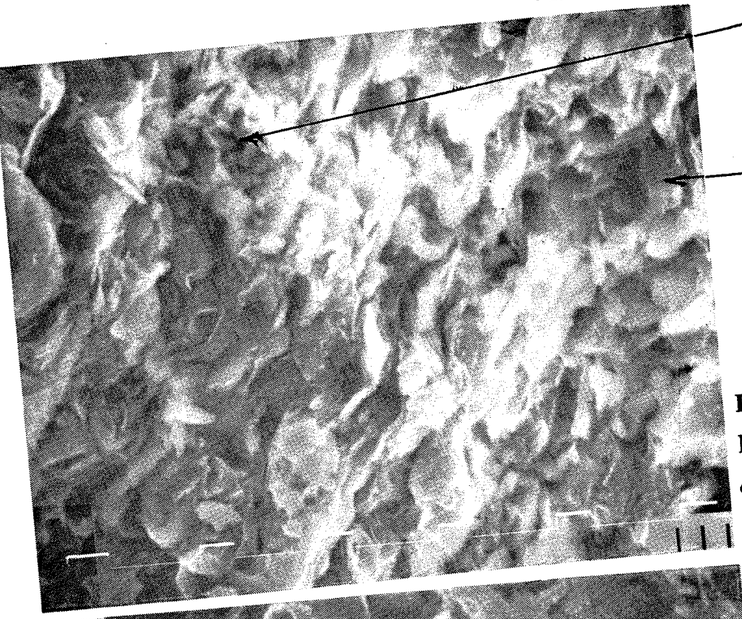


Photo 4.15b - Grossissement 2000 - Mélange d'argiles, de coccosphères, de coccolithes et d'îlots carbonatés (39B.raL)

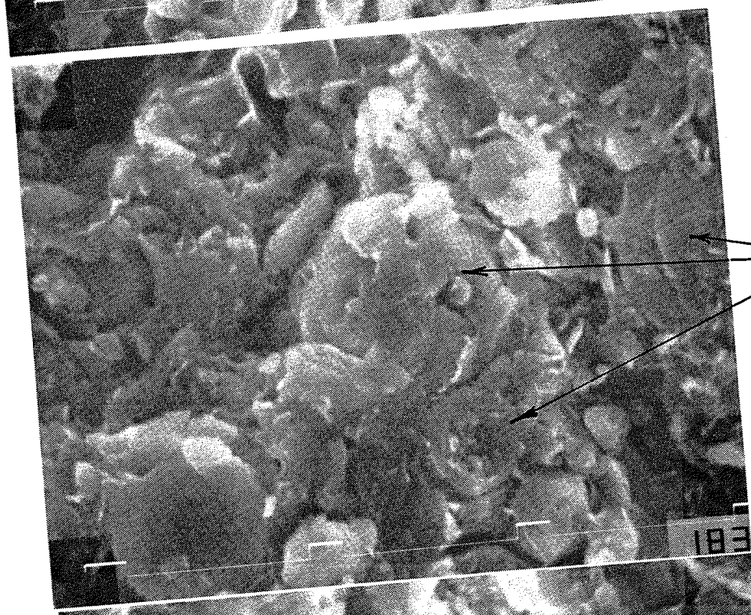


Photo 4.16a - Grossissement 3500 - Abondance de fossiles dans les constituants (42B.rvL)

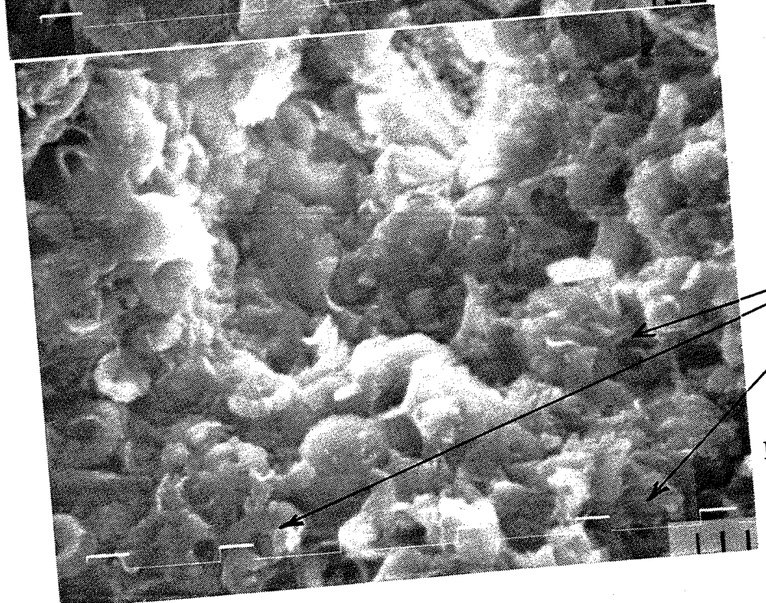


Photo 4.16b - Grossissement 2000 - Fossiles inclus dans les argiles (42B.rvL)

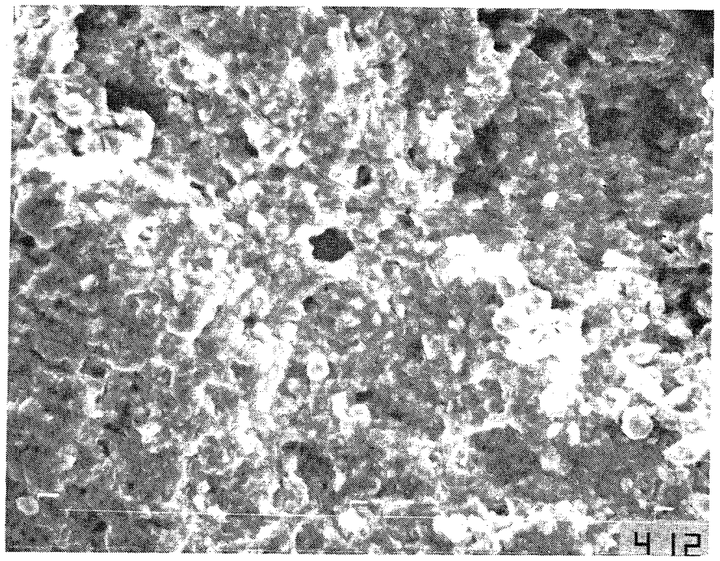


Photo 4.17a - Grossissement 500 - Texture lâche (40B.rvL)

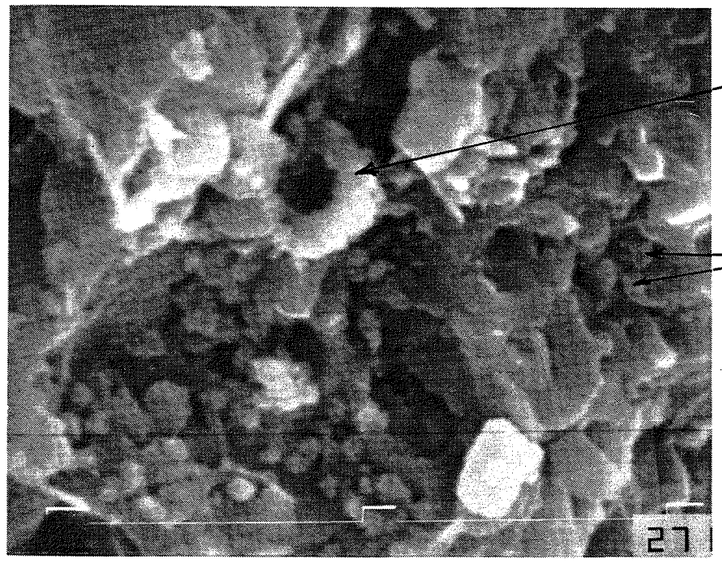


Photo 4.17b - Grossissement 5000 - Mélange d'argiles, de fossiles et de petits grains de calcite (40B.rvL)

Photo 4.18 - Vue d'un bloc de TN en voie de délitage (torrent de Poche - fenêtre de Barcelonnette)

Photo 4.19 - Site de Boulc (Drôme) - Coulées dans les marnes oligocènes et valanginiennes (à gauche) et dans les TN aptiennes et callovo-oxfordiennes (à droite)

Chapitre 5 :

Aperçu du comportement des Terres Noires altérées

5.1 Essai de cisaillement rectiligne des Terres Noires altérées

5.1.1 Préparation du matériau et exécution de l'essai

Les matériaux pris pour effectuer ce type d'essai sont notamment des produits altérés naturellement, seul l'échantillon 30.asT étant altéré par 4 cycles de séchage - humidification (essai d'altérabilité - paragraphe 6.1 ci-dessous). L'analyse granulométrique de la totalité des matériaux ayant subi l'essai de cisaillement rectiligne n'a pas été réalisée. Mais, comme on l'a vu au 4.7, les TN altérées ont des courbes granulométriques semblables. On peut donc examiner celles-ci à l'aide des diagrammes d'autres matériaux dans le secteur en annexe 2.

Les essais de cisaillement rapide ont été effectués pour deux types de matériaux, dans la boîte à cisaillement normale, d'un diamètre de 60 mm :

- des matériaux secs : 160 g de matériau ont été placés dans la boîte. On a tassé légèrement le matériau avec les mains pour bien le mettre en place. L'essai s'est fait sur une machine Wykeham - Farrance sous des contraintes verticales égales à 20; 50; 100 et 200 kPa. La vitesse choisie est de 1,2 mm /mn;

- des matériaux imbibés : 160 g de matériau sec ont été placés dans la boîte et immergés dans l'eau pendant 24 heures et soumis ensuite à des contraintes de 20; 50; 100 et 200 kPa avec une vitesse de 1,2 mm /mn.

5.1.2 Résultats

Les courbes contrainte - déplacement (fig.5.1 et annexe 4) ne montrent pas de pics. Elles ont une allure sembable à celles des sables lâches. La résistance des matériaux secs a tendance à augmenter avec le déplacement. Cette augmentation est d'autant plus grande que la contrainte normale est élevée. Les courbes des matériaux imbibés sont beaucoup plus stables, atteignant un palier aux grands déplacements.

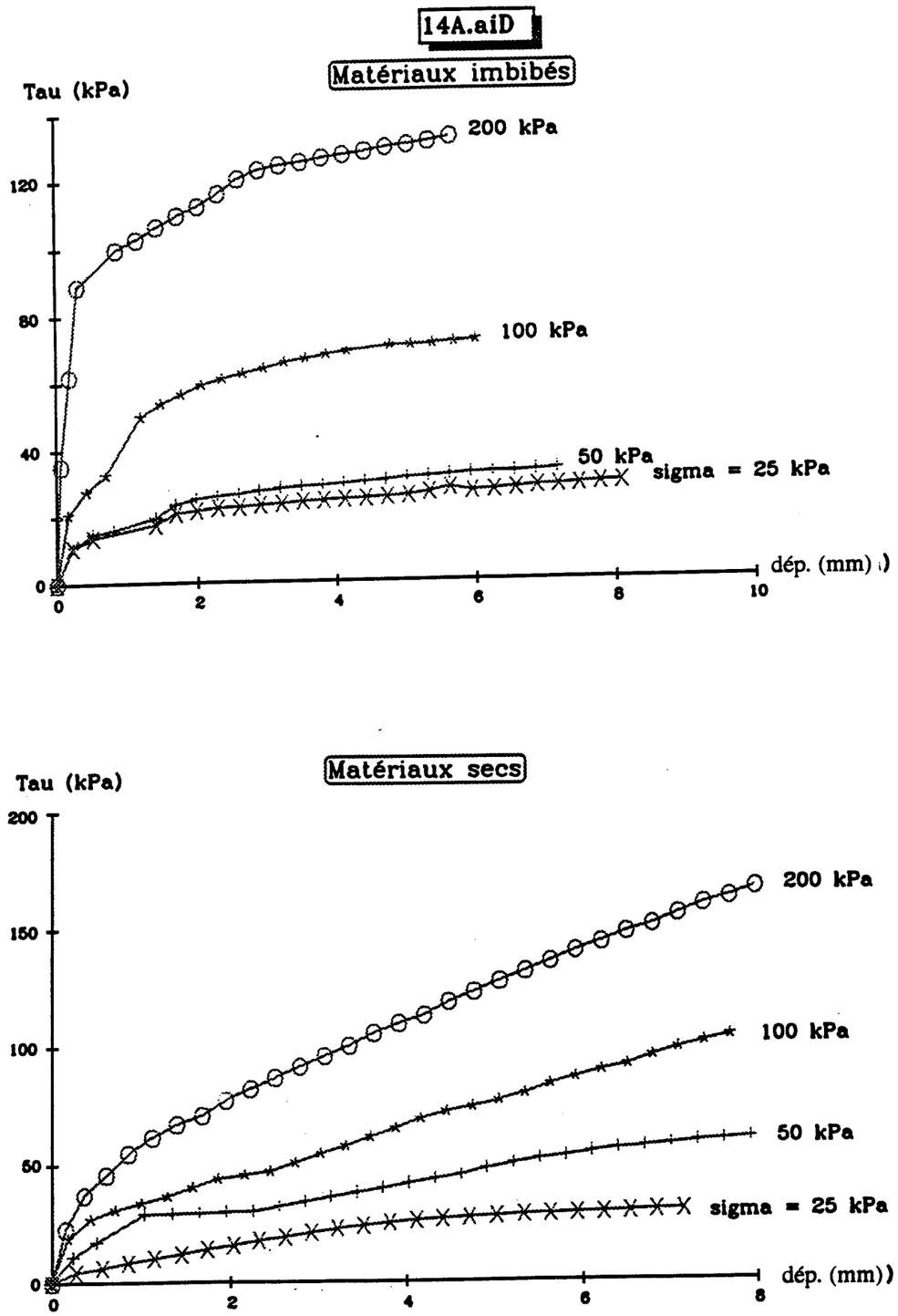


Fig. 5.1 - Courbes contrainte-déplacement des matériaux secs et imbibés

La tendance à l'augmentation de la résistance des matériaux secs avec le déplacement nous a semblé anormale. Dans un premier temps, nous avonc cru que cette anomalie était causée par l'insuffisance du déplacement. Nous avons donc poursuivi l'essai plus longtemps. Hélas, cette tendance a subsisté pour un déplacement atteignant 11 mm. Le fait ne peut être expliqué que par la taille des grains du matériau. Comme l'on a décrit au 4.1, les produits altérés sont souvent des limons, mélangés avec des paillettes en voie d'altération. Ces dernières ont une taille de l'ordre de 5 mm et se révèlent trop grandes pour la boîte à cisaillement normale. Ce sont ces grandes paillettes qui, en s'engrenant, tendent à bloquer le cisaillement.

Il serait intéressant de réaliser l'essai de cisaillement sur ce type de matériau dans une boîte de plus grande dimension qui permettrait d'atteindre des déplacements de plus grande amplitude. On obtiendrait ainsi le pic correspondant à la rupture de ces paillettes après leur réarrangement. La petite boîte de cisaillement comme celle qu'on a utilisée, ne permet d'atteindre que des déplacements du même ordre de grandeur que la taille des plus grandes particules. On ne dépasse donc pas le stade de réarrangement et c'est pourquoi on n'aboutit pas au stade de cisaillement.

L'anomalie s'estompe à l'essai d'imbibition grâce au rôle lubrifiant des particules par l'eau et à la détérioration des plaquettes; car les paillettes, humides et fragiles, sont plus facilement brisées par le déplacement relatif des deux demi-boîtes et s'orientent selon le plan de cisaillement.

Malgré les problèmes décrits ci-dessus, nous avons poursuivi l'essai pour obtenir enfin les valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion (tab. 5.1). Les diagrammes de σ-τ sont présentés dans la figure 5.2 et dans l'annexe 4. Il faut noter que ces valeurs ne sont données que pour permettre la comparaison entre matériaux secs et imbibés.

Avec des diagrammes contrainte-déplacement qui ne présentent pas de pics (fig. 5.1), la détermination de τ_{max} semble impossible. Mais systématiquement, durant l'essai, la contrainte de cisaillement chute momentanément avant de reprendre sa croissance régulière et nous avons choisi la valeur de ce point intermédiaire comme contrainte de ciasaillement maximale. Ce phénomène correspond sans doute à une phase du

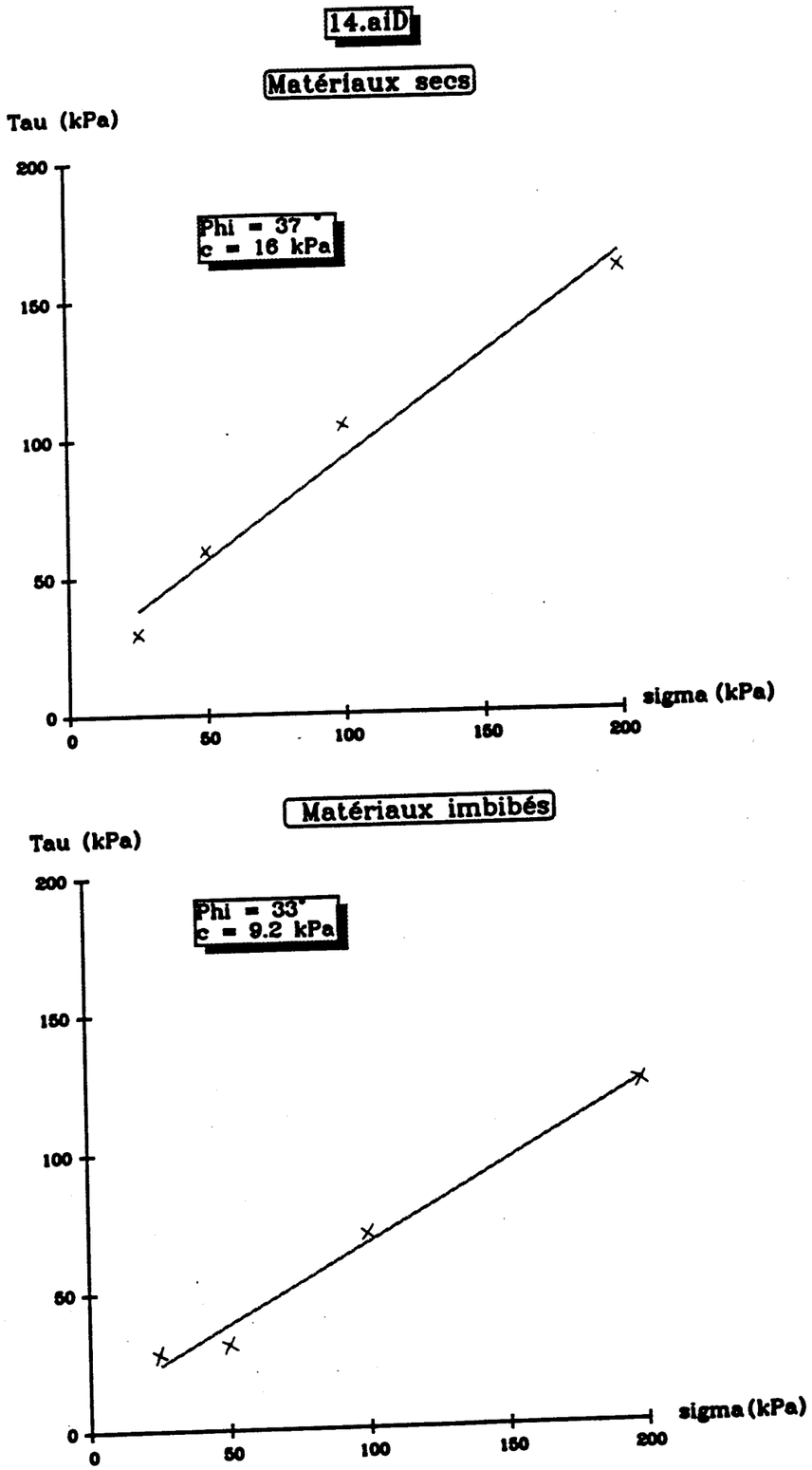


Fig. 5.2 - Paramètres c et φ des matériaux secs et imbibés

réarrangement et non pas à une véritable rupture globale. La contrainte de rupture est probablement au-delà des valeurs τ_{max} retenues pour le calcul de φ et c.

Echantillon	Matériaux imbibés		Matériaux secs	
	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)	φ (°)
5A.asT	7	28	18	35
7B.asT	10	38	3,6	43
12.aiD	6,8	39	34	40
14.aiD	9,2	33	16	37
30.asT	9	30	10	39*

Tab. 5.1- Valeurs des résistances au cisaillement des échantillons altérés naturellement et au laboratoire

(*): Echantillon altéré au laboratoire

Selon les résultats (tab. 5.1), on constate que φ varie entre 35° et 43°, et c entre 3,6 et 34 kPa pour des matériaux secs. Une fois imbibés, leur angle de frottement est entre 28° et 39° et leur cohésion entre 7 et 10 kPa. Des matériaux secs aux mêmes matériaux imprégnés, on distingue, dans certains cas, une tendance à la diminution de c et de φ. $c_{sec} > c_{humide}$ peut être due à la cohésion des paillettes qui diminue à cause de leur détérioration par l'eau.

Les produits d'altération des TN ont un angle de frottement très proche de celui du sable. De plus, elles ont encore une cohésion due au liant carbonaté, comme on l'a vu au paragraphe 4.3. L'imbibition du matériau pendant 24 heures, qui détruit cette liaison non stable, et la lubrification par l'eau, font diminuer leur résistance au cisaillement.

Un seul échantillon altéré au laboratoire a été essayé . On note que ses valeurs de c et φ ne se distinguent pas de celles des matériaux altérés naturellement. Il serait intéressant de poursuivre cette comparaison.

5.2 L'essai pénétrométrique dynamique

5.2.1 Introduction

Nous avons déjà étudié les caractéristiques des TN altérées à l'aide d'essais de laboratoire dont les résultats sont présentés dans le chapitre 4 et le paragraphe 5.1. Nous savons très bien que les résultats d'essais de laboratoire ne donnent pas une image complète des TN altérées en ce qui concerne leur comportement, l'épaisseur de la couche d'altération, la différence de comportement de cette couche dans des secteurs divers. Pour mieux les comprendre il faudrait les étudier dans leur contexte naturel, c'est-à-dire les TN en place.

Pour répondre à ces besoins, plusieurs méthodes sont envisageables:

- prospection sismique: cette méthode est rapide, les outils sont légers et maniables mais les résultats en sont imprécis. En effet, elle est appliquée pour prospecter différentes couches de terrain qui, en théorie, devraient être homogènes et isotropes. De plus, la précision sur les épaisseurs calculées y est d'autant meilleure que le contraste entre les différentes vitesses est fort. Dans la réalité, les TN représentent un milieu hétérogène, anisotrope et discontinu. D'autre part, le matériau varie progressivement avec la profondeur ainsi qu'on l'a décrit au paragraphe 4.1. L'applicabilité de la méthode est donc douteuse;

- pénétromètre classique: cette méthode ne s'adapte qu'aux mesures d'une certaine profondeur et le matériel est trop lourd. Or, nous avons affaire à des matériaux ayant une couche d'altération mince et à des essais réalisés dans une topographie peu accessible. Afin d'éluder ces difficultés, et puis qu'un pénétromètre aux performances étendues n'est pas nésessaire, nous avons adopté un outil léger et maniable, permettant de réaliser les essais en n'importe quel site, même si la topographie est peu favorable. Un pénétromètre dynamique adapté à ce type de terrain a donc été fabriqué. Son schéma est donné par la figure 5.3.

5.2.2 Principe

L'essai pénétrométrique consiste à mesurer l'énergie nécessaire pour enfoncer dans le sol un train de tiges muni à son extrémité d'un outil conique normalisé.

L'enfoncement des tiges est produit par des chocs successifs appliqués à l'aide d'un mouton tombant d'une hauteur constante. La résistance enregistrée est une résistance dynamique de pointe, exprimée par le nombre de chocs nécessaires pour enfoncer la tige d'une profondeur donnée.

Cet essai a été réalisé dans tous les trois secteurs.

5.2.3 Description du matériel

Le pénétromètre dynamique I.R.I.G.M. (fig. 5.3) se compose de 4 éléments:

- Le mouton est la partie motrice. Il chute librement d'une hauteur déterminée.
- L'enclume est liée de façon rigide à la tige et lui transmet le choc du mouton. Cette tige, simple ou composée (train de tiges), s'enfonce dans le sol. L'énergie qui lui est transmis est dissipée essentiellement par la résistance à la pénétration de la pointe fixée à son extrémité. On ne peut éliminer totalement le frottement latéral.
- Une autre tige, fixée au sommet de l'enclume (guide), et le long de laquelle coulisse le mouton.
- La pointe, l'instrument de pénétration, est un cône métallique renforcé.

Les principales caractéristiques de ce pénétromètre sont les suivantes:

- poids du mouton: 2,3 kg,
- hauteur de chute constante: 20 cm,
- poids des tiges: 1,020 kg,
- guide d'une longueur de 40 cm, gradué à 10 et 20 cm,
- train de tiges, long au total de 73,5 cm, gradué de 2 en 2 cm, double graduation tous les 10 cm. La longueur graduée est de 50 cm,
- pointe ayant un diamètre de 19 mm, la surface de la section droite du cône est de 3,14 cm^2, sa hauteur 17 mm et l'angle d'ouverture de sa pointe 60°,
- mécanisme de levage: à main.

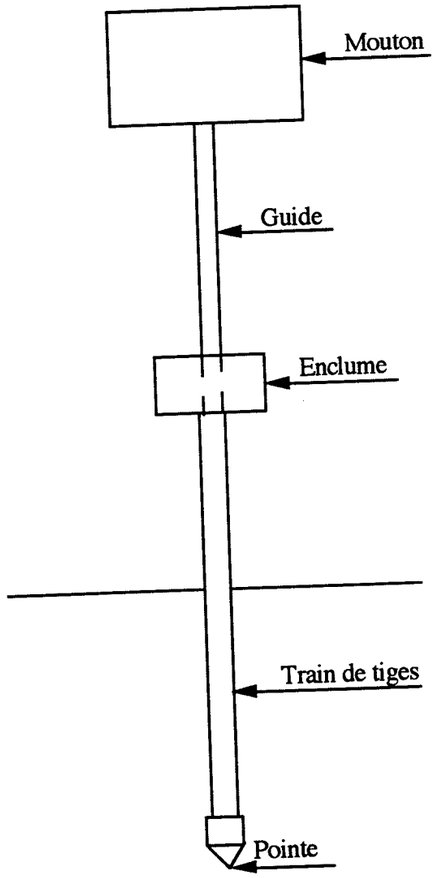


Fig.5.3 - Schéma du pénétromètre I.R.I.G.M.

5.2.4 Mode opératoire de l'essai

- Une planchette trouée en son centre est posée à l'emplacement de l'essai. Elle sert de repère fixe. Placer le pénétromètre dans le trou et enfoncer légèrement sa pointe pour que la base de la tige soit au niveau du bord de la planchette.

- Soulever le mouton jusqu'au repère à 20 cm du guide et le laisser tomber librement sur l'enclume en comptant le nombre de chocs. Continuer jusqu'au moment où le premier repère de la tige arrive au niveau de la planchette.

- Noter les valeurs d'enfoncement et le nombre de chocs.

- Continuer l'essai jusqu'au repère à 50 cm ou jusqu'au moment où la pointe ne peut plus s'enfoncer dans le terrain. On atteindra donc le refus qui correspend aux alentours de 30 coups de chocs.

5.2.5 Présentation de résultats

Les résultats pénétrométriques dynamiques obtenus sont généralement présentés soit par le nombre de coups pour un enfoncement donné, soit par le résistance dynamique de pointe en fonction de l'enfoncement.

Nos résultats sont présentés selon ce second critère à l'aide de la formule des Hollandais:

$$Rd = \frac{M^2.H}{A.e\,(M+P)}$$

avec:

Rd: résistance dynamique de pointe (kg/cm^2),

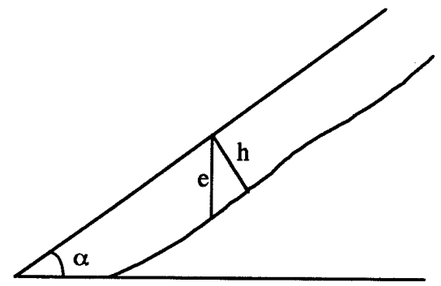
M: poids du mouton (kg),

H: hauteur de chute (cm),

A: section droite de la pointe (cm^2),

P: poids des tiges (kg),

e: enfoncement du train de tiges pour un coup de mouton (cm).



On note que l'enfoncement e sur les diagrammes 5.4 est uniquement la profondeur apparente. La vraie profondeur de la roche saine (surface AA') dépend de e et aussi à la valeur α, pente du talus.

Si l'on appelle h, l'épaisseur de la couche d'altération, on a :

$$h = e \cos \alpha$$

Au sujet des résultats présentés dans la figure 5.4 et dans l'annexe 5, on peut faire les remarques suivantes:

- Le numéro (10, 17, 37....) désigne l'emplacement de l'essai, qui coincide avec celui où ont été prélevés les échantillons utilisés pour les essais d'identification.

- Les numéros 37-A, 37-B, 37-C désignent des essais effectués sur un même site, en des points très voisins.

- La couche d'altération des TN de Draix est souvent moins épaisse, et on a pu y réaliser un grand nombre d'essais.

- Un essai a aussi été réalisé à Clelles (une trentaine de kilomètres au Sud de Grenoble), mais il ne lui correspond pas d'essais d'identification ou minéralogiques.

5.2.6 Constatations

En observant l'aspect des diagrammes pénétrométriques (annexe 5 et fig. 5.4), on voit se dégager trois groupes de comportement:

- Groupe 1. La fig. 5.4a illustre l'allure générale des diagrammes de ce groupe. La pente très faible de la courbe révèle une croissance rapide de la résistance dynamique avec la profondeur. Sa régularité témoigne pour un matériau homogène, continu et compact. Après 15 cm de pénétration environ, la réduction de la porosité et l'augmentation de la cohésion sont telles que l'on aboutit au refus: l'altération est donc très limitée.

- Groupe 2. Les courbes obtenues (fig. 5.4b) présentent dans l'ensemble une pente moyenne, mais accidentée de nombreuses irrégularités. Celles-ci correspondent à la rencontre soit de fissures ouvertes, soit au contraire de formations indurées (filons de

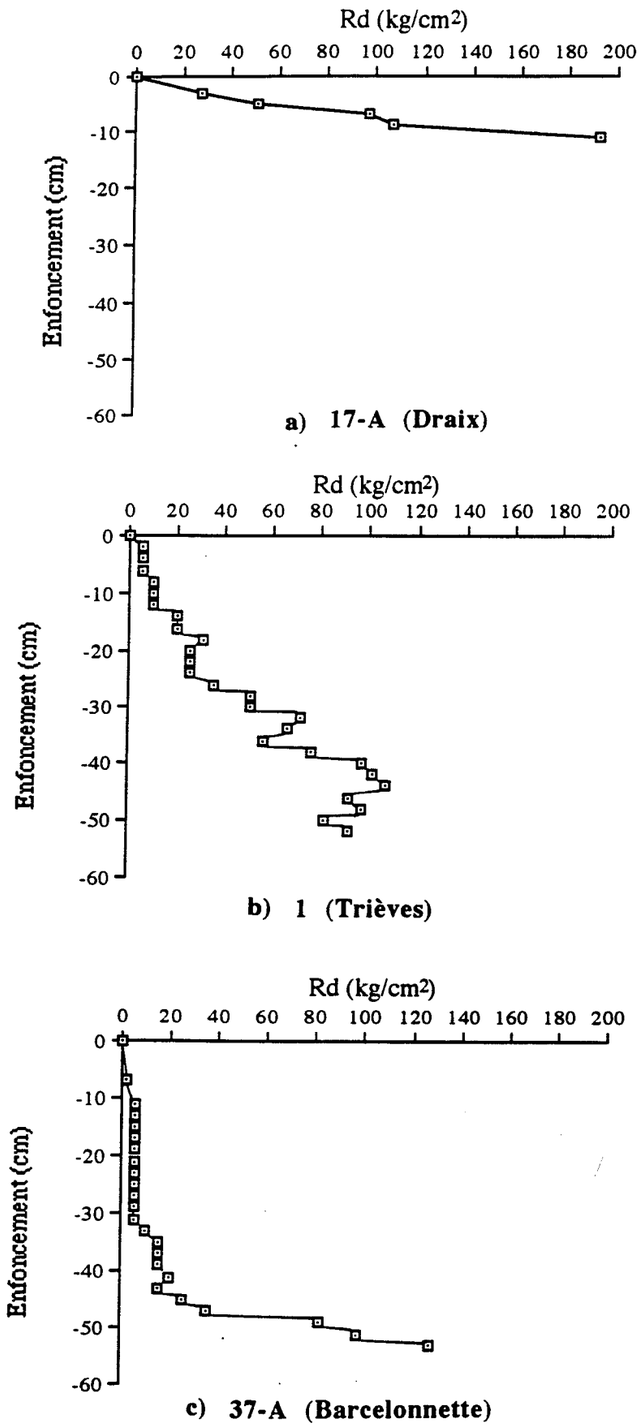


Fig. 5.4 - Quelques diagrammes des essais pénétrométriques

calcite, concrétions calcaires ou niveaux carbonatés réguliers). Le matériau de ce groupe, à l'opposé du précédent, se montre donc désorganisé, à la fois discontinu et hétérogène. La tranche altérée comporte des particules de toutes tailles, des limons argileux aux grosses plaquettes, et sa porosité diminue en général avec la profondeur. Le refus se manifeste vers 40 cm.

- Groupe 3. Dès l'origine, les courbes ont une courbe très raide, quasi verticale (fig. 5.4c). Le phénomène d'altération est très intense. Une altération intense a fortement réduit la résistance du matériau, donc la porosité est importante. Le processus doit tirer son origine d'actions physiques superficielles (gel-dégel, humidification-dessication, ...) disloquant la tranche supérieure du terrain. Par les discontinuités ainsi ouvertes, l'eau développe une altération homogène que traduit un indice des vides constant sur la longueur du sondage. Très souvent, cette zone n'est pas traversée totalité et, à 50 cm, on n'a pas encore atteint le refus à 50 cm, dans un matériau essentiellement constitué de grains fins et de petites plaquettes fragiles. Dans d'autres cas (fig. 5.4c), la courbe adopte pour finir une pente très douce, comparable à celle observée dans le groupe 1: ceci correspond probablement à la rencontre d'un matériau très carbonaté.

L'essai 35-B est située dans la coulée du torrent de Poche. Les nombreuses irrégularités du diagramme évoquent bien un matériau dont les composants sont de toute taille (grains fins, cailloux, blocs), ce qui est normal dans ce type de terrain remanié. Les essais 16 et 33 ont le même allure que celui de 35-B, doivent donc concerner le même type de matériau qui est d'origine des éboulis.

La dissemblance de ces trois groupes est due à l'hétérogénéité du matériau, aux conditions climatiques, au relief et aux conditions géologiques. L'hétérogénéité des TN peut être confirmée par le fait que la puissance de la couche d'altération varie parfois beaucoup entre deux essais espacés seulement de quelques décimètres (cf. 24-A et 24-B).

Les diagrammes pénétrométriques des TN du Trièves (2) se rattachent au premier groupe, ceux de Barcelonnette (7) relèvent des deuxième et troisième, et ceux de Draix (21) se partagent entre les trois.

Si l'on réalisait beaucoup plus d'essais en Trièves et à Barcelonnette, on verrait

probablement que les trois types de diagrammes de 3 secteurs se retrouvent dans les 3 groupes. Mais la répartition dans ces derniers ne serait pas la même. En effet, les diagrammes de Barcelonnette se rattacheraient davantage au groupe 3, ensuite au groupe 2 et enfin, au groupe 1; car le substratum y est très fracturé. Par contre, ceux du Trièves révèlerait d'abord le 2, ensuite le 3 et le 1. Les essais faits à Clelles donneraient des diagrammes appartenant plus qu'ailleurs au groupe 1 parce que les TN de cette zone sont plus carbonatées. Cette répartition est déterminée par les facteurs qui provoquent la dissemblance des 3 groupes. Comme on l'a décrit ci-dessus, ces facteurs sont dus aux propriétés intrinsèques du matériau (hétérogénéité) d'une part, et aux conditions extérieures (climat,...), d'autre part.

5.3 Conclusions du chapitre

L'altération est provoquée par l'eau d'infiltration. Les marnes sans fissures ont un coefficient de perméabilité très faible. Elles sont donc peu altérables. Malheureusement, les TN sont des marnes schisteuses. Les TN à Barcelonnette sont, de plus, fissurées à la suite de mouvements tectoniques. Ces fissures et micro-fissures qui sont favorables à l'infiltration, ont été détectées lors des essai pénétrométriques.

L'épaisseur de la couche d'altération des TN dépend du climat, de la topographie..... mais, en général, elle est faible. Si, entre la couche superficielle et la roche saine, il n'existe pas de passage progressif (groupe 3), un glissement plan peut se matérialiser au niveau de leur limite.

Les produits d'altération des TN sont plus limoneux qu'argileux: ils sont donc très érodables. Mais si la surface est couverte par une concrétion carbonatée, cette dernière résiste efficacement au ruissellement, ce qui explique, à Draix, la stabilité de talus fortement pentée.

Dans un secteur aride, comme celui de Draix, où la végétation est pauvre, le sol, peu protégé, subit une désagrégation physique intense. Dans les matériaux clastiques produits, les actions pour lesquelles la surface des particules entre en ligne de compte,

peuvent jouer leur rôle. Cela n'est pas souvent le cas, car les pentes sont fortes et les produits d'altération vite entraînés par les eaux courants avant d'avoir pu se désintégrer sur place. Au contraire, l'altération chimique par décarbonatation est plus intense à Barcelonnette et en Trièves où, grâce à l'humidité, le manteau végétal est plus développé. A la dissolution des carbonates s'ajoute l'oxydation, souvent associée à l'hydratation. Les formations issues de ces derniers processus sont des limonites et du gypse.

Les essais de cisaillement à la boîte de Casagrande réalisés sur des produits altérés montrent leur fort angle de frottement et une cohésion non négligeable. Les courbes contrainte-déplacement prouvent que la phase de réarrangement des grains est très importante, si bien que la phase de cisaillement ne peut apparaître pour des essais faits dans la boîte de cisaillement d'un diamètre de 60 mm.

5.4 Conclusions de la deuxième partie

Le terme de "Terres Noires" recouvre des matériaux que l'on pourrait qualifier souvent de marnes, mais qui parfois débordent cette qualification lithologique vers le pôle carbonaté ou le pôle argileux. Ce sont des roches finement litées de teinte noire ou grise.

Les TN ont été édifiées par des courants de turbidite dans un bassin peu profond. Elles se composent d'une phase détritique et d'une phase carbonatée. Granulométriquement, leur teneur en fines est de 56 à 89 % et leur teneur en particules < 2 µm est très basse, inférieure à 12 %.

Leur teneur en carbonate varie dans une large gamme. En effet, elles contiennent de 20 à 80 % de $CaCO_3$. Cette variation est provoquée par l'occurrence de micro-faciès distincts, tels que des concrétions de calcaires ou de fins lits carbonatés.

La phase détritique se situe en majorité dans le domaine des silts. La proportion de matériaux argileux y est faible et les smectites n'apparaissent que dans les interstratifiés. L'illite constitue une fraction permanente et majeure parmi les minéraux argileux. Viennent ensuite la chlorite et les interstratifiés. La kaolinite existe en petite quantité. Les

deux derniers minéraux sont absents dans des échantillons de Barcelonnette. L'altération ne change pas la composition minéralogique des TN. En effet, celle-ci ne varie pratiquement pas entre échantillons sain et altéré.

La constitution dominante silteuse des TN est confirmée par une indice de plasticité d'environ 11 % et une valeur de bleu variant entre 0,3 et 2,7.

Le caractère spécifique de l'altération des TN est une décarbonatation assumée par la circulation des eaux d'infiltration. Celles-ci ne peuvent évidemment connaître leur plein effet que si la voie leur a été ouverte par une fragmentation suffisante de la masse rocheuse (surfaces litage et discontinuités transversales diverses), qui, sauf exception, n'est suffisamment développée que dans une tranche superficielle. La décarbonatation est donc d'autant plus intense que la densité du réseau de discontinuités est plus grande.

La calcite dissoute est entrainée par l'eau. Il en résulte la formation d'un matériau résiduel constitué par un silt entièrement décarbonaté, qui représente le matériau initialement déposé dans le bassin de sédimentation. D'autre part, l'eau de percolation, chargée de calcite, migre vers le bas des versants ou monte dans les pores de la roche par capillarité et, s'évaporant en surface, dépose une cuirasse carbonatée.

La perte de matière par décarbonatation, calculée pour le matériau constituant le remblai des Blancs, représente approximativement 2 % en poids du carbonate initial par an.

Les essais granulométriques par voie humide sur matériaux altérés confirment ces constatations. Le matériau complètement altéré, tamisé par voie humide, restitue les matériaux originels, qui sont des silts argileux.

Les observations au MEB confirment le mécanisme d'altération par décarbonatation. Elles nous montrent l'image de la dissolution de la calcite dans les TN, la disparition des rhomboèdres de calcite et l'augmentation da la porosité quand on passe des TN saines aux TN altérées. Les cristaux de $CaCO_3$ disséminés dans les paquets argileux sont dissous au voisinage des vides.

Le MEB révèle également la présence de nodules de pyrite dans les échantillons de Barcelonnette. L'altération de celle-ci, en présence de calcite, conduit à l'apparition d'un sulfate d'abord anhydre (anhydrite), puis de gypse. Cette dernière réaction est accompagnée par un foisonnement qui provoque l'exfoliation de la roche. La pyrite pourrait donc jouer le même rôle que la smectite dans d'autres marnes en désorganisant les TN et contribuerait ainsi à la fréquence des coulées dans le secteur de l'Ubaye.

La texture et la teneur en carbonate jouent un rôle important dans le comportement diversifié des TN. Par exemple, une texture alvéolée est révélatrice de leur qualité médiocre: voir les échantillons de la valléee du Riffol et la plupart de ceux de Barcelonnette. Au contraire, une texture homogène et compacte leur assure une bonne tenue, comme au remblai des Blancs. Vient ensuite l'existence de composants indésirables comme les argiles gonflantes ou la pyrite.

A titre de curiosité, nous avons fait des études physiques, minéralogiques et texturales sur des marnes oligocènes, aptiennes et valanginiennes de Boulc près de Luc-en-Diois afin de les comparer aux TN. Leurs teneurs en carbonates sont plus élevées. La montmorillonite domine leur fraction inférieure à 2 µm, viennent ensuite l'illite et la kaolinite. Les interstratifiés y existent, mais en très moindre quantité. La phase carbonatée se compose de nanofossiles (coccolithes et coccosphères) et de grains de calcite qui créent un effet d'engrenage, leur conférant une texture compacte. Pourtant, l'existence de nombreux micro-vides et de montmorillonite provoque leur sensibilité à l'eau..

Troisième partie

L'emploi des Terres Noires en remblai routier

Chapitre 6 :

Les essais mettant en évidence le caractère évolutif des marnes

INTRODUCTION

Le projet de l'autoroute A51, qui devrait relier Grenoble à Sisteron, est actuellement étudié par le Ministère de l'Equipement. Dans le Trièves, elle traversera différents types de terrains, notamment les TN jurassiques qui représentent l'une des grandes formations du Sud-Est de la France. L'autoroute devra franchir environ 3 km de TN dans cette région. Un des principaux problèmes posés par les terrassements routiers est de réemployer en remblai des matériaux extraits des déblais, car ces TN sont réputées pour avoir un caractère évolutif. Les blocs extraits, rocheux au début, perdent progressivement leur cohésion au bout de quelque temps d'exposition aux intempéries et se transforment en matériaux terreux.

Depuis longtemps le matériau marneux est étudié par de nombreux auteurs. Ils ont étudié une marne déterminée sous différents aspects: aspect mécanique comme J. P. SERRATRICE (1978), J. CAMAPUM DE CARVALHO (1985); aspect géologique, minéralogique et physique comme M. HAVARD (1991); aspect textural comme J.P. GIGAN (1974), A. LE ROUX (1976). Certains auteurs ont essayé de trouver une liaison entre leur comportement et leur texture.

En général, chaque matériau a des caractéristiques distinctes. Voire, deux matériaux marneux ayant une teneur semblable en carbonate mais de texture différente ont une stabilité différente vis-à-vis des agents atmosphériques. Les TN sont des marnes ayant un caractère évolutif, comme d'autres marnes, mais elles ont aussi leurs caractères propres. Ce sont des marnes métamorphiques, litées, schisteuses et le matériau hétérogène et anisotrope. Leur seule hétérogénéité a déjà rendu difficile leur détermination physique et mécanique. Leur identification détaillée, indispensable afin de comprendre leur comportement, est traitée dans la deuxième partie.

Le problème posé, après avoir reconnu leurs caractéristiques, concerne ensuite leur réemploi en remblai routier. Car la granulométrie et les caractéristiques mécaniques des TN mises en remblai peuvent évoluer à l'intérieur de l'ouvrage après sa construction. Les blocs peuvent se fragmenter pour aboutir à des matériaux fins. Au fur et à mesure, le remblai rocheux du début pourrait ainsi devenir terreux après un certain temps, avec des caractéristiques mécaniques amoindries. Les parties du remblai les plus vulnérables,

exigeant le plus de précautions, sont les talus, soumis à des variations de leur teneur en eau.

Puisqu'on ne parvient pas à trouver des matériaux "nobles" dans la région, le réemploi de ces TN semble inévitable. Quelles sont alors les conditions de mise en oeuvre pour obtenir un remblai satisfaisant? Nous essayons de répondre à cette question dans la troisième partie. Celle-ci est consacrée à l'étude des propriétés mécaniques des TN en fonction de leur teneur en eau. Elle porte sur un sol de référence, broyé, brassé pour obtenir un matériau homogène et compacté au laboratoire. Notre choix s'est porté sur les TN du Col du Fau, prises dans le carotte X345, de 7,60 à 9,60 m de profondeur, désignées par le numéro d'échantillon 30.rsT. Les essais Proctor, CBR, oedométriques et de cisaillement à la boîte de Casagrande ont été réalisés sur ce type de matériau.

Il faut souligner que les résultats apportés par ces essais sont propres à un matériau et une condition d'essai déterminés. Si l'on prend un autre échantillon pour réaliser ces types d'essais, on aura probablement des résultats différents, car les TN sont hétérogènes. Et si l'on change les conditions d'essai, par exemple si l'on confectionne l'éprouvette sous une contrainte différente, les caractéristiques oedométriques et les paramètres c et φ ne seront pas les mêmes.

Dans le chapitre 6 nous examinerons les essais mettant en évidence le caractère évolutif des marnes: essai de dégradation due au gonflement, essai d'altérabilité ainsi qu' essai de fragmentation. Les deux derniers sont réalisés sur le matériau rocheux, si l'on envisage de l'utiliser dans la construction de remblais ou de couches de forme. Les résultats de ces deux types d'essais seront utilisés comme paramètres pour situer le matériau rocheux dans la classification de R.T.R. Dans un but comparatif, ils ont été effectués sur les échantillons sains de la fouille du Fau et du Col du Fau, et d'aure part sur ceux du remblai des Blancs, pour évaluer la qualité des cailloux subsistant plus de 15 ans après la construction. A la différence de l'essai d'altérabilité, qui étudie la sensibilité de la roche à des cycles d'humidification-séchage, l'essai de dégradation due au gonflement étudie en plus le problème du délitage, mais dû cette fois-ci au gonflement de ses constituants hydrophiles.

En ce qui concerne les localités d'où proviennent les échantillons, on se réfèrera aux planches 1, 2 et 3.

6.1 L'essai d'altérabilité

6.1.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du D_{10} d'un échantillon de granularité 10/20 mm après lui avoir fait subir 4 cycles d'immersion-séchage à l'étuve.

6.1.2 Mode opératoire

Une prise d'essai de 2 kg d'éléments 10/20 mm est placé dans un bac, régalée manuellement et recouverte d'eau. La durée de l'immersion est de 8 heures. L'eau est ensuite éliminée par siphonnage, puis l'échantillon est séché à l'étuve à 105 °C durant 16 heures. L'ensemble des opérations constitue un cycle. Ce cycle est reproduit 4 fois sans interruption. A la fin du 4e cycle, l'échantillon est tamisé au travers d'une colonne de tamis: 10 - 5 - 2 - 1mm. On procède enfin à la pesée des refus sur chacun des tamis.

6.1.3 Calcul

A partir des pesées du refus sur chaque tamis, on établit la courbe granulométrique de l'échantillon après 4 cycles d'immersion-séchage, et on détermine le D_{10} correspondant à cette courbe. On calcule alors le coefficient d'altérabilité DG du matériau par le rapport:

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant le } 1^{er} \text{cycle d'immersion-séchage}}{D_{10} \text{ du matériau après le } 4^{e} \text{ cycle d'immersion-séchage}}$$

où D_{10} est le diamètre correspondant au tamisat de 10%

La courbe granulométrique du matériau avant le 1er cycle d'immersion-séchage (c'est à dire fraction 10/20mm) est une droite joignant les points d'abscisses: 20 mm -

point vertical 100 % et 10 mm - 0 %. Le D_{10} est alors égal à 11 mm.

6.1.4 Résultats

En cours d'essai, on observe nettement le délitage des matériaux, surtout les TN du Col du Fau. Dans tous les cas, les matériaux se débitent sous forme de plaquettes, à cause de la séparation progressive des lits. Après 4 cycles d'immersion-séchage, les matériaux recueillis, transformés en plaquettes et paillettes, ressemblent aux produits altérés sur les talus naturels. Il faut noter que les échantillons du Fau sont un mélange du banc marneux (28A.rsT) et du banc carbonaté (28B.rsT) car ce sont les cailloux recueillis lors du terrassement de la fouille pour construire le château d'eau. Les résultats représentent donc le carctère évolutif de l'ensemble.

Localité	Echantillon	DG	FR	FD	Symbole RTR 92
Le Fau	28A.rsT 28B.rsT	1,07	3,6	27,7	R33
Les Blancs	29.rsT	8,5	5,5	30,4	R32
Col du Fau	30.rsT	31,4	3,6	31,8	R31

Tab. 6.1 - Résultats des essais d'altérabilité et de fragmentabilité

Les résultats donnés dans le tableau 6.1 et les courbes granulométriques de la figure 6.1 nous montrent que le coefficient de dégradabilité est de 1,07 pour les échantillons au Fau, 8,5 pour les blocs résiduels du remblai et 31,4 pour les échantillons du Col du Fau.

- Le délitage débute par suite de la diminution puis de la disparition de la contrainte normale s'exerçant sur les plans de discontinuité et ensuite par une action périodique de l'eau telle que gel-dégel ou humidification-séchage. Les cailloux du remblai des Blancs, longtemps éprouvés par ce processus, devraient donc manifester un phénomène de

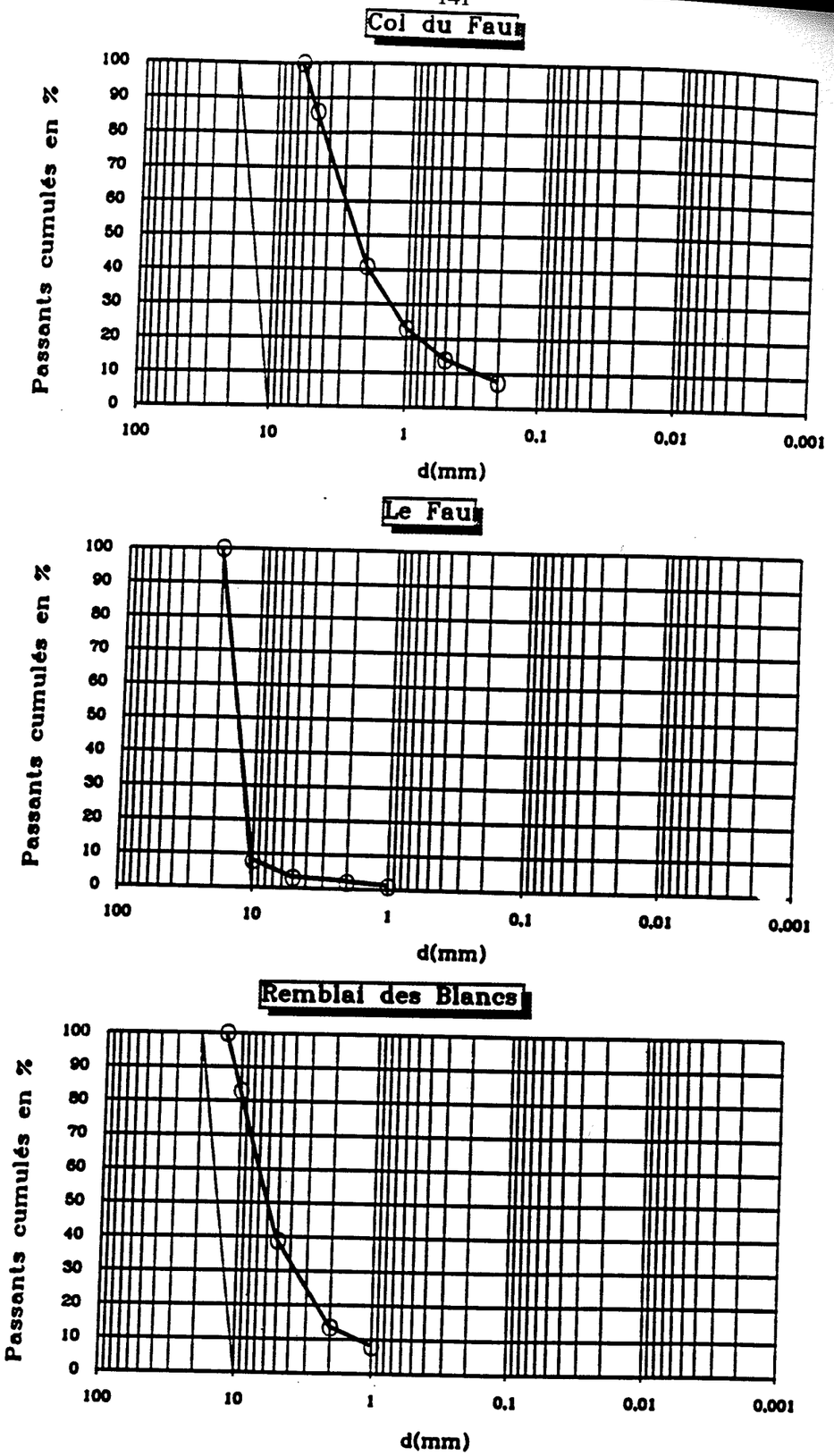


Fig.6.1 - Courbes granulométriques d'essai d'altérabilité

fatigue. Pourtant leur coefficient de dégradabilité n'est pas élevé. Et en examinant les carottes du remblai des Blancs, où subsistent encore pas mal de graviers et de gros cailloux, on devine qu'au départ on avait affaire à un matériau solide et peu altérable (teneur en $CaCO_3$ plus élevée).

- L'échantillon du Fau a une courbe granulométrique très proche de la ligne "10-20", alors que celle du Col du Fau s'en écarte et se déplace carrément vers la droite. D'autre part, la valeur de bleu de l'échantillon du Col du Fau est plus élevée que celle du remblai des Blancs et de la fouille du Fau (tab. 4.14a). Ici, la roche est très susceptible envers l'altérabilité, ce qui doit tenir à sa texture initiale, très poreuse et son éventuel teneur en argiles élevée.

Une autre étude des effets du séchage-humidification a été menée sur les échantillons 8.rsT et 9B.rsT, soumis à 10 cycles d'immersion et de séchage. Les courbes granulométriques, initiale, puis après 3, 5 et 10 cycles, sont représentées sur la figure 6.2. Noter que la dernière courbe, après 10 cycles, a été obtenue par voie humide. Les résultats illustrés par ces courbes amènent aux conclusions suivantes:

- Les courbes ont exactement le même allure que celles des matériaux altérés naturellement (cf. 4.7). L'essai d'altérabilité par séchage-humidification a bien reflété le phénomène naturel.

- Il nous paraît que l'échantillon 8.asT est plus altérable que le 9B.asT, car les courbes "sèches" de ce dernier sont plus serrées. Par contre, leurs courbes "humides" sont vraiment superposées, comme si elles étaient issues d'un même matériau. Ceci est probablement dû au fait que les grains apparus en cours d'immersion s'agglomèrent lors du séchage mais se retrouvent libérés par le tamisage par voie humide, de telle sorte que l'on voit réapparaître le matériau fin propre à la phase d'altération finale. Ce matériau "final" est certainement la suspension originelle qui, au cours du Jurassique, s'est déposée pour donner naissance aux TN. Il faut d'ailleurs noter que ces deux échantillons ont une texture semblable et une teneur en carbonate à peu près équivalente.

- Le déplacement des courbes granulométriques vers la droite, évoque donc un

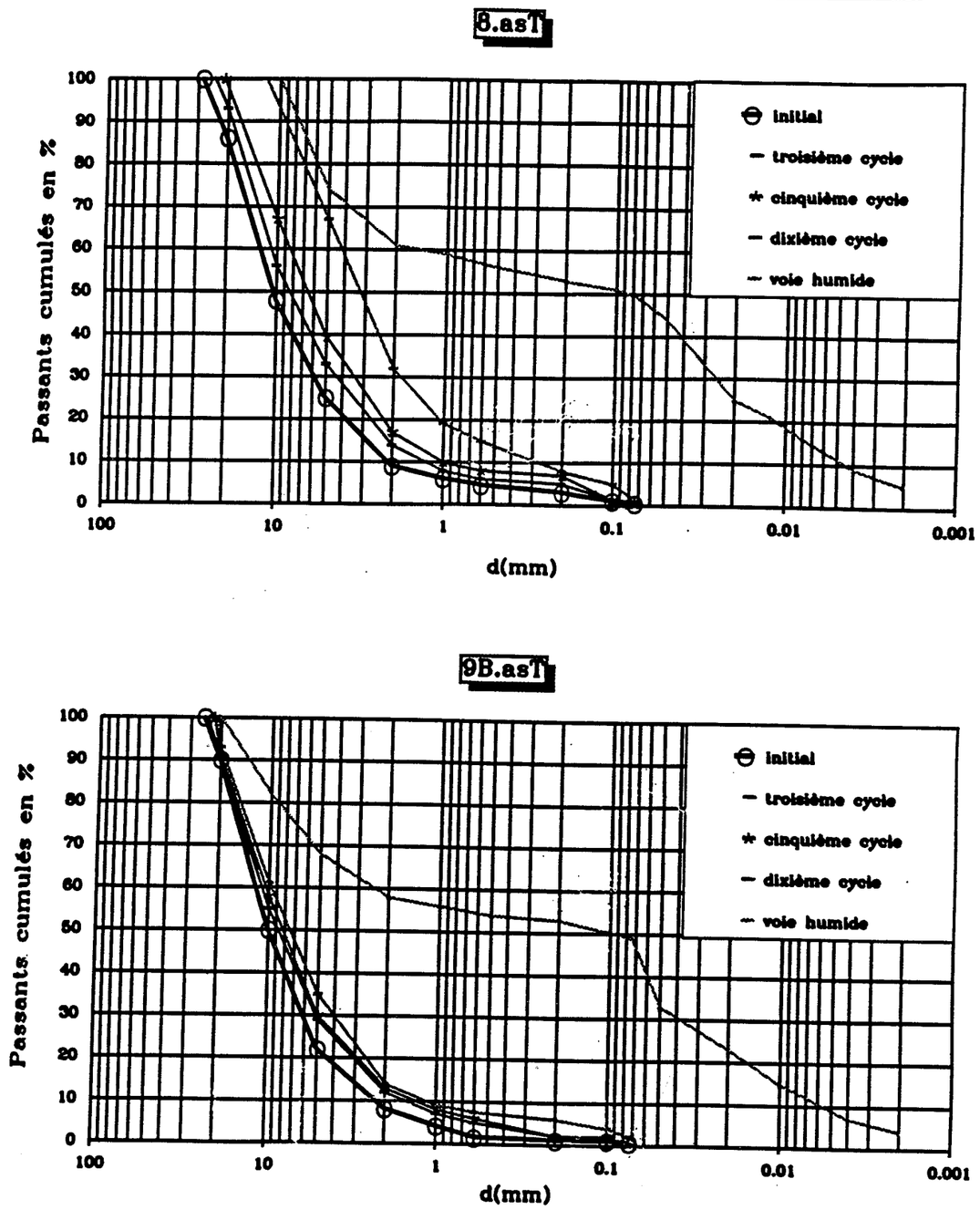


Fig.6.2 - Courbes granulométriques de 10 cycles d'immersion-séchage des échantillons prélevés dans les talus du Trièves

retour du matériau vers ses origines. Les courbes granulométriques de la voie humide présentées au 4.7 et en annexe 2 révèlent sans doute les matériaux mis en place par décantation dans le bassin originel et celles de la voie sèche, les matériaux altérés en place.

- On peut également deviner que, lors de chaque cycle d'altération, les plaquettes minérales, tout en perdant de leur volume, conservent pourtant leur forme tout au long du processus. Ceci explique que les courbes sèches restent parallèles, tout en se décalant dans le sens de dimensions décroissantes, chacun des grains ayant subi la même réduction homothétique.

Pour résumer, l'essai d'altérabilité par séchage-humidification est prometteur pour l'étude du processus d'altération des TN au laboratoire et pour celle des caractéristiques du produit altéré.

6.2 L'essai de fragmentabilité

Deux types d'essai ont été réalisés selon deux méthodes différentes.

6.2.1 Selon la méthode de M. Schaeffner

Principe

L'essai consiste à déterminer la réduction d'un échantillon de granularité 10/20 mm après lui avoir fait subi un pilonnage à l'aide de la dame Proctor normal.

Mode opératoire

Une prise d'essai de 2 kg des fractions 10/20 mm est placée dans le moule CBR, régalée manuellement, puis soumise à 100 coups de dame Proctor normal régulièrement répartis sur toute la surface (6 coups en périphérie et 1 coup au centre). Après le pilonnage, l'échantillon est démoulé, désagrégé à main et tamisé au travers d'une colonne de tamis 10 - 5 - 2 - 1 mm. On procède enfin à la pesée des refus sur chacun des tamis.

Calcul

A partir des pesées des refus sur chaque tamis, on établit la courbe granulométrique de l'échantillon pilonné et on détermine le D_{10} correspondant à cette courbe.

On calcule le coefficient de fragmentabilité FR du matériau par le rapport:

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant pilonnage}}{D_{10} \text{ du matériau après pilonnage}}$$

où D_{10} : diamètre correspondant au tamisat de 10%

Comme dans l'essai d'altérabilité, le D_{10} du matériau avant pilonnage est égal à 11 mm.

Résultats

Les résultats sont donnés dans le tableau 6.1 et les courbes granulométriques dans les figures 6.3. Au contraire du DG, le coefficient de fragmentabilité ne varie pas beaucoup: il est situé entre 3,6 et 5,5. Les courbes ont presque même profil et même position quel que soit le lieu de prélèvement.

La fragmentabilité d'une roche dépend de sa dureté et de sa cohésion. Les TN se composent de trois phases: carbonatée, siliceuse et phylliteuse (cf. 4.10). Les deux premières phases se présentent souvent en grains cristallins disséminés dans la dernière et cet état d'agrégation des éléments est semblable dans les 3 échantillons. Les analyses aux rayons X de la roche totale des échantillons 30.rsT et 29.rsT n'ont pas été effectués mais, tenant compte du fait que toutes les analyses d'autres échantillons du secteur ont donné des résultats comparables, on peut penser que les 3 échantillons le sont aussi. Ainsi, leurs indices de fragmentabilité sont-ils proches l'un de l'autre. D'autre part, la teneur en carbonate de 29.rsT, plus altéré, est plus faible, ce qui a pour conséquence l'augmentation de son indice de fragmentabilité.

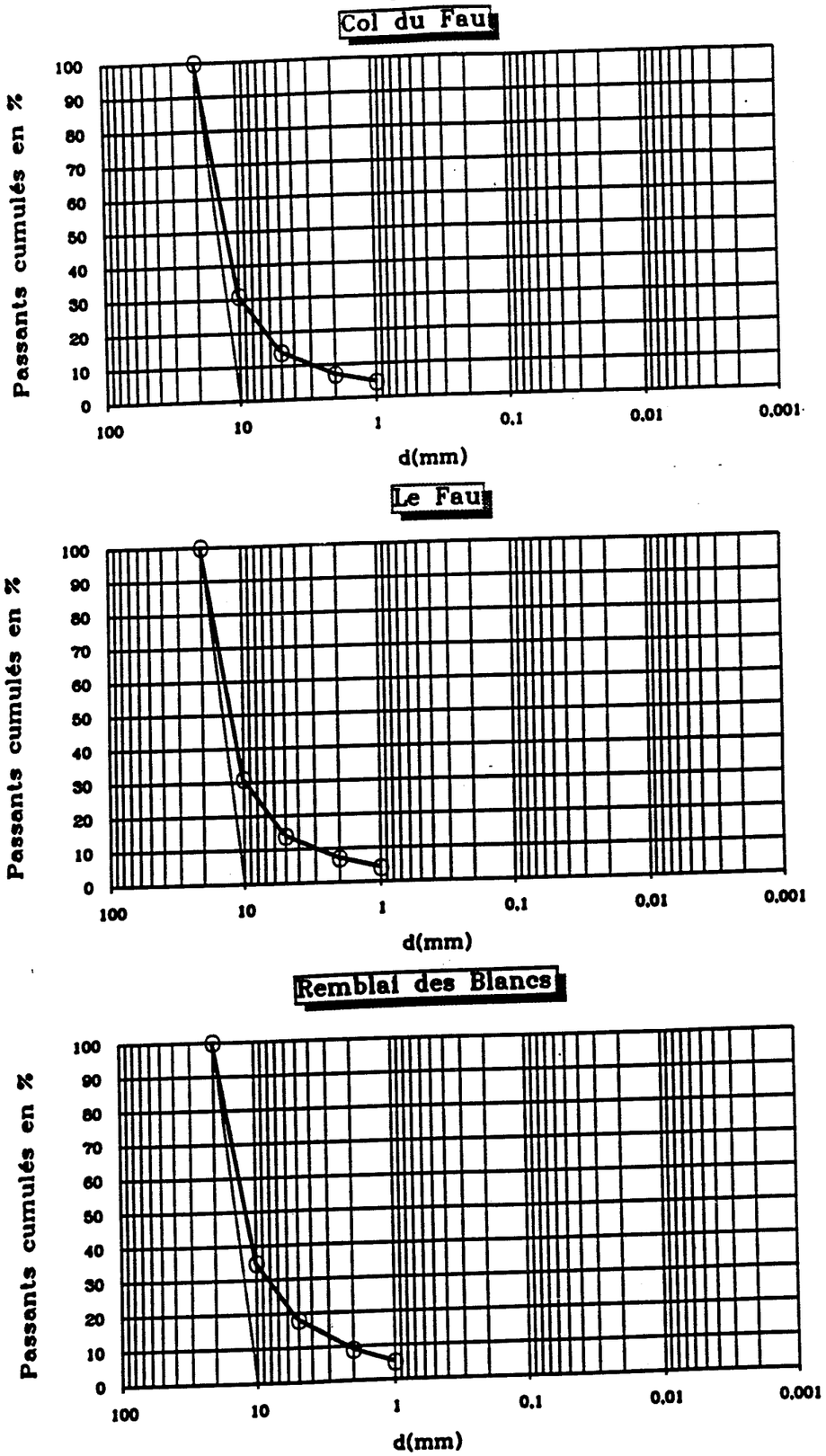


Fig.6.3 - Courbes granulométriques d'essai de fragmentabilité

6.2.2 Selon la méthode du LCPC (Fragmentation dynamique - FD)

Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction à une dimension < 1,6 mm d'un échantillon de granularité 10/20 mm après lui avoir fait subir un pilonnage à l'aide d'une masse métallique.

Mode opératoire

Une prise d'essai de 350 g des fractions 10/20 mm est séchée pendant 24 heures à l'étuve à 105 °C, puis placée dans un moule cylindrique métallique de diamètre 100 mm et régalée manuellement. L'ensemble est placé sur un socle de béton de 25 kg. D'une hauteur de 0,40 m, une masse métallique de 14 kg tombe 28 fois sur l'échantillon.

Après le démoulage, le matériau est tamisé à sec au tamis 1,6 mm.

Calcul

On pèse le tamisat à 1,6 mm et on a le poids P. L'indice de fragmentation dynamique FD est calculé par le rapport:

$$FD = \frac{P}{350} 100$$

Résultats

Les résultats sont donnés dans le tableau 6.1. L'indice de fragmentation dynamique (FD) varie pratiquement de 5 % à 60 %. Il est d'autant plus élevé que la roche est sensible à la fragmentation.

En comparant à la méthode de Schaeffner, on constate que, comme FR, FD varie moins entre 28 % et 32 %. Pourtant, l'ordre de sensibilité n'est plus le même: en effet,

Classe R (suite)

Tableau 5 : classification des matériaux rocheux (évolutifs et non évolutifs)

Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique et le comportement		
Nature pétrographique de la roche			Paramètres et Valeurs seuils retenus	Sous classe	
Roches Sédimentaires	Roches Carbonatées	R_1 Craie	$\rho d > 1,7$	craie dense	R_{11}
			$1,5 < \rho d \leq 1,7$ et $w_n \geq 27$	craie de densité moyenne	$R_{12}h$
			$1,5 < \rho d \leq 1,7$ et $22 \leq w_n < 27$		$R_{12}m$
			$1,5 < \rho d \leq 1,7$ et $18 \leq w_n < 22$		$R_{12}s$
			$1,5 < \rho d \leq 1,7$ et $w_n < 18$		$R_{12}ts$
			$\rho d \leq 1,5$ et $w_n \geq 31$	craie peu dense	$R_{13}th$
			$\rho d \leq 1,5$ et $26 \leq w_n < 31$		$R_{13}h$
			$\rho d \leq 1,5$ et $21 \leq w_n < 26$		$R_{13}m$
			$\rho d \leq 1,5$ et $16 \leq w_n < 21$		$R_{13}s$
			$\rho d \leq 1,5$ et $w_n < 16$		$R_{13}ts$
		R_2 Calcaires rocheux divers Ex : - calcaires grossiers - travertins - tufs et encroûtements, etc...	MDE ≤ 45	calcaire dur	R_{21}
			MDE > 45 et $\rho d > 1,8$	calcaire de densité moyenne	R_{22}
			$\rho d \leq 1,8$	calcaire fragmentable	R_{23}

Tab. 6.2 - Classification des matériaux rocheux (d'après RTR 92)

Classe R (suite)

Tableau 5 (suite)

Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique et le comportement		
Nature pétrographique de la roche			Paramètres et Valeurs seuils retenus	Sous classe	
Roches Sédimentaires	Roches Argileuses	R_3 Marnes Schistes sédimentaires Argilites Pelites ...	FR ≤ 7 et DG > 20	Roche argileuse : peu fragmentable, très dégradable	R_{31}
			FR ≤ 7 et 5 < DG ≤ 20	Roche argileuse : peu fragmentable ou moyennement dégradable	R_{32}
			FR ≤ 7 et DG ≤ 5	Roche argileuse : peu fragmentable, peu dégradable	R_{33}
			FR > 7 et $w_n \geq 1,3\ w_{OPN}$ ou IPI (*) ≤ 2	Roche argileuse fragmentable	$R_{34}th$
			FR > 7 et $1,1\ w_{OPN} \leq w_n < 1,3\ w_{OPN}$ ou 2 ≤ IPI (*) < 5		$R_{34}h$
			FR > 7 et $0,9\ w_{OPN} \leq w_n < 1,1\ w_{OPN}$		$R_{34}m$
			FR > 7 et $0,7\ w_{OPN} \leq w_n < 0,9\ w_{OPN}$		$R_{34}s$
			FR > 7 et $w_n < 0,7\ w_{OPN}$		$R_{34}ts$
	Roches Siliceuses	R_4 Grès Poudingues Brèches ...	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	Roches siliceuses dures	R_{41}
			LA > 45 ou MDE > 45 et FR ≤ 7	Roches siliceuses de dureté moyenne	R_{42}
			FR > 7	Roches siliceuses fragmentables	R_{43}
	Roches Salines	R_5 Gypse Sel gemme Anhydrite ...	teneur en sel soluble ≤ 5 à 10 % dans le cas du sel gemme** ; ≤ 30 à 50 % dans le cas du gypse**	Roches salines peu solubles	R_{51}
			teneur en sel soluble > 5 à 10 % dans le cas du sel gemme** ; > 30 à 50 % dans le cas du gypse**	Roches salines très solubles	R_{52}

(*) *Paramètres dont le choix est à privilégier.*

** *suivant que la fragmentabilité est plus ou moins grande*

l'échantillon 30.rsT, le moins sensible selon FR, devient le plus sensible selon FD. Toutefois, l'éventail des valeurs étant très peu ouvert lors des deux essais, cette pseudo-anomalie n'est guère significative. Les deux indices sont donc comparables.

6.2.3 Classification des matériaux rocheux selon FR et DG

D'après la classification des matériaux rocheux (classification de RTR 92 - tab.6.2), les TN saines du Fau et du Col du Fau et les TN moins altérées du remblai des Blancs sont classées dans le groupe des roches argileuses, symbolisé par R3. Le coefficient de fragmentabilité utilisé dans cette classification est mesuré selon la méthode de Schaeffner.

On a des résultats suivants:

- Les Terres Noires du Fau sont classées dans R33. Elles sont peu fragmentables et peu altérables.
- Les cailloux résiduels du remblai des Blancs sont classés dans R32. Ils sont peu fragmentables mais altérables
- Les Terres Noires du Col du Fau sont symbolisées par R31. Elles sont peu fragmentables et très altérables.

6.3 L'essai de dégradation par gonflement

Lorsque les matériaux contiennent des phyllites gonflantes (illite gonflante, montmorillonite), même en faible quantité, ces dernières causent souvent des désordres en présence d'eau, car elles ont toujours tendance à adsorber des couches de dipôles d'eau, ce qui conduit à leur gonflement, d'où résulte un effritement de la roche. Ce phénomène est aussi observé avec la pyrite, minéral instable dont la transformation chimique provoque le foisonnement.

Après la mise en service d'un ouvrage, le gonflement du sol porteur n'apparaît pas immédiatement parce que la modification du milieu est lente. L'analyse minéralogique peut révéler les minéraux gonflants, mais il est difficile de dire si la solidité de la matrice de la roche sera suffisante pour résister à la pression de gonflement (Struillou, 1969).

Pour juger l'ampleur du gonflement possible, il faut donc accélérer le phénomène. Pour ceci, R. Struillou a proposé un essai de dégradation utilisant l'eau oxygénée concentrée à 110 volumes. Il a évalué que ses effets sont équivalents à ceux d'une immersion dans l'eau pendant plusieurs mois.

6.3.1 Principe de l'essai

Une prise d'essai de 350 g d'éléments 10/20 mm est séchée à 105 °C, puis immergée dans 350 ml d'eau oxygénée à 110 volumes de pH = 2,5, recouverte d'une façon non hermétique, portée à ébullition franche, placée à l'étuve à 105 °C pendant 18 heures, décantée, enfin séchée à 105 °C. On mesure alors le pourcentage de passant à 8 mm, lequel constitue le critère de prévision (SG) dont les références sont données dans le tableau 6.3.

SG (%)	Commentaires
0 à 2	Roche pratiquement insensible au gonflement
2 à 5	Roche peu sensible, cependant susceptible de se désagréger lentement au voisinage de venues d'eau
5 à 10	Roche sensible au gonflement
>10	Roche très sensible

Tab. 6.3 - Sensibilité aux gonflements

Ce type d'essai a été réalisé avec des TN et d' autres marnes saines et moins altérées pour évaluer leur gonflement virtuel. La mesure du pourcentage de passant à 8 mm des marnes de Luc-en-Diois est difficile à réaliser, car, après la dernière opération (passage à l'étuve), les fines et les cailloux se collent fortement entre eux.Les résultats, dans ce cas, sont donc estimés mais sans précision. Il faut noter que seuls les échantillons 28A.rsT, 28B.rsT, 30.rsT sont vraiment sains. Les résultats sont donc comparables entre eux mais pas avec les autres. Même pour d'autres échantillons dont l'état d'altérabilité n'est pas le même, la comparaison ne donc peut être faite. Si on a des conclusions, ce sont juste des constatations.

6.3.2 Résultats

Echantillon	SG (%)	Classification
8.rsT	65,4	très sensible
9B.rsT	70,9	très sensible
28A.rsT	8,3	sensible
28B.rsT	1,9	peu sensible
29.rsT	30,3	très sensible
30.rsT	61,4	très sensible
45B.riT	75	très sensible
23B.rsD	63,7	très sensible
35A.rsB	24,7	très sensible
39B.raL	>80	très sensible
40B.rvL	>80	très sensible
41B.roL	>80	très sensible
42B.rvL	> 80	très sensible

Tab.6.4 - Résultats de l'essai de dégradation par gonflement

D'après les résultats consignés dans le tableau 6.4, on constate que:

- les roches plus ou moins altérées libèrent une quantité de fines importante par élimination des carbonates. Ces dernières contribuent à accroître la sensibilité d'échantillons déjà sensibles, comme le prouvent les TN et les marnes de Luc-en-Diois;

- l'échantillon 30.rsT, même à l'état sain, est très sensible au gonflement. De plus, il est très altérable. Ces résultats recoupent les observations au M.E.B., qui ont montré qu'il est très poreux. Les nombreux vides facilitent la circulation de l'eau (essai d'altérabilité) ou l'effet de l'eau oxygénée (essai de dégradabilité par gonflement).

6.4 Conclusions

- Les TN de la fouille du Fau sont des matériaux peu fragmentables, peu altérables et peu ou pas sensibles au gonflement grâce à leur teneur en carbonate très élevée et aussi à leur texture compacte. En effet, la teneur en carbonate élevée cause la dureté de l'échantillon et les grains de calcite forment un squelette qui assure son caractère rocheux. Cette squelette joue aussi le rôle de frettage qui empêche le gonflement des argiles.

- Les blocs résiduels du remblai des Blancs sont peu fragmentables, altérables et très sensibles au gonflement. Comme on l'a dit au 4.3, le matériau de départ a été extrait d'un affleurement du Trièves, d'âge J_{3-4}, plus carbonaté que le matériau actuel. L'effet de l'extraction et de l'emploi dans un remblai soumis à des changements de teneur en eau, de température, et autres conditions physiques a fait apparaître des micro-fissures qui en augmentent fortement la surface spécifique. Pour cette raison, les matériaux du remblai sont plus altérables et plus sensibles au gonflement. En ce qui concerne ce dernier, une autre raison réside dans le fait que les blocs, "en travaillant" dans le remblai, produisent des matières argileuses par dissolution de leurs éléments carbonatés. D'autre part, leur teneur en carbonate diminuant, ceci entraîne l'augmentation de leur indice de fragmentabilité par rapport à celui de 30.rsT et 28.rsT. Ils restent pourtant dans la catégorie des roches peu fragmentables (selon la classification de RTR).

- Les TN du Col du Fau sont peu fragmentables, très altérables et très sensibles au gonflement. Pour expliquer ces résultats, il faut avoir revenir à la texture. En observant la photo 4.1 (échantillon de la fouille du Fau), on constate qu'il y a mélange intime entre la phase argileuse et la phase carbonatée. Par contre, les photos 4.4 et 4.5 (échantillon du remblai des Blancs et du Col du Fau), nous montrent nettement les délits argileux où sont disséminés les grains de calcite. Les délits argileux sont très nuisibles car ils absorbent de l'eau, qui provoque un foisonnement ayant pour conséquence l'ameublissement de la roche. Dans l'essai d'altérabilité, le délitage se crée ainsi. De plus, les nombreux pores présents dans la texture de l'échantillon du Col du Fau tendent à affaiblir non seulement sa résistance mécanique, mais aussi sa résistance chimique à l'altération. C'est pouquoi l'eau oxygénée de l'essai de dégradation par gonflement l'attaque efficacement, révélant son caractère très sensible. Les valeurs de bleu fournissent encore une autre explication qui va dans le même sens. En effet, la valeur de bleu de 30.rsT est plus élevée que celle de

29.rsT, elle-même plus élevée que celle de 28.rsT. Avec une minéralogie semblable, leur teneur en argiles augmente aussi selon cet ordre.

- Les échantillons du remblai des Blancs sont moins altérables que ceux du Col du Fau. D'autre part, les premiers sont déjà plus ou moins altérés et contiennent moins de carbonate que les seconds. Ceci prouve que la teneur en carbonate ne peut être considérée seule comme indicateur du comportement, mais doit être complétée par des observations au microscope électronique à balayage.

- L'essai de dégradation par gonflement qui n'est pas encore pris en compte dans la classification des matériaux rocheux, se montre très intéressant pour étudier le caractère évolutif des marnes.

Chapitre 7 :

Essais Proctor et de poinçonnement

7.1 Essai Proctor

L'énergie de compactage joue un rôle particulièrement important dans le cas des matériaux évolutifs. L'emploi d'une faible énergie laisse de nombreux vides plus ou moins importants. L'altération ultérieure va fournir des matériaux fins qui comblent progressivement ces vides (D. Delahaye, A. Le Roux, 1975). La reprise des tassements du remblai apparaît ainsi. Il paraît logique d'augmenter l'énergie de compactage mais, dans ce cas, la pression et l'amplitude du gonflement sont plus importants (C. Mieussens, 1986). La connaisance des caractéristiques de ce matériau au compactage (teneur en eau optimale et masse volumique sèche maximale) est donc indispensable.

Les essais ont été réalisés à l'aide du mode opératoire du LCPC. Les éléments pris pour l'esai sont la fraction 0 - 20 mm. Il s'est effectué dans le moule C.B.R. de 152 mm de diamètre et pour deux énergies de compactage différentes, Proctor normal et Proctor modifié. Un matériau ayant déjà servi n'est pas réutilisé.

D'autre part, pour étudier l'influence de l'altération du matériau sur les caractéristiques du compactage, un essai Proctor modifié comparatif a été réalisé sur le matériau ayant subi un cycle d'humidification-séchage.

L'essai Proctor normal donne une masse volumique sèche maximale $\gamma_{d\,OPN}$ de 2,09 g/cm^3, à une teneur en eau optimale w_{OPN} de 8,2 %. L'essai Proctor modifié a une $\gamma_{d\,OPM}$ de 2,25 g/cm^3 et une w_{OPM} de 5,9 % (Fig. 7.1).

Si l'on observe la variation de la masse volumique sèche par rapport à une variation de 2 % de la teneur en eau optimale, on trouve une valeur d'environ 0,04 g/cm^3 pour l'essai Proctor modifié et d'environ 0,11 g/cm^3 pour l'essai Proctor normal. La première valeur montre que le matériau est peu sensible aux différences de teneurs en eau au compactage OPM, mais qu'il l'est pour l'OPN. L'augmentation de l'énergie de compactage a donc réduit la sensibilité à l'eau et améliore la la compactibilité du sol au voisinage de w_{OPM}.

L'essai Proctor modifié du matériau altéré par 1 cycle d'humidification-séchage

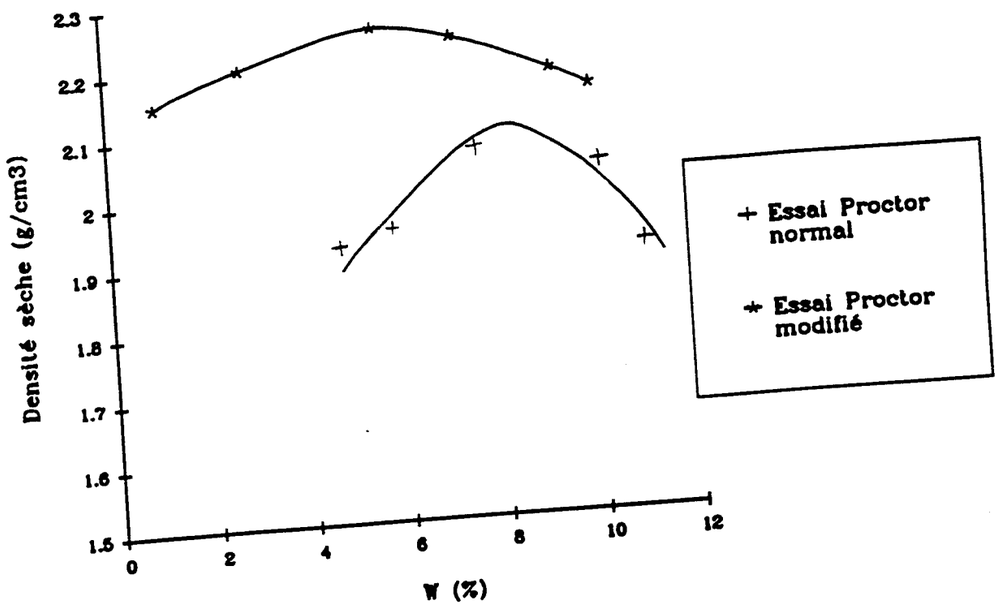


Fig. 7.1 - Courbes de compactage

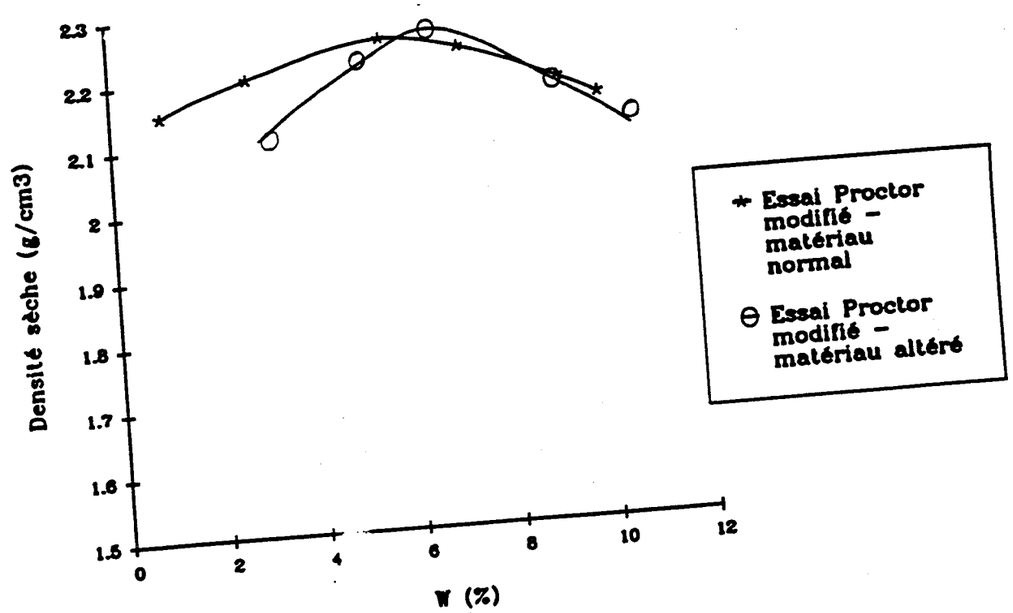


Fig. 7.2 - Essai Proctor modifié pour matériau normal et matériau après un cycle d'humidification-séchage

donne une $\gamma'_{d\,OPM}$ de 2,26 g/cm³ et une w'_{OPM} de 6,6 % (Fig. 7.2). Sa courbe est plus pointue que celle du matériau normal et caractérise un matériau plus argileux. En effet, une variation de 2 % de w'_{OPM} conduit à une variation de 0,09 g/cm³ de $\gamma'_{d\,OPM}$. Cette variation est presque semblable à celle de l'essai Proctor normal du matériau initial. Ceci est expliqué par le fait que l'altération a produit plus de matériaux fins qui sont plus sensibles à l'eau. Au cours du compactage, ces produits fins s'arrangent mieux grâce à leur action de lubrifiant, ce qui entraîne l'augmentation de la masse volumique sèche et de la teneur en eau, sans que la saturation ne soit atteinte.

7.2 Essai de poinçonnement ou C.B.R.

7.2.1 Introduction

C'est le sol du remblai, qui en fin de compte, supporte les charges qui circulent sur la chaussée. Cette dernière peut être conçue de deux façons différentes: rigide par exemple dalles de béton, ou flexible, comme pavage, macadam.... La chausée flexible est la plus souvent utilisée.

Pour évaluer la portance des sols sous revêtements flexibles, il existe plusieurs méthodes. L'une d'entre elles, la méthode C.B.R. (Californian bearing ratio), dite de poinçonnement, est couramment utilisée en France, dans les laboratoires routiers.

D'autre part, on sait que l'eau peut provoquer des désordres dans les revêtements car, en imbibant le sol, elle va diminuer considérablement sa portance et provoquer son gonflement. A cet égard, les TN se montrent susceptibles à l'eau comme le montre l'essai de dégradation par gonflement (cf. 6.3). Pour avoir un sens plus complet, les essais doivent être effectués sur des échantillons du sol, dans des conditions normales et en outre, dans les conditions les plus défavorables qui pourraient se présenter. Dans ce dernier cas, nous avons choisi de réaliser l'essai sur des échantillons imergés pendant 4 jours, comme l'indique le Manuel du Laboratoire Routier (R. PELTIER, 1959).

7.2.2 Définition

L'essai de poinçonnement consiste à mesurer la résistance à l'enfoncement d'un poinçon dans les sols et dans des conditions bien déterminées avec un appareillage normalisé. L'essai donne l'indice portant C.B.R. qui est un nombre sans dimension exprimant, en pourcentage, le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part, et dans un matériau type d'autre part (R. PELTIER, 1959).

Cet essai est empirique et nous renseigne sur la portance du sol. En fonction de l'indice portant C.B.R. et du trafic, on déduit l'épaisseur de la chaussée à l'aide d'une série d'abaques. L'idéal serait de faire l'essai C.B.R. sur un échantillon dont les caractéristiques physiques (γ_d et w) sont sensiblement identiques à celles du matériau en place (M. Veysset, 1964). D'autre part, cet essai se fait généralement sur le matériau compacté à la teneur en eau optimum Proctor modifié (R.PELTIER, 1959).

7.2.3 Mode opératoire

Avant l'essai de poinçonnement, le matériau a été compacté dans le moule C.B.R. selon le procédure de l'essai Proctor modifié. On procède ensuite à l'essai sur une presse spéciale ayant une force maximale de 60 kN et dont l'effet de poinçonnement s'exerce par un piston fixe. Le poinçonnement s'effectue en montant le plateau porte moule mobile à une vitesse constante normalisée, 1,27 mm/mn. Il faut noter que ce type d'essai a été réalisé sur la presse de la D.D.E. (Direction Départementale de l'Equipement) de Grenoble. On peut aussi trouver les détails de l'essai de poinçonnement dans le mode opératoire du L.C.P.C. ou dans le Manuel du Laboratoire Routier.

Au cours de l'essai, on note les pressions lues sur l'anneau dynamométrique (situé entre le piston et la partie supérieure de la presse) correspondant aux enfoncements de 0,625; 1,25; 2; 2,5; 5; 7,5 et 10 mm. On arrête l'essai après avoir atteint le dernier enfoncement.

En cas d'essai effectué avec le matériau imbibé, on procède à l'essai d'imbibition en plaçant sur la surface de l'échantillon un disque perforé muni d'une tige réglable dont

l'extrémité est au contact du palpeur d'un comparateur. On met ensuite une charge annulaire sur le disque, égale en principe à celle qu'exerceraient les couches supérieures sur le sol étudié. Cette dernière information n'étant pas connue, l'essai d'imbibition a été effectué avec un chargement normal de 45,30 N (R. PELTIER, 1959).

Le moule est enfin posé sur des cales dans un bac rempli d'eau, pendant 4 jours. Après ce délai, on note le gonflement lu au comparateur.

7.2.4 Calculs

Le calcul de l'indice portant est fait à l'aide des rapports:

$$z = \frac{P\,(2{,}5)\ (kg/cm^2)}{70\ (kg/cm^2)} \times 100 \qquad \text{et} \qquad y = \frac{P\,(5)\ (kg/cm^2)}{105\ (kg/cm^2)} \times 100$$

où P(2,5) et P(5): pressions correspondant aux enfoncements de 2,5 et 5 mm
70 et 105 : pressions correspondant à ces mêmes enfoncements pour le terrain standard de référence

L'indice portant C.B.R. est la plus grande des deux valeurs.

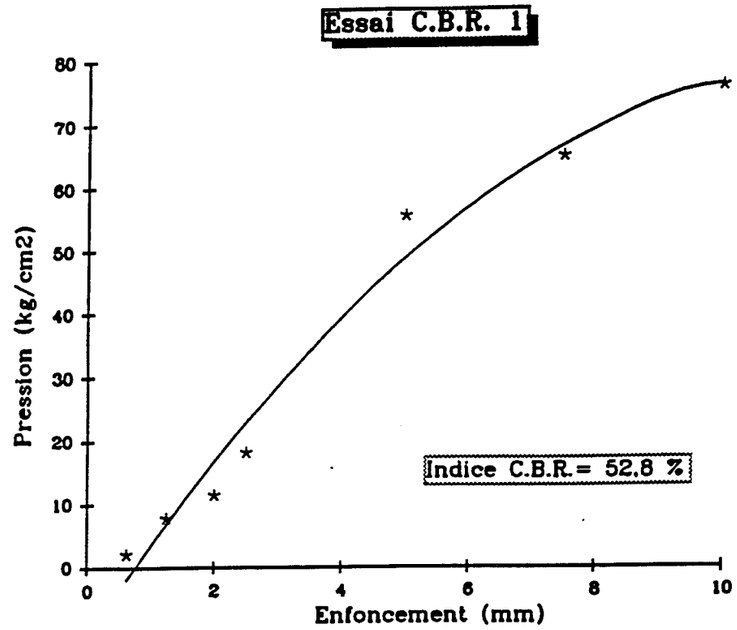
On calcule également le gonflement linéaire relatif G:

$$G = 100 \times \frac{\Delta l}{l}$$

où Δl: différence entre les lectures faites au début et à la fin de l'essai d'imbibition
l : hauteur initiale de l'échantillon.

7.2.5 Résultats

L'essai de poinçonnement a été réalisé 2 fois pour le matériau compacté à l'optimum Proctor modifié et 2 fois pour le matériau imbibé après compactage. Les courbes tracées à partir des points expérimentaux sont présentées dans les figures 7.3 et 7.4.



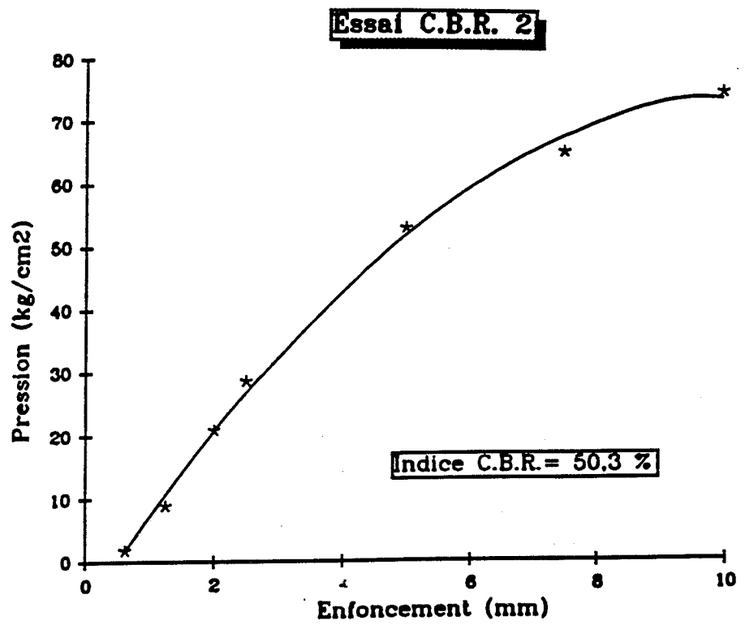
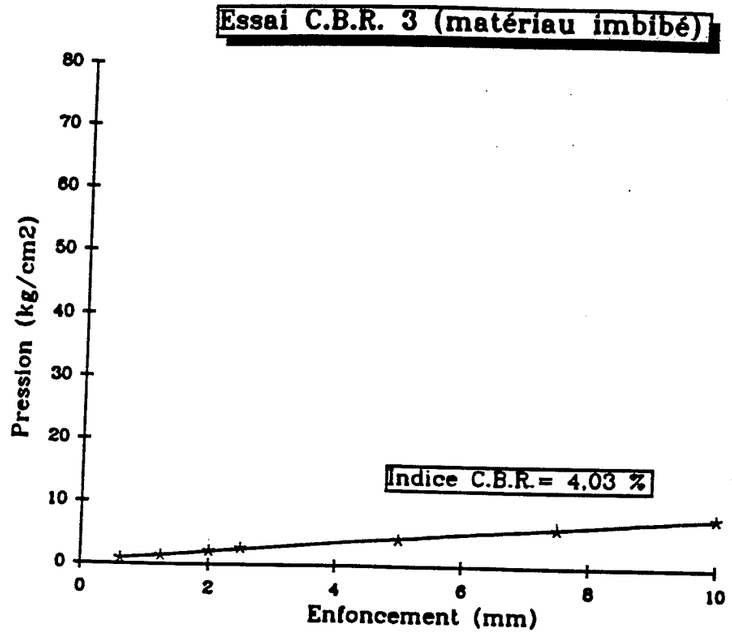


Fig. 7.3 - Résultats d'essai de poinçonnement des échantillons compactés à l'optimum Proctor modifié



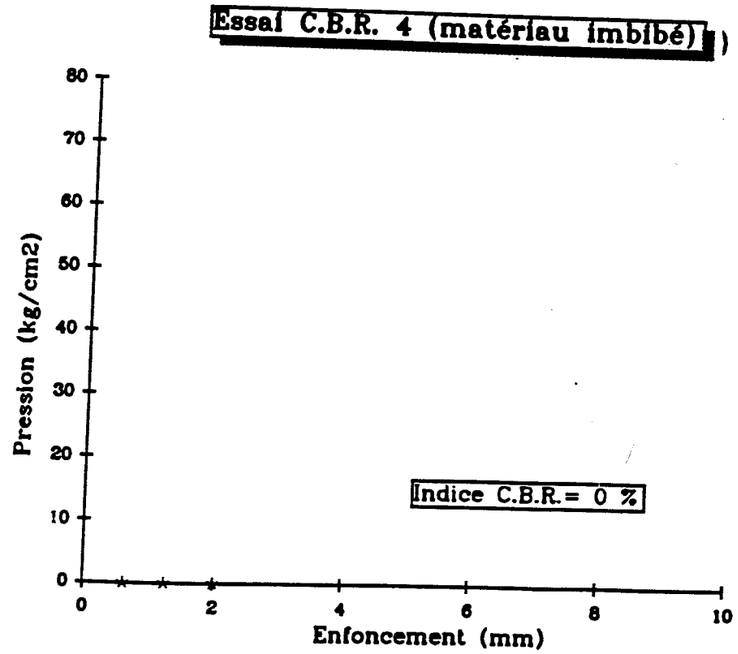


Fig. 7.4 - Résultats d'essai de poinçonnement des échantillons compactés et imbibés

- Pour les matériaux compactés à l'optimum Proctor modifié, le premier essai de poinçonnement , C.B.R.1, donne z = 25,9 % et y = 52,8 %. Le second essai, C.B.R. 2 fournit z = 40,7 % et y = 50,3 %.

- Pour les matériaux compactés et imbibés, le premier échantillon a gonflé de 4 mm après 4 jours d'imbibition, soit G = 3,1 %, et donne z = 3,77 % et y = 4,03 %. Le second a gonflé de 1 mm, soit G = 0,8 %, et donne un indice C.B.R. égal à 0 %.

Après l'imbibition, le degré de saturation atteint environ 100 %. Sachant que l'échantillon, après compactage, a une masse volumique sèche égale à 2,25 g/cm^3 et une teneur en eau égale à 5,9 %, on obtient une indice des vides (e) égal à 0,18 et un degré de saturation (S_r) égal à 87 %, à l'aide des rapports suivants:

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \qquad \text{et} \qquad S_r = \frac{w \times \gamma_s}{e}$$

où
- e : indice des vides
- S_r : degré de saturation (%)
- w : teneur en eau (%)
- γ_s : densité des grains = 2,65
- γ_d : masse volumique sèche de l'échantillon (g/cm^3)

Compacté à la teneur en eau optimum Proctor modifié, w_{OPM} = 5,9 %, l'échantillon est déjà proche de l'état de saturation. L'indice portant C.B.R. du matériau, à cet état, est aux alentours de 51 %. Une augmentation de 1 % de la teneur en eau suffit pour conduire l'échantillon à l'état de saturation complète, qui réduit son indice C.B.R. à 4 % voire 0 %. Le matériau perd ainsi, totalement, sa résistance au poinçonnement.

7.3 Conclusions

L'essai Proctor normal révèle une masse volumique sèche maximale $\gamma_{d\,OPN}$ de 2,09 g/cm^3, et une teneur en eau optimale w_{OPN} de 8,2 %. Pour l'OPM, le compactage a aplati

la courbe et fournit une $\gamma_{d\,OPM}$ élevée (2,25 g/cm^3) et une w_{OPM} peu éloignée de la teneur en eau naturelle (5,9 %).

Dans les conditions de compactage de l'OPM, correspondant à une degré de saturation de 87 %, l'indice portant C.B.R. de l'échantillon est de 51 %. Toujours dans les conditions de l'OPM, mais cette fois ci, à un degré de saturation d'environ 100 %, le gonflement de l'échantillon peut atteindre une valeur de 3,1 % et l'indice C.B.R. retombe aux alentours de 0 %. L'imbibition et la saturation ont complètement désorganisé le matériau et entraîné la chute de ses caractéristiques mécaniques.

Chapitre 8 :

Essai oedométrique

8.1 Introduction

Afin de connaître l'influence d'une variation ultérieure de la teneur en eau sur les caractéristiques mécaniques des TN, nous avons procédé aux essais à l'oedomètre et de cisaillement à la boîte de Casagrande sur des échantillons compactés à l'OPM. Nous nous intéressons seulement au tassement, au gonflement et à l'éventuelle reprise de tassement après l'augmentation de teneur en eau. Les paramètres souvent utilisés dans les essais oedométriques comme le coefficient de consolidation C_V, le module oedométrique E_{oed}, l'indice de compression C_c ..... sont inadaptées dans ces conditions d'essai.

8.2 Fabrication des échantillons

Les échantillons provenant du carottage X345 du Col du Fau ont été broyés et mélangés. La phase de séchage est supprimée car ils ont été stockés, pendant plusieurs mois, sans être paraffinés, et leur teneur en eau, avant l'essai, est donc très basse, environ 2 %. Les matériaux broyés sont ensuite passés aux tamis de 20 et 2 mm. Les tamisats de 20 mm ont été utilisés pour les essais Proctor et C.B.R. (cf. chapitre 7) et ceux de 2 mm, pour les essais oedométriques et de cisaillement à la boîte de Casagrande.

Le mode de compactage choisi, pour fabriquer l'échantillon, est semi-statique, car il reproduit mieux le sol compacté in situ. Il consiste à compacter le matériau dans un moule ayant la même section que l'échantillon, à l'aide d'un piston entraîné à vitesse constante par une machine de compression (J.CAMAPUM DE CARVALHO, 1985). Par ce procédé, l'apparition de gradients de teneur en eau et de poids volumique selon l'axe de l'échantillon compacté est inévitable, à cause du frottement sol-moule. Plusieurs méthodes ont été proposées (J.CAMAPUM DE CARVALHO et al., 1985) pour minimiser ce facteur, afin d'obtenir un échantillon aussi homogène que possible.L'une d'entre elles consiste à compacter successivement plusieurs couches dans un moule métallique.

La masse volumique sèche et la teneur en eau choisies correspondent à la condition de l'optimum Proctor modifié ($\gamma_{d\,OPM}$ = 2,25 g/cm^3, W_{OPM} = 5,9 %). Les matériaux sont compactés à l'aide le la presse AMSLER de 3000 kN de capacité, munie d'un système

d'asservissement électro-hydraulique. Le piston est entraîné à une vitesse constante de 4 mm/s. La contrainte normale appliquée est de 520 kPa. Le compactage est fait successivement en 4 couches dans la cellule oedométrique. L'échantillon final a enfin un diamètre de 70 mm et une hauteur de 24 mm.

8.3 Exécution de l'essai

Les échantillons obtenus ont été ensuite mis en place sur le bâti oedométrique et soumis à 5 valeurs de contrainte, soit 25, 50, 100, 200, 400 kPa.

Nous avons, tout d'abord, procédé à l'essai de consolidation à une contrainte de 25, 50, 100, 200, 400 kPa. Chaque charge est maintenue pendant 24 heures, au cours desquelles on note le tassement. Ce délai est suffisant pour que la pression interstitielle puisse se dissiper dans l'échantillon, dont la hauteur n'est que de 2 cm, avec un indice de vides de 0,18 (D. PUIATTI, G.GESTIN, 1983). Ensuite, toujours sous la même charge, on remplit d'eau le moule et on suit le gonflement, à nouveau pendant 24 heures.

8.4 Résultats

Le tassement total d'un sol sollicité a trois composantes (R. HOLTZ, W. KOVACS, 1981):

- tassement immédiat,
- tassement de consolidation, lié au temps,
- tassement secondaire, également lié au temps.

Le deuxième type de tassement porte aussi le nom de consolidation primaire, et le troisième de consolidation secondaire, qui n'est autre que du fluage.

Le phénomène de consolidation est dû à la déformation du squelette sous une sollicitation extérieure, et s'accompagne temporairement de la mise en pression de l'eau interstitielle, qui s'écoule peu à peu vers les limites drainantes. D'après les courbes de tassement (fig.8.1), ce phénomène n'apparaît pas car l'échantillon n'est pas saturé (son degré de saturation est de 87 %). Le tassement immédiat apparaît juste après le

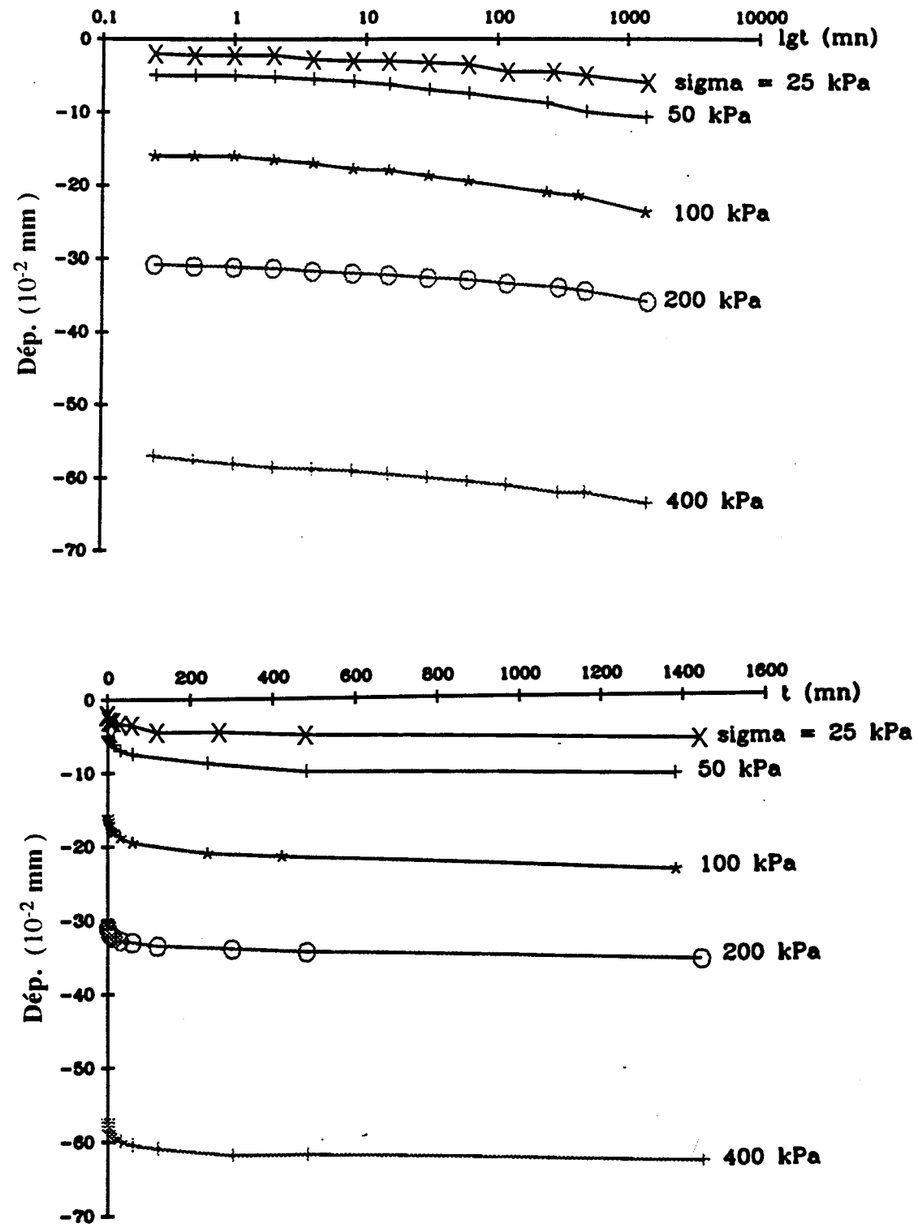


Fig. 8.1 - Tassement en fonction de lgt et de t

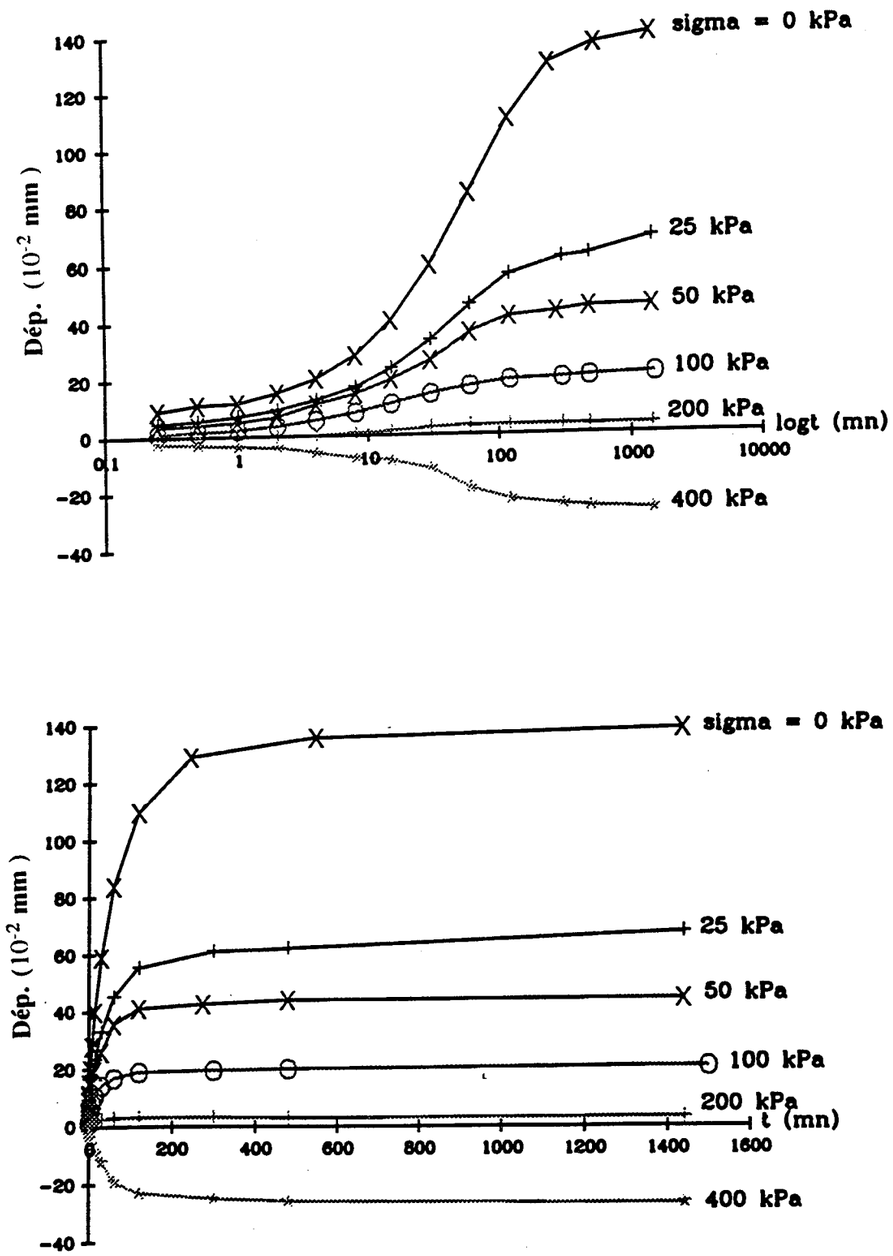


Fig. 8.2 - Gonflement en fonction de lgt et de t

chargement, qui correspond à un réarrangement des grains ou même à leur évolution granulométrique et passe ensuite, directement à la phase du tassement secondaire. Ces caractères sont affectés probablement par l'effet de surconsolidation.

Pour étudier le gonflement, on compare entre eux les 5 échantillons consolidés et aussi à un échantillon témoin (noté 0 bar) qui ne l'a pas été.

Les courbes de gonflement ont une forme en "S" plus ou moins prononcée, sur le diagramme semi-logarithmique, en fonction de la charge lors de l'imbibition (fig. 8.2). Il existe un délai de démarrage ou retard de gonflement, d'autant plus important que la charge appliquée a été plus élevée. Mais cette différence n'est pas très marquée.

Le taux de gonflement est d'autant plus élevé que la charge de consolidation (ou d'imbibition) est faible. Ainsi, sous une charge nulle, le gonflement est-il important et égal à 1,395 mm, soit 6 %.

Après 24 heures de chargement, suivi de 2 heures d'imbibition, le tassement et le gonflement atteignent environ 85 % de la déformation "finale". On constate ainsi un coude qui se produit approximativement après 2 h d'imbibition. Le gonflement de l'échantillon, après l'imbibition, peut être expliqué par l'influence des argiles gonflantes (cf paragraphe 4.9), influence renforcée par la libération de ces dernières lors du broyage.

D'autre part, sous la contrainte de 400 kPa, un tassement supplémentaire d'environ 1 % a encore été constaté après l'imbibition. Ce tassement est nommé affaissement ou effondrement structural (J.CAMAPUM DE CARVALHO, 1985).

Sur la figure 8.3, on groupe les courbes de tassement et de gonflement, après 24 h de chargement, en fonction de la contrainte. Elle montre qu'au cours de la saturation après tassement, le matériau gonflera sous une contrainte inférieure à 220 kPa et se tassera dans le cas contraire. Si l'on admet la définition de la pression de gonflement - charge sous laquelle le gonflement est nul - 220 kPa est la pression de gonflement dans ce cas d'essai.

Un essai de fluage a aussi été réalisé. L'échantillon a été chargé sous une contrainte

de 400 kPa pendant une semaine. La courbe de la figure 8.4 confirme l'absence de tassement primaire dans le diagramme tassement - temps. Une courbure de l'enregistrement semi-logarithmique, à la fin de l'essai, révèle apparemment un changement de comportement du matériau: la déformation n'a plus une relation linéaire avec le logarithme du temps. Ceci peut être expliqué par le phénomène d'effondrement structural qui se produit plus tardivement sans que l'échantillon soit imbibé.

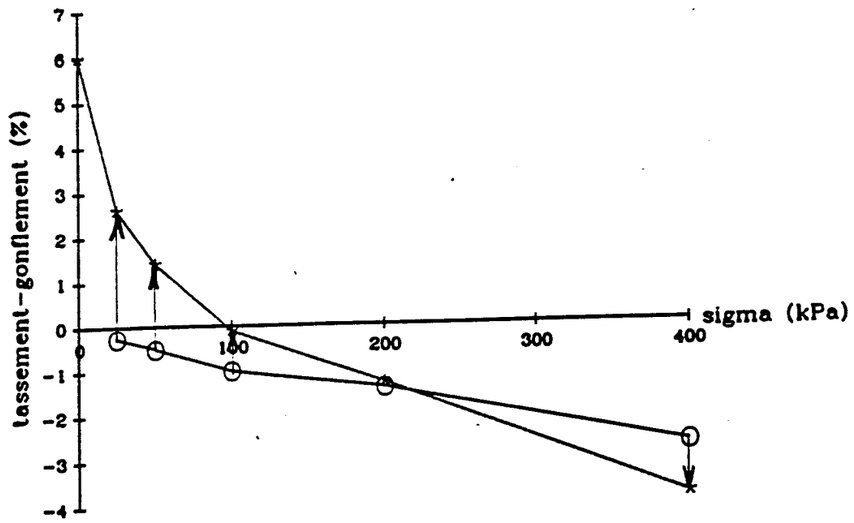


Fig. 8.3 - Tassement et gonflement en fonction de la contrainte après imbibition

8.5 Conclusions

Le comportement à l'essai oedométrique des TN compactées à l'OPM se traduit par un tassement immédiat important, suivi d'un tassement secondaire. L'imbibition de l'échantillon après tassement le conduit soit à un gonflement sous faible charge, soit à une reprise du tassement sous une charge élevée. Dans ce dernier cas, une relation non linéaire entre déformation et logarithme du temps de l'essai type fluage a aussi été constatée. Celle-ci peut traduire un effondrement structural de l'échantillon.

Chapitre 9 :

Essai de cisaillement à la boîte de Casagrande

9.1 Fabrication des échantillons

Le but de l'essai a été présenté dans 8.1. La méthode de fabrication des échantillons pour ce type d'essai est exactement la même que pour l'essai oedométrique (cf. 8.2). Le compactage est fait semi-statiquement, sous la presse AMSLER. Il est réalisé aussi en 4 couches successives, dans un moule ayant la même section que l'échantillon, diamètre 60 mm et hauteur 35 mm. La masse volumique sèche et la teneur en eau correspondent à la condition de l'optimum Proctor modifié.

9.2 Exécution de l'essai

Les essais de cisaillement réalisés sont du type consolidé-drainé. Le cisaillement est fait sous les contraintes verticales égales à 25, 50, 100, 200 kPa qui ont aussi servi pour la consolidation.Consolidé pendant 24 heures, l'échantillon a ensuite subi l'essai selon deux modes:

- soit à W_{OPM}, et on effectue sans délai l'essai de cisaillement,

- soit à la teneur en eau de "saturation", et on l'imbibe pendant 4 jours entiers en versant de l'eau du robinet à ras bord dans la boîte. Ce délai étant écoulé, on effectue l'essai (essai CD).

Dans ces deux cas, la vitesse choisie est de 1,4 µm/mn. Le cisaillement dure entre 3 et 4 jours.

L'acquisition des données est faite de façon automatique. Le déplacement horizontal de la boîte inférieure, la déformation de l'anneau et le tassement-gonflement de l'échantillon sont mesurés à l'aide de capteurs de déplacement ayant une course de 1 et 2,5 cm, enregistrés ensuite dans la centrale de mesure type SAM 20. Le logiciel LS 20 sert, enfin, à transférer sur l'unité du PC les informations stockées dans la centrale.

9.3 Résultats

9.3.1 Mode à W_{OPM}

- Les pics des courbes contrainte-déplacement sont nets et la rupture correspond à un déplacement relatif de 1,6 à 2,4 mm (fig.9.1).

- A cause du manque de capteur à la fin d'essai, nous n'avons pas les résultats du déplacement vertical de l'échantillon à la contrainte verticale de 50 kPa (fig. 9.1).

- La cohésion drainée, c' est de 12 kPa et l'angle de frottement interne, φ' est égal à 56° (fig.9.3a).

La courbe contrainte-déplacement à 200 kPa (fig. 9.1) a une allure différente de ce que l'on pourrait attendre, aussi bien dans sa phase initiale que dans celle de la post-rupture. Elle est semblable à la courbe de compression simple des matériaux rocheux. Cette constatation suggère que l'on a cisaillé un matériau très différent des autres, possédant une partie dure due au compactage et à la consolidation. Il semble en effet qu'il existe dans l'échantillon, une zone à résistance plus marquée (ce qui provoque une montée de contrainte rapide) située à côté d'une zone à résistance bien moindre (marquée par une chute de contrainte jusqu'à la courbe à 100 kPa). L'examen de la surface de rupture ne contredit pas cette hypothèse car le plan cisaillé n'est pas régulier. Elle est ondulée avec une partie en creux et l'autre plate.

Mode saturation

- Les courbes contrainte-déplacement donnent des pics nets et le cisaillement a lieu pour un déplacement relatif de 0,5 à 1,8 mm (fig. 9.2). Semblables aux résultats des essais faits sur les échantillons altérés (cf. 5.1), les courbes d'échantillons humides sont plus régulières et plus proches de la théorie que celles d'échantillons secs.

- En cours d'essai, l'échantillon se tasse encore à une contrainte égale à 100 kPa (fig. 9.2). Comme dans le cas précédent, nous n'avons pu mesurer le déplacement

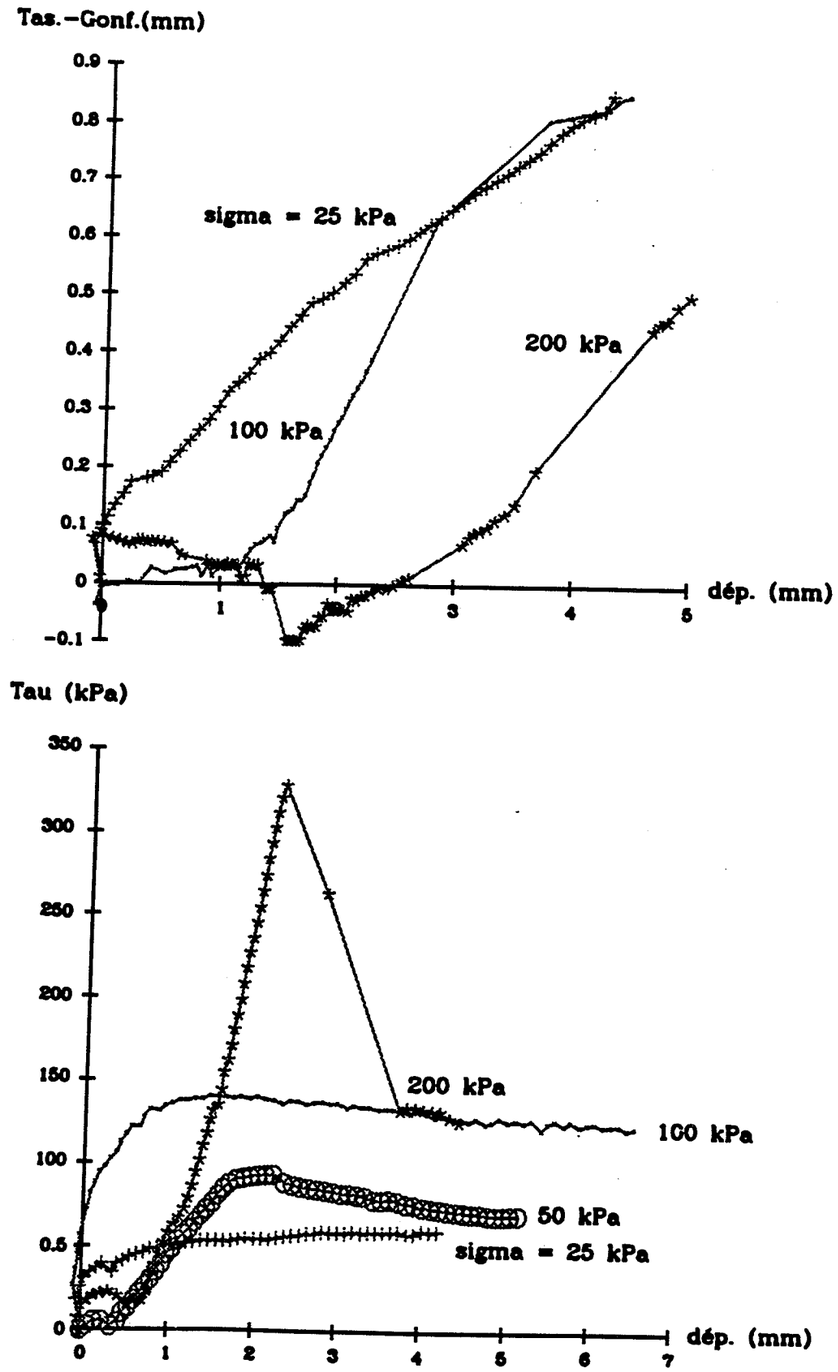


Fig. 9.1 - Variations de la contrainte de cisaillement et du déplacement vertical en fonction de la déformation horizontale (sol compacté à W_{OPM})

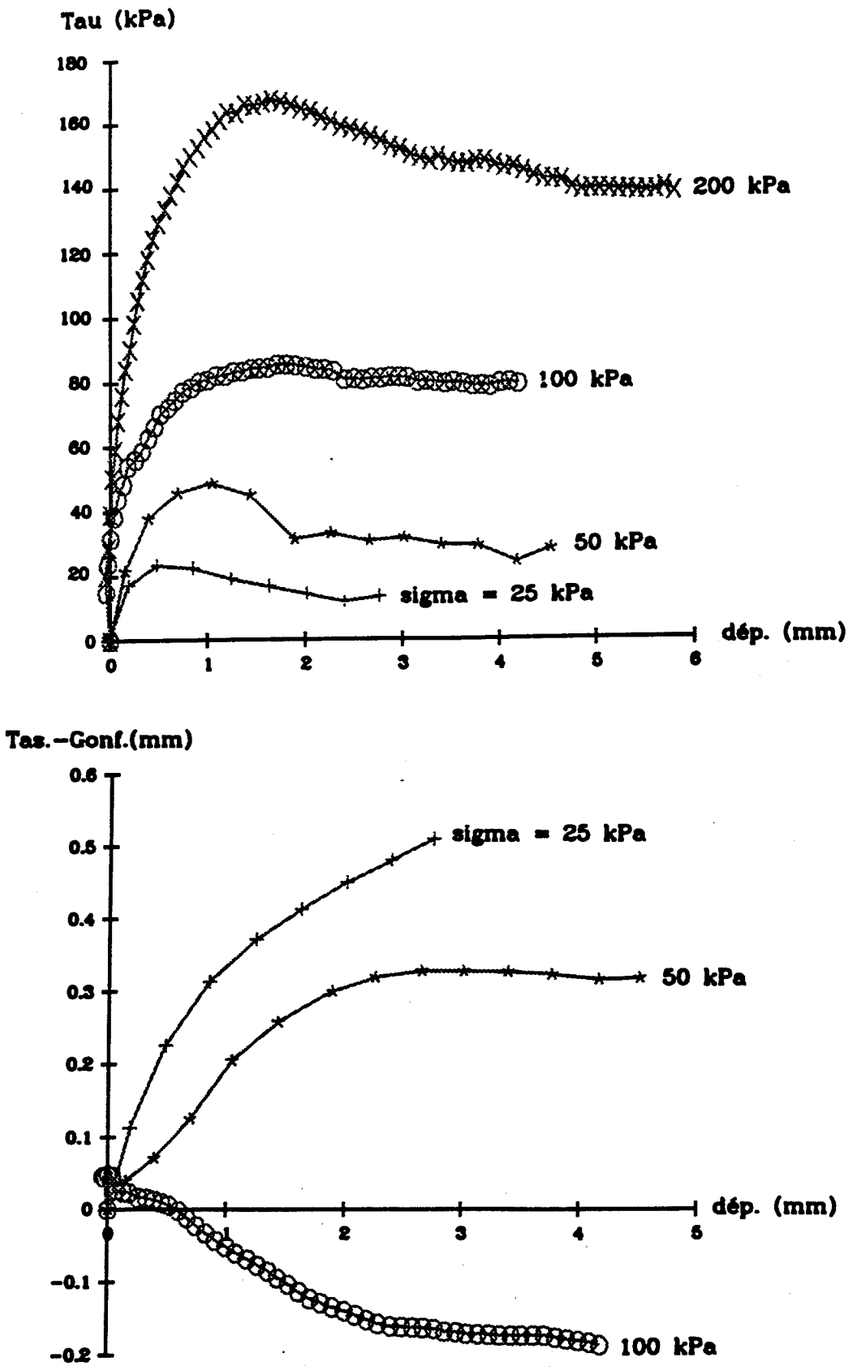


Fig. 9.2 - Variations de la contrainte de cisaillement et du déplacement vertical en fonction de la déformation horizontale (sol compacté à W_{OPM} puis imbibé)

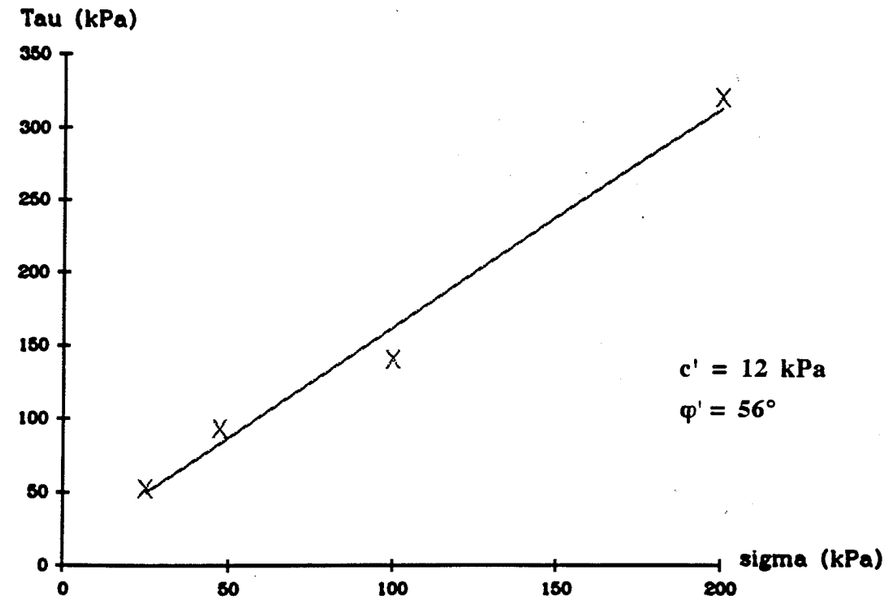


Fig. 9.3a - Paramètres c' et φ' du sol compacté à W_{OPM}

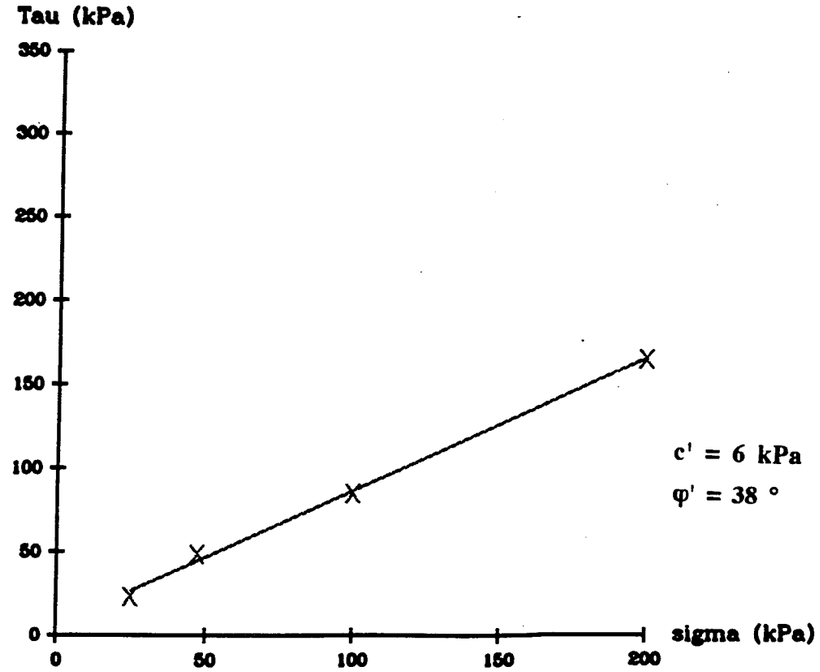


Fig. 9.3b - Paramètres c' et φ' du sol compacté à W_{OPM} puis imbibé

vertical à une contrainte égale de 200 kPa.

- A l'aide de ces résultats, nous avons calculé une cohésion drainée c', égale à 6 kPa et un angle de frottement interne φ' de 38° (fig. 9.3b).

D'une manière générale, les courbes contrainte - déplacement résultant des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande, réalisées sur des TN compactées à l'optimum Proctor modifié, saturées ou non, présentent les caractères suivants:

- présence d'un pic de résistance puis d'un palier de résistance résiduelle. Le pic de résistance est atteint pour de faibles déformations;

- pour l'échantillon saturé, la déformation verticale $\Delta h/h_0$ est croissante aux niveaux de contrainte verticale de 25 et 50 kPa et décroissante aux contraintes supérieures.Après le pic, elle se stabilise. Pour l'échantillon non saturé, en général, la déformation verticale croît fortement. A 200 kPa, elle décroît légèrement, passe par un minimum puis croît fortement. Ces deux caractères sont semblables à ceux que l'on constate sur des argiles intactes, surconsolidées et saturées;

- un angle de frottement φ' très élevé et une cohésion jamais nulle, même pour les échantillons saturés. Ceci peut être expliqué par l'effet d'engrènement des particules, qui serait également responsable de l'irrégularité des courbes de l'échantillon non saturé (fig 9.1). Cet effet s'estompe pour l'échantillon saturé, où l'eau a bien joué son rôle de lubrifiant. Ainsi, la surconsolidation apporte-t-elle un important gain de résistance.

9.4 Conclusions du chapitre

L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande, type consolidé-drainé, sur des échantillons compactés à l'OPM fournit une c' = 12 kPa et un φ' = 56 °. Toujours dans les mêmes conditions d'essai et de confections d'échantillons, l'essai après imbibition donne une c' réduit à 6 kPa et un φ' tombé à 38 °. En comparant à la pente du remblai des Blancs, 30 °, la valeur de φ' semble trop élevée. La surconsolidation, créée par le

compactage intense a fourni une résistance de cisaillement élevée.

9.5 Conclusions de la troisième partie

Les essais Proctor, CBR, à l'oedomètre et de cisaillement rectiligne sur éprouvettes compactées semi-statiquement à l'OPM, puis soumises à une imbibition, mettent en évidence une série de caractéristiques.

Les TN utilisées semblent sensibles à la variation de l'énergie de compactage, puisque l'OPN est égal à 93 % de l'OPM. Leur teneur en eau de compactage est d'environ 6 % pour l'OPM, alors que leur teneur naturelle est basse.

Une forte chute de l'indice CBR et l'effondrement structural révélé par le gonflement ou une reprise du tassement, après l'immersion de l'éprouvette, traduisent une sensibilité à l'eau que laisse aussi prévoir leur texture, observée sous le microscope électronique à balayage.

Le compactage intense, à l'OPM, crée un effet de surconsolidation qui se manifeste par un accroissement de la résistance et confère au matériau une faible compressibilité. Une relation non linéaire entre déformation et logarithme du temps est révélée par l'essai du type fluage.

Le matériau est également fragile (existence du pic de résistance), dilatant, à angle de frottement φ' élevé même après imbibition.

Il faut souligner que ces résultats ont été obtenus sur des TN très altérables et peu fragmentables. A part ceux de la vallée du Riffol, ces matériaux semblent les pires parmi les sites étudiés en Trièves. Ajoutons que les valeurs sont proposées pour certains paramètres surtout à titre indicatif.

9.6 Propositions sur l'utilisation des Terres Noires en remblai

Cette étude sommaire est loin de pouvoir fixer de strictes règles technologiques résolvant les problèmes posés par la mise en oeuvre des TN. Elle y contribue seulement par quelques constatations pratiques.

- Les TN présentent un risque d'évolution granulométrique dans le temps. L'obtention d'un matériau à indice de vide réduit est indispensable. Elles sont, de plus, des matériaux peu fragmentables; il faut donc combiner la méthode d'extraction et les types d'engins de régalage et de compactage afin d'obtenir des blocs les plus petits possibles. Eventuellement, avant la mise en oeuvre, concasser ou arroser-sécher le matériau afin qu'il libère ses fines et modifie sa granulométrie dans un sens favorable (courbe granulo plus étalée). On tire parti ainsi de l'altérabilité du matériau. Mais dans ce cas, la courbe de compactage risque d'être plus pointue à cause des matériaux fins, plus sensibles à l'eau. Toutefois, l'intérêt de l'arrosage l'emporte sur ce risque, car la densité sèche augmente, entraînant l'augmentation de la résistance au cisaillement et du module de déformation.

- Compacter par levées minces (30 cm) et à l'énergie de l'OPM pour obtenir un matériau bien serré et moins compressible. Mais noter que le compactage à l'OPM crée, en plus, un gonflement.

- Les plus graves difficultés à attendre et à surmonter tiennent au fait que le matériau est très sensible à l'eau. En effet, les TN présentent, après imbibition, un risque d'évolution de leurs caractéristiques physiques et mécaniques au cours du temps à cause du gonflement, de la reprise du tassement et de la chute de l'indice CBR. L'idéal serait de pouvoir empêcher l'action de l'eau sur le matériau en protégeant le talus, en mettant en place une assise drainante à la base et en minimisant la descente d'eau à partir de la chaussée. Il s'agit, ainsi, de réaliser un noyau en TN. L'utiliser en une masse homogène complètement coupée de son contexte par une barrière étanche continue, conception qui ne semble pas appelée à des applications fréquentes.

- Si le talus est construit avec ce type de matériau, le résultat de φ' semble

prometteur pour une forte pente de talus à condition qu'ils soient protégés de la variation hydrique. Toutefois, une étude de stabilité est nécessaire en basant sur des essais de cisaillement en laboratoire à une gamme de densité sèche différente.

- L'hétérogénéité des TN peut contribuer, en plus, aux déformations différentielles du remblai. Pour les minimiser, il vaut mieux rendre le remblai le plus homogène possible: homogéité du matériau, symétrie du remblai et exécution de façon homogène. Il est indispensable de bien étudier les caractéristiques des TN du gisement. Cette étude est basé sur leur teneur en carbonate, leur texture et les essais mettant en évidence leur caractère évolutif.

- Il vaut mieux approfondir les études sur la sensibilité du matériau, à l'aide des essais de cisaillement et à l'oedomètre, à l'OPN + imbibition ou dans une gamme entre l'OPN et l'OPM. Il faut également étudier le phénomène gonflement et retrait. Un chantier expérimental est aussi indispensable pour faire preuve d'une méthode de régalage et de compactage et pour étudier l'évolution des caractéristiques mécaniques du matériau au cours du temps, essentiellement, la chute de module de déformation.

Quatrième partie

Conclusions générales

Les études antérieures qui ont été faites sur les TN, se répartissent dans les domaines de la stratigraphie, de la sédimentologie et aussi des processus d'érosion et des glissements de terrain. Le présent travail contribue, pour sa part, à la connaissance des TN sous l'aspect géotechnique en apportant de nouvelles précisions basées sur:

- des essais d'identification, tels que limites d'Atterberg, valeur de bleu ....;
- des analyses texturales à l'aide du microscope électronique à balayage, afin de déceler la relation entre texture et comportement;
- des essais mettant en évidence leur sensibilité à l'eau et au gonflement tels qu'essai d'altérabilité, essai de dégradation par l'eau oxygénée;
- des essais mécaniques en vue de les employer en remblai routier comme les essais Proctor, CBR, à l'oedomètre ou de cisaillement rectiligne.

Nous avons choisi trois secteurs (Trièves, Draix, Barcelonnette) pour effectuer cette recherche. Les études de terrain et de laboratoire nous permettent de tirer les conclusions ci-après.

Des essais pénétrométriques adaptés (cf. 5.2) ont été exécutés afin de déterminer l'épaisseur de la couche d'altération des TN. Cette couche est mince, quelques dizaines de centimètres au maximum, et formée d'un matériau hétérogène. Celui-ci comprend en effet des éléments de toutes tailles, de pluricentimétriques jusqu'aux micelles argileuses. L'évolution de la roche saine sous-jacente vers les produits altérés superficiels s'accompagne classiquement d'une augmentation de la porosité donc d'une diminution de la densité sèche. Les résultats pénétrométriques révèlent des profils de deux types:

- les uns caractérisés par une évolution structurale, physique et mécanique progressive de la roche saine vers la surface;
- les autres, par la juxtaposition brutale de la tranche altérée et de la roche-mère, ce qui crée entre elles une discontinuité franche. Ceci peut être expliqué soit par l'existence préalable des discontinuités ouvertes, rendant l'altération plus homogène, soit par une substitution latérale due à la reptation qui a mis en place, un matériau déjà altéré.

On rencontre ces deux types de profil dans les TN du même secteur, éventuellement sur deux emplacements voisins. Ceci confirme à quel point l'altération dépend de l'hétérogénéité du matériau puisque son développement dépend à la fois de la fragmentation et de la décarbonatation.

L'évolution décrite ci-dessus correspond à une diminution de la teneur en carbonates sans modification qualitative de la minéralogie (cf. 4.10). En effet, la composition minéralogique ne varie pas de la roche saine vers la surface. La calcite est prédominante. Viennent ensuite le quartz et les minéraux phylliteux. Les TN se composent donc d'un cortège carbonaté et d'une phase détritique, silteuse et argileuse. Les caractères de ces deux phases sont les suivants:

- pour la phase carbonatée, la teneur en carbonates des TN dites "saines" est variable et descend (pour nos échantillons) jusqu'à 12 %. Une telle variation est d'origine sédimentaire;

- pour la phase détritique, parmi les fractions inférieures à 2 µm, la minéralogie, également peu variée, comprend illite, interstratifiés illite-smectite et chlorite-smectite, kaolinite, chlorite. Ces minéraux ne sont pas liés à des horizons d'altération déterminés et, localement, leur proportion varie dans une fourchette limitée. Mais, d'un secteur à l'autre, la variation peut être importante. L'illite, constituant majeur, et la chlorite, s'observent dans tous les échantillons, mais la kaolinite et l'interstratifié illite-smectite sont absents à Barcelonnette. Pourtant, la fraction inférieure à 0,4 mm présente des caractéristiques relativement homogènes (limite de liquidité d'environ 30 % et indice de plasticité d'environ 11 %) (cf. 4.8). Ces valeurs montrent bien que les silts sont prédominants, ce qui est confirmé par les valeurs de bleu, comprises entre 0,3 et 2,7 (cf. 4.9).

Les Membres inférieur et supérieur ne se distinguent pas au niveau des analyses physiques ou minéralogiques. En outre, à part la minéralogie, les TN des trois secteurs peuvent être considérées comme un ensemble lithologique homogène, ce qui autorise à les définir au moyen de caractéristiques moyennes.

La sensibilité à l'eau ou au gonflement est mise en évidence par les essais d'altérabilité (cf. 6.1) et de dégradabilité par gonflement (cf. 6.3). Les essais d'altérabilité, si le produit obtenu est tamisé par voie sèche, montrent une évolution progressive, révélée par des courbes granulométriques parallèles, successivement décalées dans le sens des dimensions décroissantes. Les cycles d'altération développent

donc un processus de fragmentation des grains, qui conservent pourtant des formes homothétiques. Mais, si la granulométrie est obtenue par voie humide, les grains, décollés sous l'influence de l'eau, retrouvent pour finir la dimension initiale des particules mises en place par décantation dans leur bassin sédimentaire originel. L'essai de gonflement, réalisé à l'eau oxygénée, prouve que les TN sont sensibles au gonflement, ce qui est aussi confirmé par les essais mécaniques sur échantillons imbibés. L'essai de dégradabilité par gonflement semble donc très approprié pour prévoir ce caractère gênant des TN.

En dépit de l'homogénéité affirmée ci-dessus, on constate pourtant, d'une région à l'autre, érosion à Draix, glissements sous forêts en Trièves, glissements généralisés et coulées à Barcelonnette. L'explication ne réside pas dans la lithologie mais ailleurs. On doit à la fois faire appel aux facteurs extrinsèques (structure géologique, exposition, végétation, altitude ....) et à certains facteurs intrinsèques (teneur en carbonate, texture, présence de pyrite ...). Nous tentons ci-après, d'expliquer les différences de comportement observées.

En ce qui concerne les facteurs intrinsèques, la teneur en carbonates et la texture doivent être considérées simultanément, car on peut avoir des échantillons marneux ayant une teneur semblable en carbonates mais des comportements différents. Ce premier paramètre, pris seul, ne signifie donc pas grand-chose. De plus, il se tient souvent aux alentours de 30 à 45 %. C'est donc surtout la texture qui explique le comportement du matériau. En effet, elle a une relation étroite avec l'altérabilité et la sensibilité au gonflement (cf. 4.12 et 6.4). En général, la texture alvéolaire, où la liaison est assurée par les argiles - les grains cristallins, de petite taille étant disséminés dans la matrice - favorise la dégradation. On peut en citer quelques exemples de la vallée du Riffol (Trièves) et de Barcelonnette. Dans la région de Barcelonnette, à la texture lâche s'ajoute la présence de nodules pyriteux. Ces éléments, en présence d'eau et de calcite, fournissent de l'acide sulfurique et du gypse en doublant leur volume, comme le feraient les smectites. De nombreuses coulées de la région peuvent être ainsi expliquées en se référant aux conditions géologiques. Par contre, la texture compacte, avec des grains de calcite formant une squelette rigide, assure une bonne tenue.

En ce qui concerne les facteurs extrinsèques, A. LEGIER (1977) a remarqué qu'à

Barcelonnette les mouvements de faible profondeur intervenaient principalement dans des TN sous recouvrement quaternaire (formations glaciaires). Sous cette couverture perméable, l'altération se propage librement dans des TN dont les caractères intrinsèques sont déjà médiocres. Par contre, le fait d'une schistosité et d'une fracturation moins développées que dans l'Ubaye, et l'absence presque complète de couverture végétale, expliquent que les TN de Draix ne connaissent que quelques glissements d'importance mineure. Au contraire, l'érosion directe de pentes peu protégées y est plus sensible.

Les forêts combattent efficacement le ravinement en protégeant les couches superficielles, mais favorisent aussi l'infiltration et la rétention d'eau, tandis que les racines ont tendance à ouvrir les fissures de la roche. Il en résulte donc une accélération de l'altération qui crée une tranche importante de sol argileux. C'est ainsi que peuvent se développer des glissements présentant quelques mètres d'épaisseur. On peut en citer quelques exemples: glissements sous peuplements forestiers à Roissard, à Clelles .... (Trièves) et aussi dans le bassin du Riou Bourdoux, près de Barcelonnette.

Afin de compléter la connaissance des TN sous l'aspect mécanique et d'étudier leur comportement lors d'une mise en remblai éventuelle, des échantillons compactés à l'OPM (cf. 7) ont été fabriqués, à partir d'une roche de référence. L'essai Proctor fournit une densité sèche maximale élevée et une teneur en eau optimale voisine de la teneur en eau naturelle. Les essais CBR et à l'oedomètre montrent que les TN sont très sensibles à la teneur en eau (cf. 6.1 et 6.3). Ceci se traduit, après imbibition par une forte chute de l'indice CBR et un effondrement structural de l'échantillon. En outre, dans le cas du matériau non saturé, on a un CBR élevé et le tassement à l'oedomètre se produit en deux phases: un tassement immédiat et un tassement de fluage. L'essai de fluage montre également une relation non linéaire entre la déformation et le logarithme du temps. Dans l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande, la surconsolidation, due à un compactage intense, se manifeste par un angle de frottement et une cohésion très élevés. Ce type d'essai sur des matériaux altérés montre l'importance de l'effet d'échelle sur les résultats (cf. 5.1), car la phase de réarrangement des grains est très importante, si bien que la phase de cisaillement n'apparaît pas pour une déformation ayant atteint 12 %. Le fait est dû aux éléments du sol qui ont une grande taille par rapport à la boîte d'essai et bloquent le cisaillement.

Les remblais déjà construits constituent une autre source d'information: remblai des Blancs (environ 10 m de hauteur) et remblai du chemin de fer (environ 2, 3 m) près du Col du Fau. Le premier se montre instable: affaissement d'ensemble, fissures dans la chaussée et glissement dans un parement. A priori, on a pensé que les TN étaient en cause, mais les mesures inclinométriques montrent que le déplacement se situe vers 12 m de profondeur, dans des formations quaternaires. Ceci est aggravé par la rupture d'une buse qui injecte de l'eau dans le remblai. Lors des travaux de réfection, on a constaté que les TN du remblai étaient moins altérées qu'on avait pu le craindre: on y a trouvé beaucoup de blocs résiduels enveloppés dans une matrice argileuse. Le remblai du chemin de fer, édifié avec des TN de moins bonne qualité que celles du Blanc (teneur plus faible en carbonates et texture plus lâche) s'est montré stable depuis presque un siècle. Il est vrai qu'il est beaucoup moins élevé que le remblai routier.

Quoi qu'il en soit, nous concluons que, dans les deux cas, et malgré leur sensibilité à l'eau, les TN peuvent être utilisées en remblai, à condition que le terrain de fondation le permette et sous la réserve que l'on prenne un certain nombre de précautions particulières lors de leur mise en oeuvre (compactage intense par levées minces, protection des talus et drainage).

Si certains processus et certaines relations sont maintenant mieux expliqués ou plus évidents, il serait souhaitable d'engager encore de nouvelles études. Par exemple, il serait intéressant d'affiner l'influence simultanée des divers types de texture et des divers teneurs en carbonates sur la dégradabilité et l'indice de gonflement du matériau. On pourrait probablement en tirer des conclusions quant à la prévention des désordres qui se développent dans les TN.

Une autre voie à explorer serait la mise au point d'une norme appliquant la valeur de bleu (tellement pratique!) à l'étude des matériaux rocheux.

ANNEXE 1 :

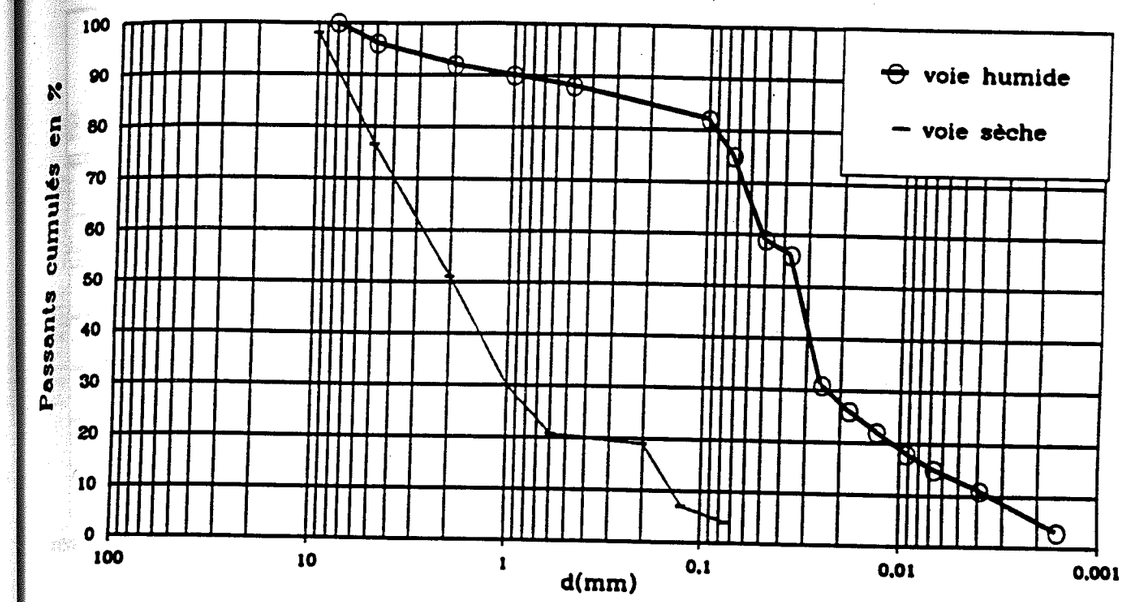
Coordonnées des points de prélèvement

Echantillon	X	Y	Z
1	44 ° 54 ' 26 "	5 °37 ' 38 "	900 m
4A, ..., 4E	44 ° 51 ' 40 "	5 ° 37 ' 4 "	680
5A, 5B	44 ° 51 ' 40 "	5 ° 37 ' 23 "	700
7A, ..., 7D	44 ° 51 ' 52 "	5 ° 36 ' 30 "	700
8	44 ° 51 ' 54 "	5 ° 36 ' 18 "	720
9A, 9B	44 ° 52 ' 10 "	5° 36 ' 52 "	847
10A, ..., 10E	44 ° 8 ' 30 "	6 ° 21 ' 45 "	854
11	44 ° 8' 43 "	6 ° 21 ' 25 "	860
12	44 ° 8 ' 43 "	6 ° 21 ' 32 "	864
13	44 ° 8 ' 47 "	6 ° 21 ' 36 "	878
14A, 14B	44 ° 8 ' 43 "	6 ° 21 ' 42 "	880
15A, 15B	44 ° 8 ' 41 "	6 ° 21 ' 48 "	890
16A, 16B	44 ° 8 ' 45 "	6 ° 21 ' 51 "	900
21	44 ° 8 ' 50 "	6 ° 22 ' 13 "	1018
22A, 22B	44 ° 8 ' 53 "	6 ° 22 ' 19 "	1058
23A, 23B	44 ° 8 ' 32 "	6 ° 21 ' 53 "	865
24A, 24B	44 ° 8 ' 34 "	6 ° 22 ' 8 "	884
28A, ..., 28E	44 ° 53 ' 42 "	5 ° 36 ' 50 "	910
31A, 31B	44 ° 52 ' 18 "	5 ° 39 ' 34 "	690
32A, 32B	44 ° 22 ' 35 "	6 ° 46 ' 25 "	2158
33A, ..., 33C	44 ° 22' 2 "	6 ° 46 ' 46 "	1950
34	44 ° 23 ' 47 "	6 ° 44 ' 00 "	1460
35A, 35B	44 ° 23 ' 52 "	6 ° 43 ' 51 "	1400
36	44 ° 24 ' 00 "	6 ° 43 ' 28 "	1360
37A, 37B	44 ° 23 ' 38 "	6 ° 38 ' 2 "	1180
38A, ..., 38C	44 ° 24 ' 13 "	6 ° 36 ' 40 "	1320
43A, 43B	44 ° 51 ' 37 "	5 ° 39 ' 11 "	550
44A, 44B	44 ° 51' 38 "	5 ° 39 ' 13 "	530
45A, 45B	44 ° 51 ' 39 "	5 ° 39 ' 15 "	520

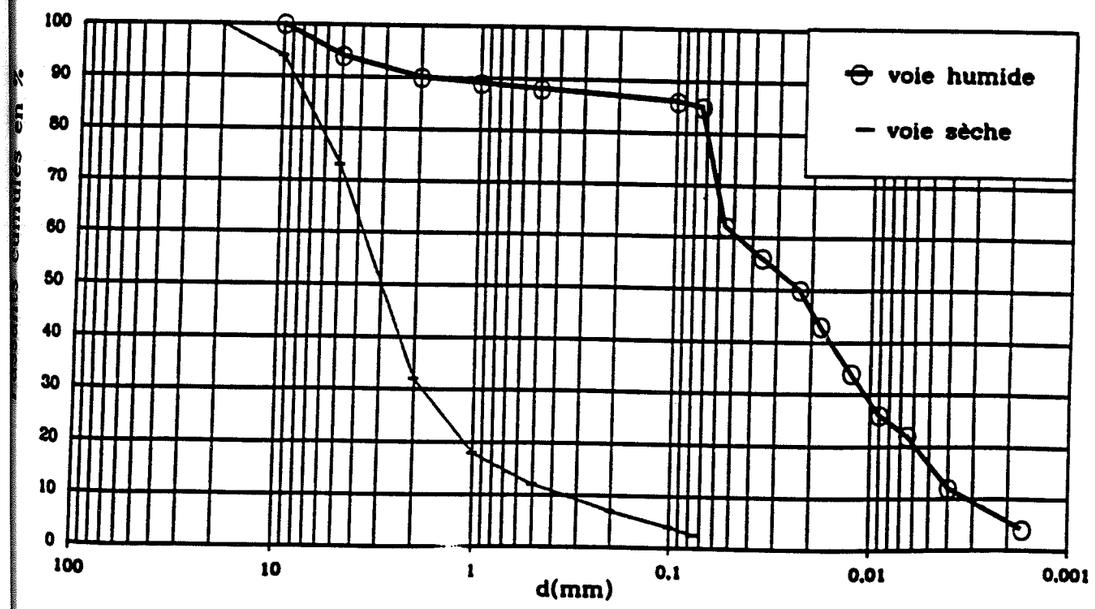
ANNEXE 2 :

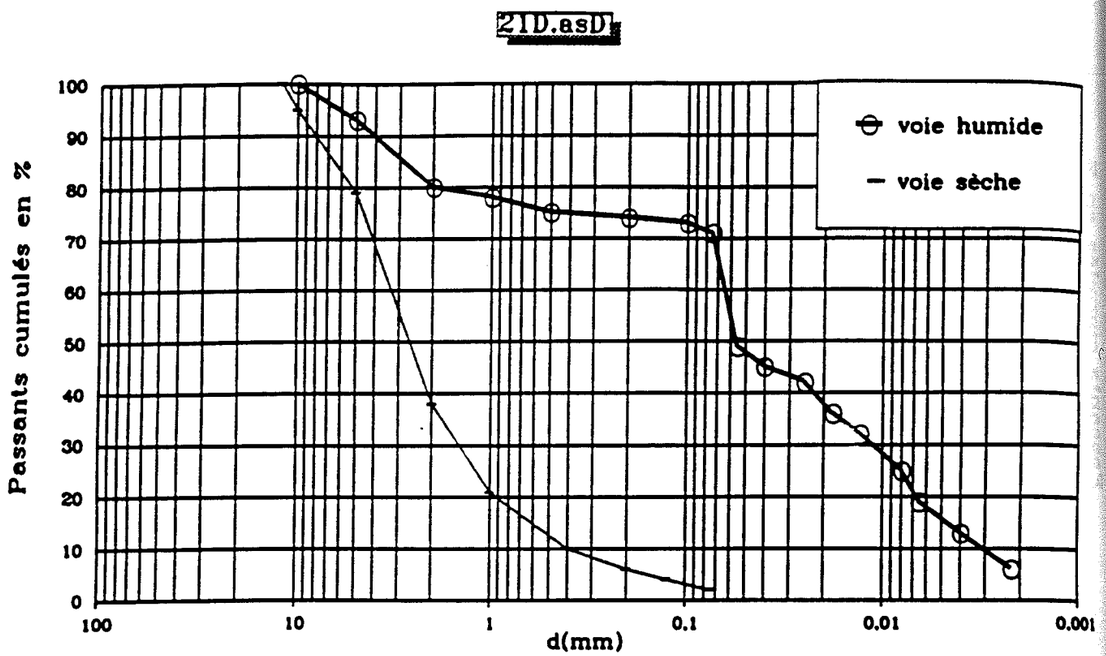
Courbes granulométriques

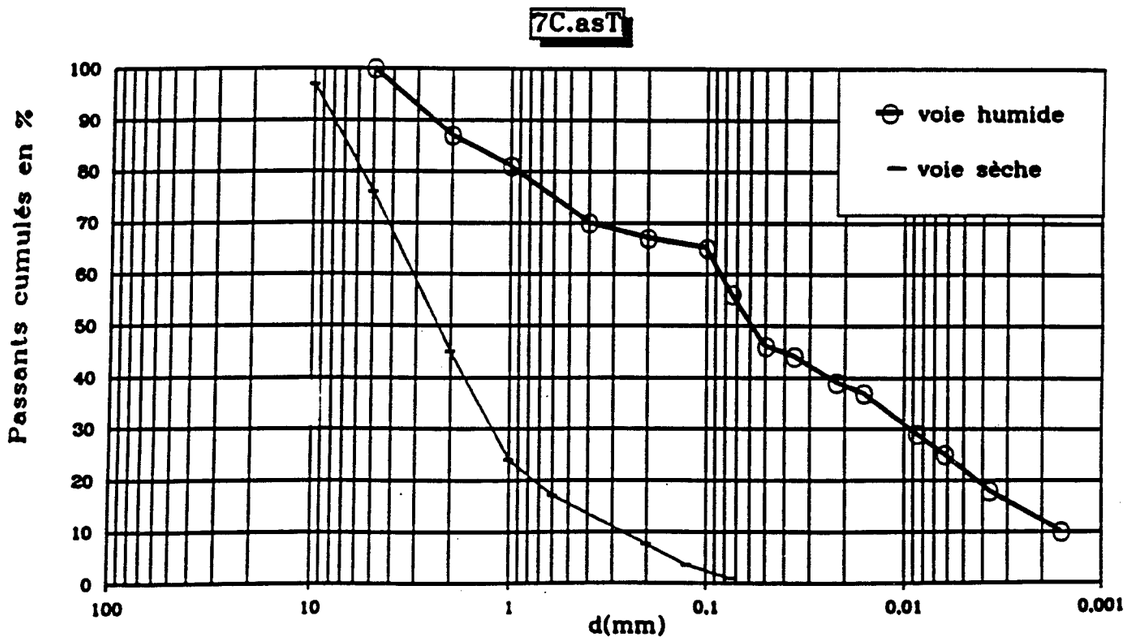
9A.asT

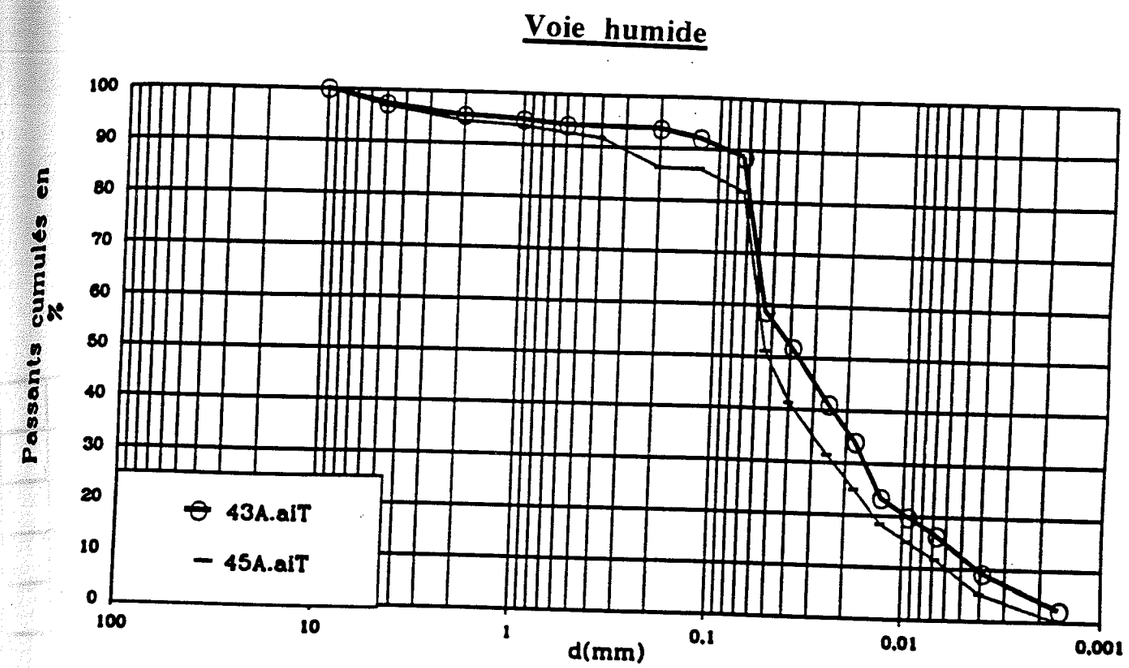


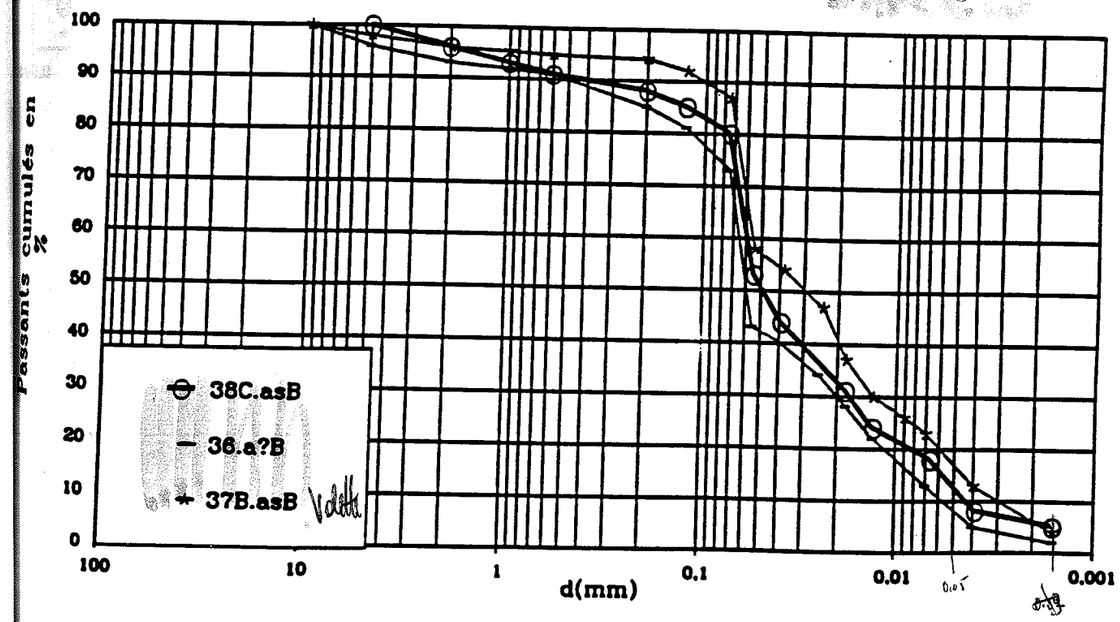
10A.aID



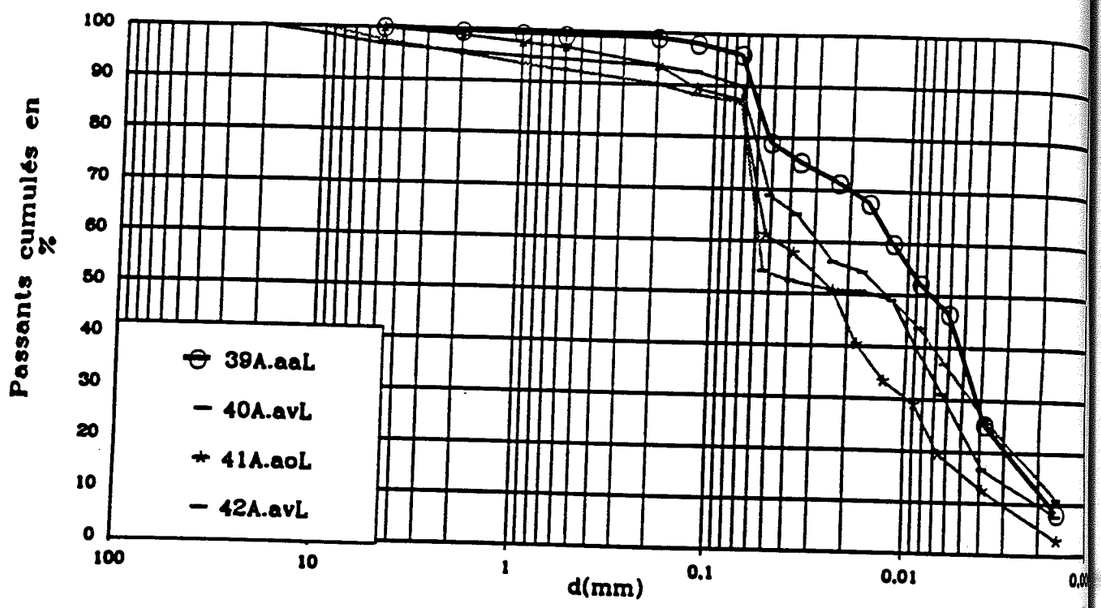

21D.asD
voie humide
voie sèche
Passants cumulés en %
d(mm)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
100
10
1
0.1
0.01
0.001


7C.asT
voie humide
voie sèche
Passants cumulés en %
d(mm)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
100
10
1
0.1
0.01
0.001


Voie humide
43A.aiT
45A.aiT
Passants cumulés en %
d(mm)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
100
10
1
0.1
0.01
0.001


38C.asB
36.a?B
37B.asB
Passants cumulés en %
d(mm)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
100
10
1
0.1
0.01
0.001

Voie humide



ANNEXE 3 :

Méthode de détermination de la valeur de bleu d'un sol

Schaeffner a définit trois cas de détermination de la valeur de bleu, selon l'étendue granulométrique du sol étudié (page suivante). Les TN altérées représentent souvent le deuxième cas. Si l'on opère sur la fraction 0/74 µm comme prise d'essai, on a les étapes suivantes:

- L'essai au bleu est réalisé sur la fraction 0/74 µm. Par exemple on prend 30g de cette fraction.
- La valeur de bleu est ensuite rapportée à 100g de la fraction 0/74µm.
- La valeur de bleu cherchée est égale à:

$$VBS = VB0/74 \ \ x \frac{\%\ 0/74\mu m}{100}$$

Maintenant, on revient à la formule

$$M_h = \frac{f'\ (w+100)}{f}$$

où : M_h : masse humide de la prise d'essai (g)

w : teneur en eau (%)

f : teneur en fines (%)

f' : quantité de fines qu'il est souhaitable d'avoir dans la prise d'essai (g).

- On prend 30g de fines (0/74 µm), f'=30, à une teneur en eau égale à 0% (W=0% est normale, car on prend souvent les fines après l'essai granulométrique pour réaliser l'essai au bleu). On effectue l'essai sur la fraction fine, f est donc égale à 100. On aura, alors, une prise d'essai, M_h égale à 30g.

- La valeur de bleu ainsi mesurée est ensuite rapportée à 100g de fines (0/74µm).

- La valeur de bleu du sol global est égale à:

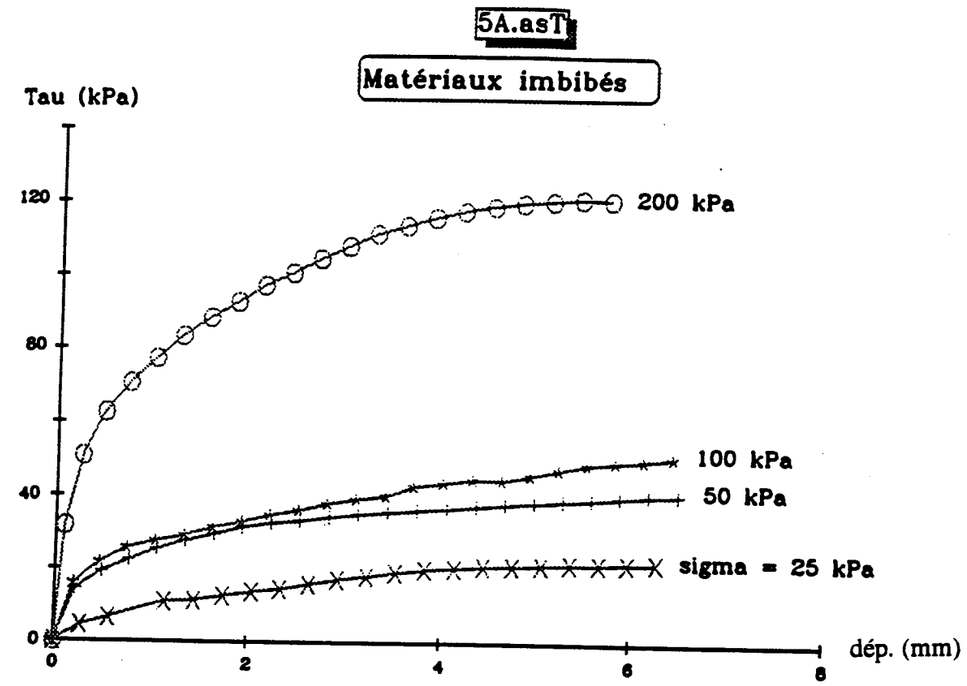
$$VB0/D\ calculée = VB0/74 \ \ x \frac{\%\ 0/74\mu m}{100}$$

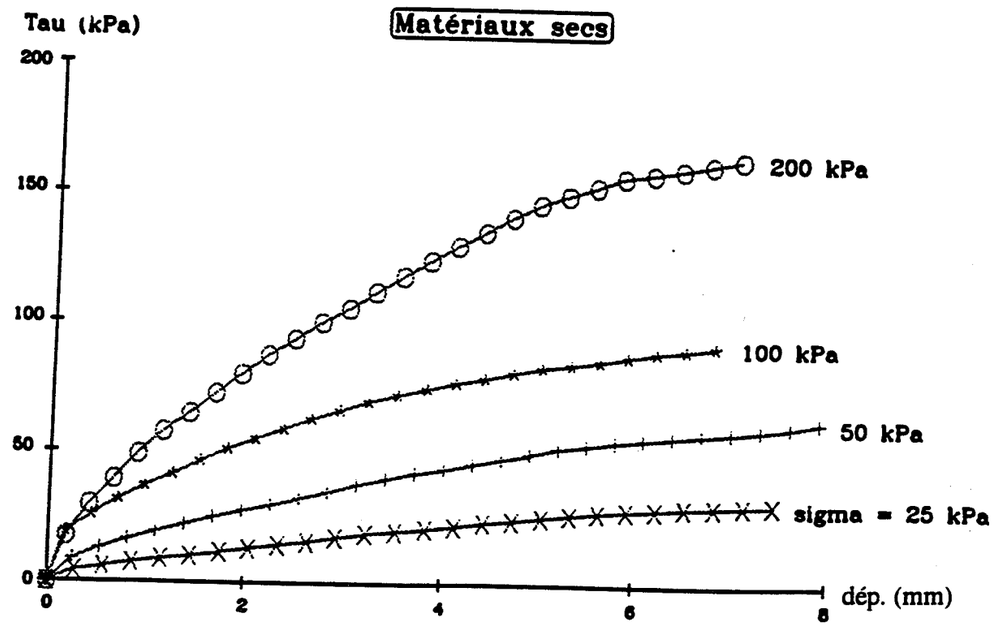
Ainsi VB0/D calculée = VBS.

Cas 1	Le Dmax du sol est compatible avec la fraction 0/d devant constituer la prise d'essai	- L'essai au bleu est réalisé directement sur un échantillon représentatif du sol total - La valeur de bleu ainsi trouvée rapportée à 100g de la prise d'essai constitue la valeur de bleu cherchée
Cas 2	Le Dmax du sol est inférieur à 50 mm mais cependant trop grand pour être compatible avec la fraction 0/d devant constituer la prise d'essai.	- L'essai au bleu est réalisée sur la fraction 0/d choisie par l'opérateur. - La valeur de bleu ainsi mesurée, rapportée à 100g de la fraction 0/d, constitue la VB0/d. - La valeur de bleu cherchée est alors égale à VBS = VB0/d x C(0/d)/100 C(0/d) étant la proportion exprimée en % de la fraction 0/d dans le sol étudié.
Cas 3	Le Dmax du sol est supérieur à 50 mm	- L'essai au bleu est réalisé sur la fraction 0/d choisie par l'opérateur. - La valeur de bleu ainsi mesurée, rapportée à 100g de la fraction 0/d, constitue la VB0/d. - La valeur de bleu cherchée est alors égale à VBS = VB0/d x %C' (0/d)/100 C' (0/d) étant la proportion exprimée en % de la fraction 0/d présente dans la fraction 0/50 mm du sol étudié.

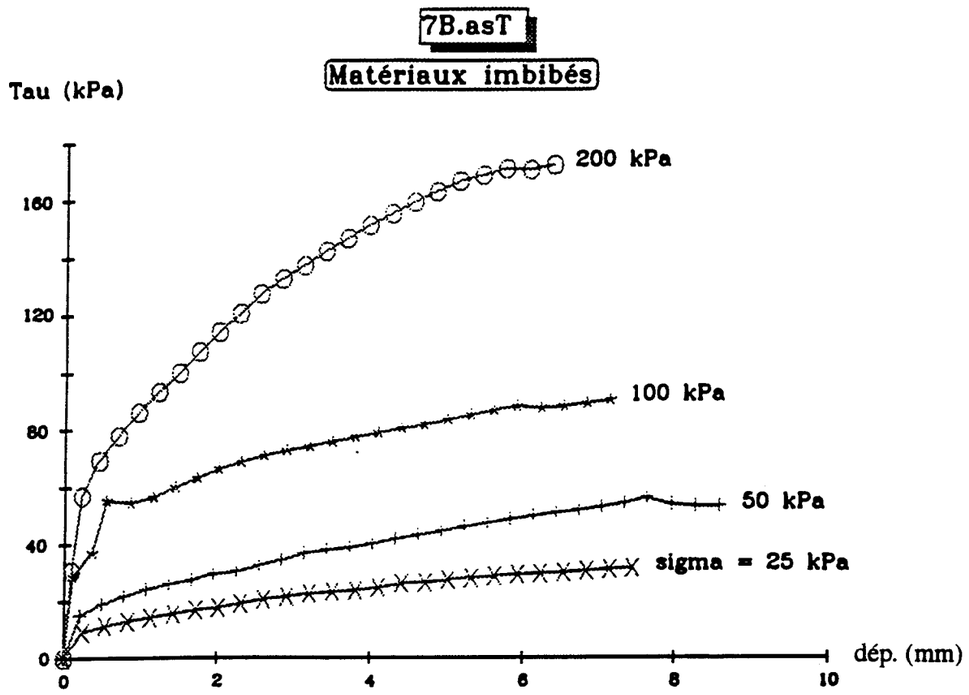
ANNEXE 4 :

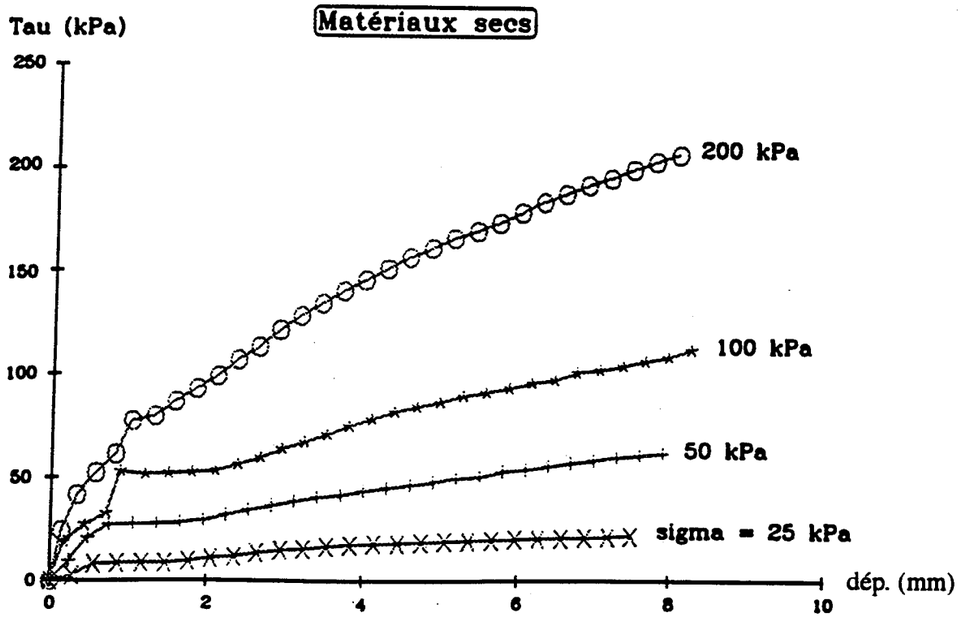
Courbes contrainte - déplacement des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande



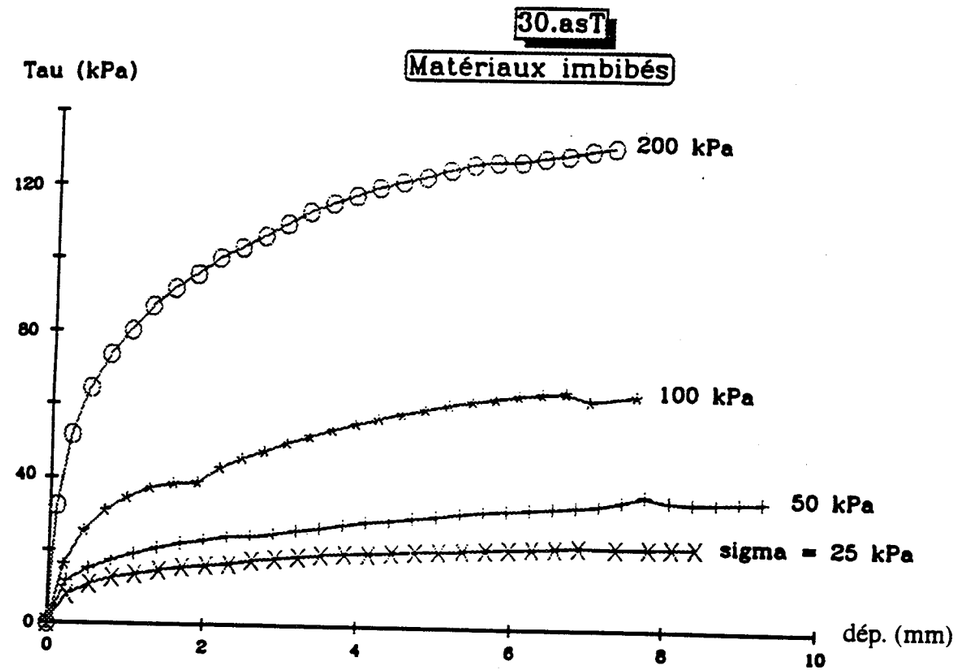


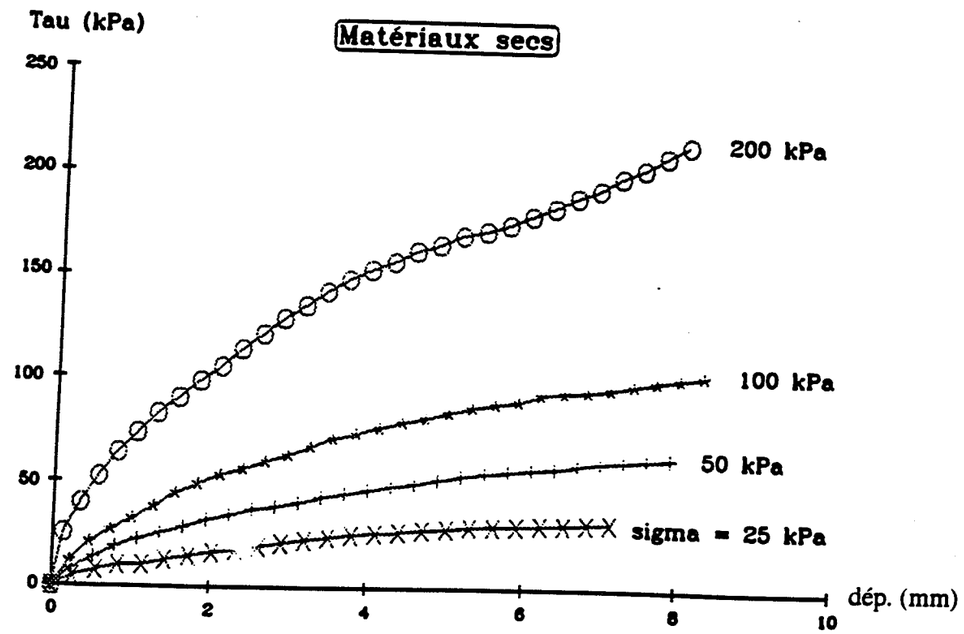
Annexe 4 - Courbes contrainte-déplacement des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande



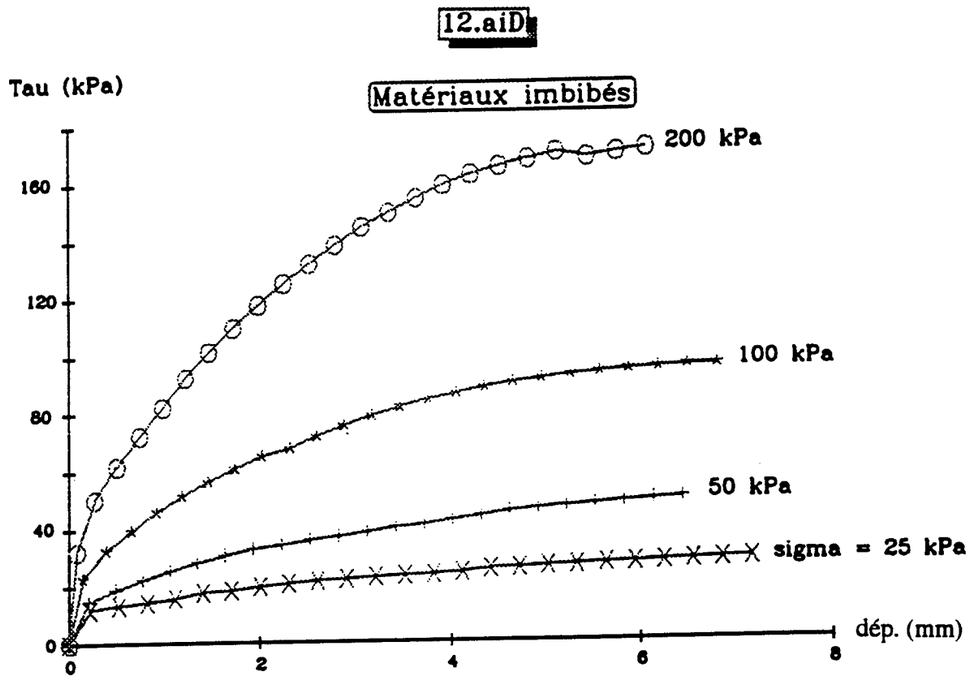


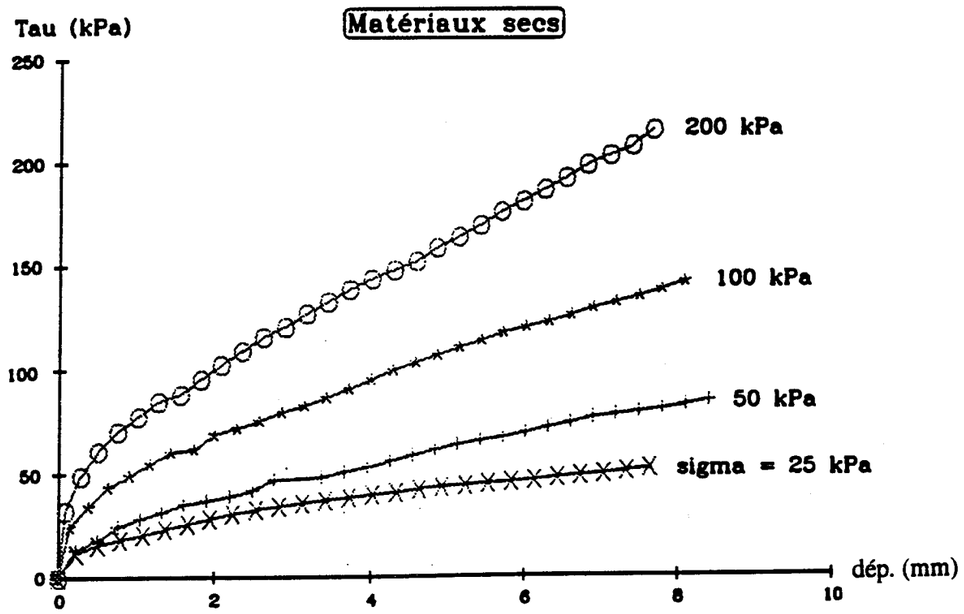
Annexe 4 - Courbes contrainte-déplacement des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande



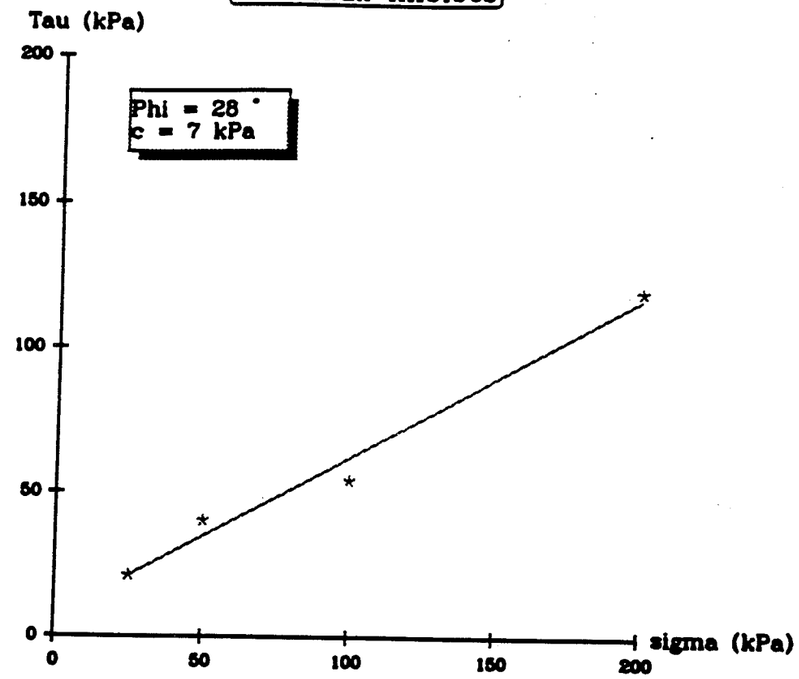


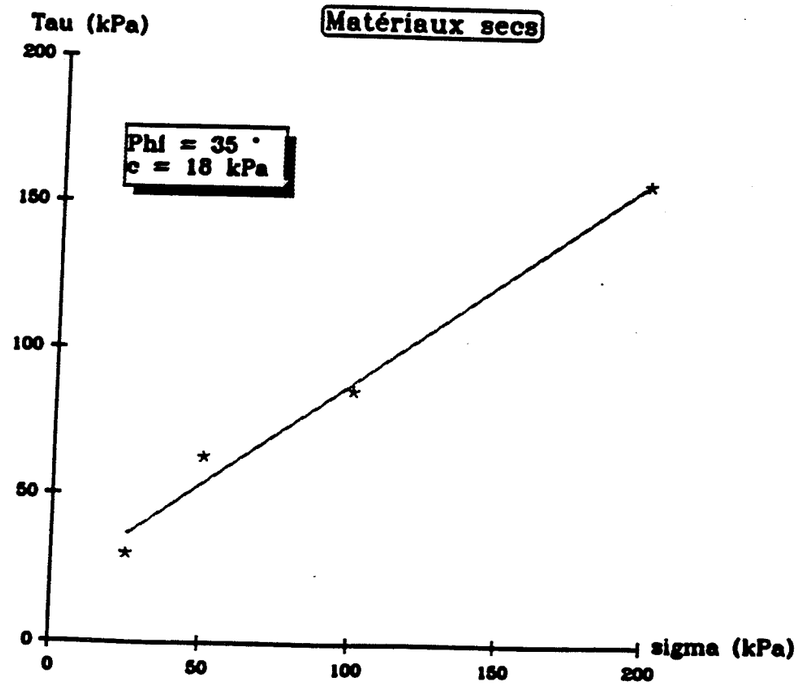
Annexe 4 - Courbes contrainte-déplacement des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande



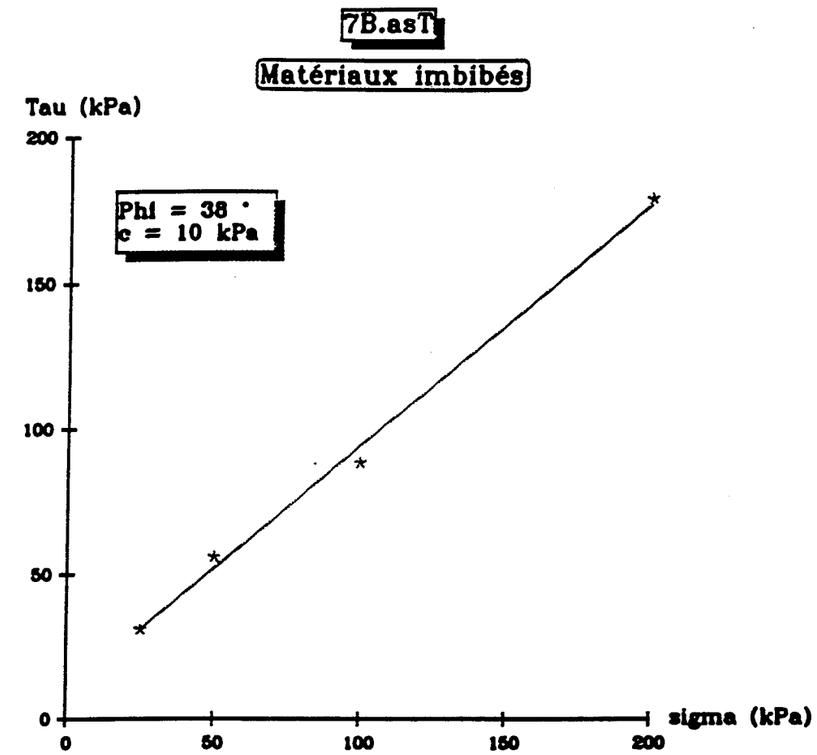


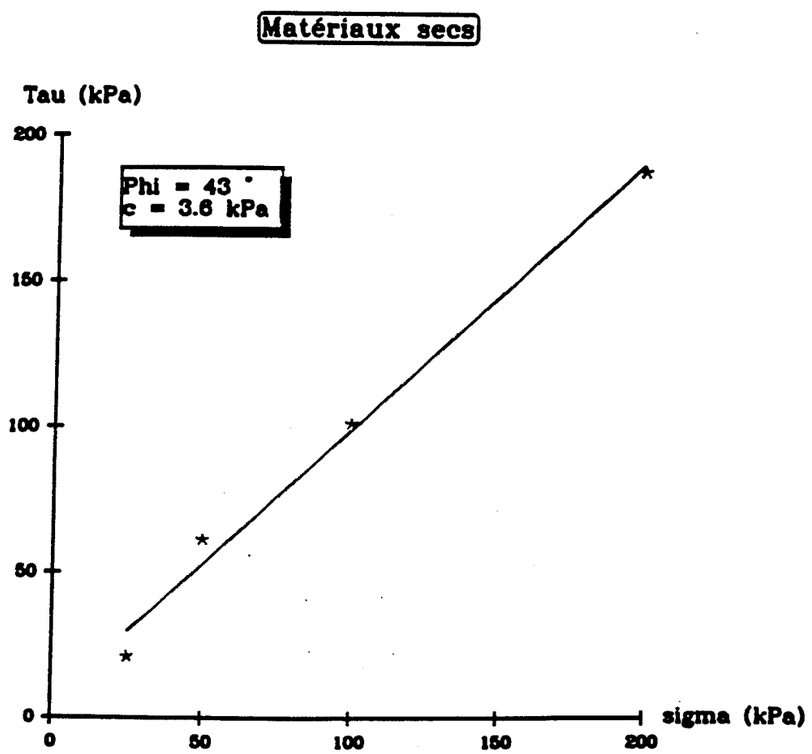
Annexe 4 - Courbes contrainte-déplacement des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande



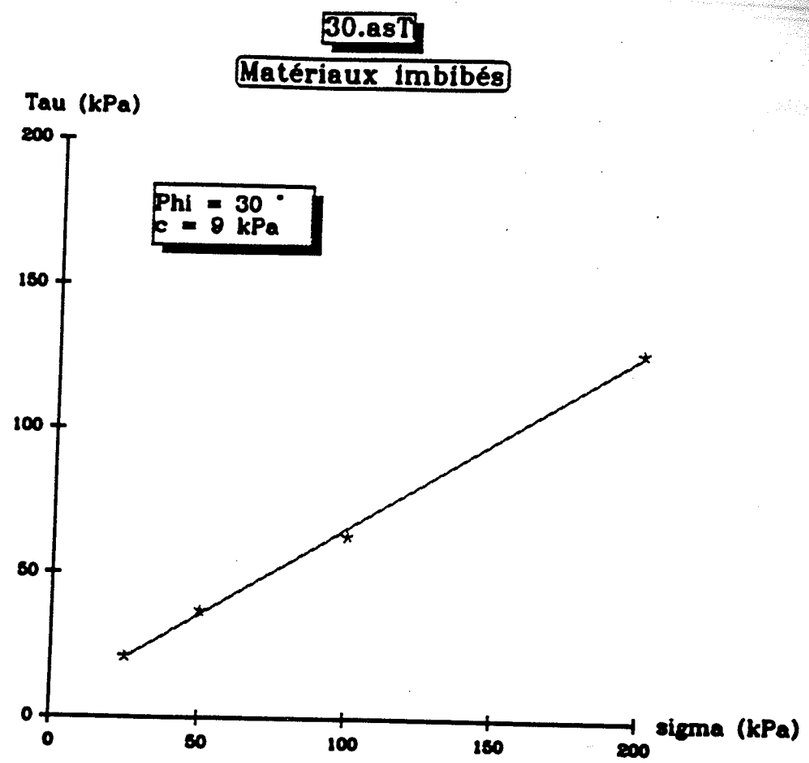


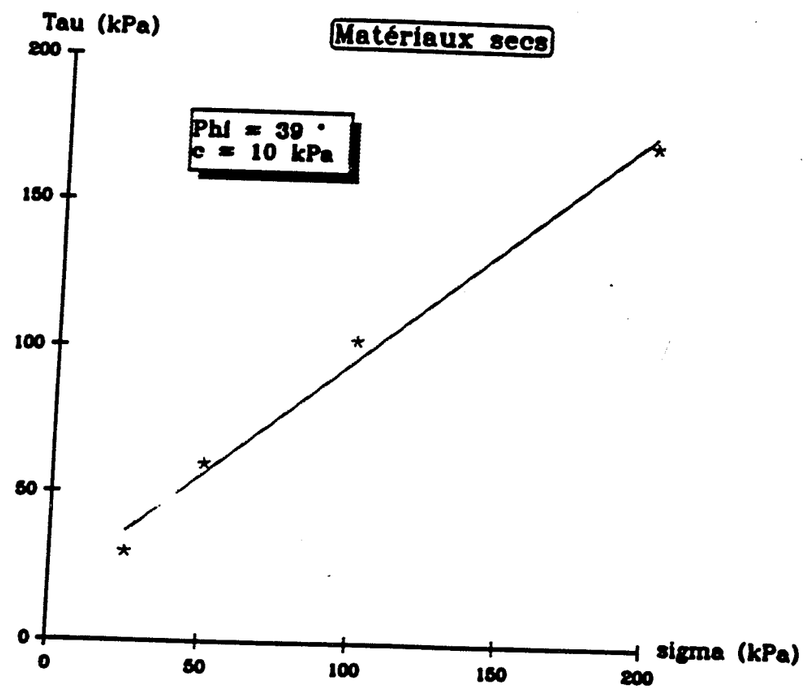
Annexe 4 - Courbes contrainte-déplacement des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande



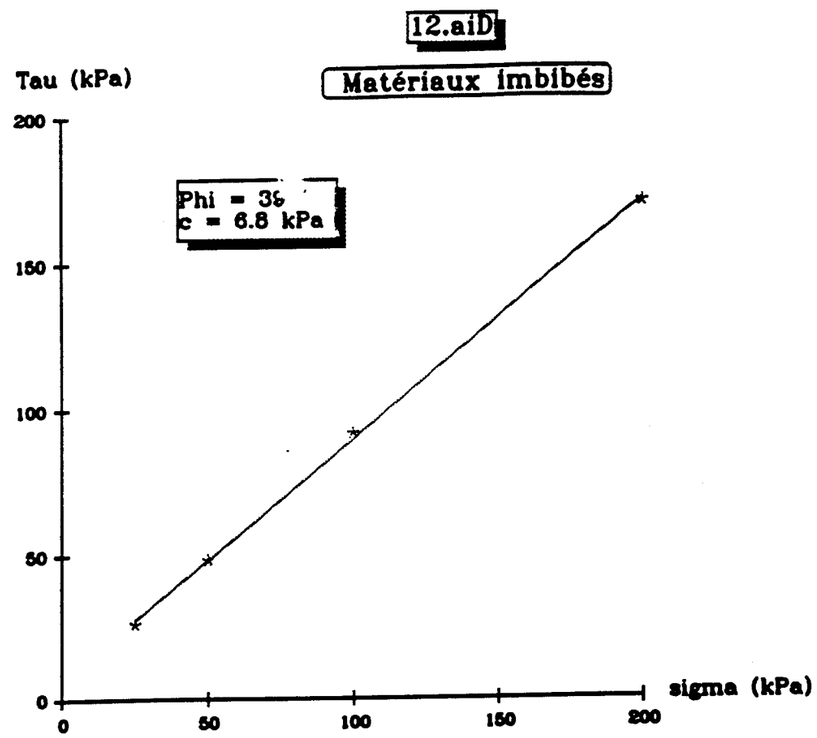


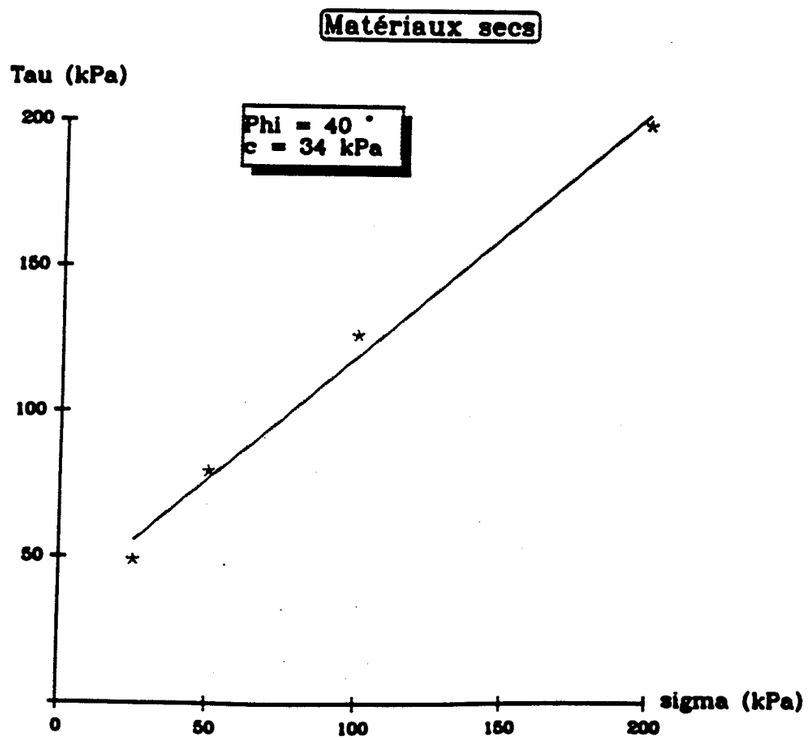
Annexe 4 - Courbes contrainte-déplacement des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande





Annexe 4 - Courbes contrainte-déplacement des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande





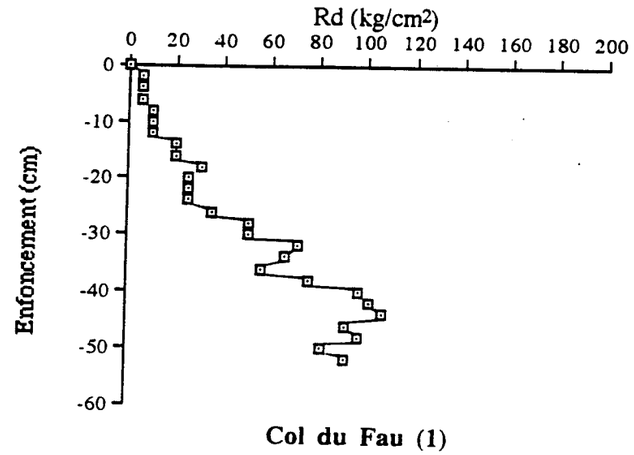
Annexe 4 - Courbes contrainte-déplacement des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande

ANNEXE 5 :

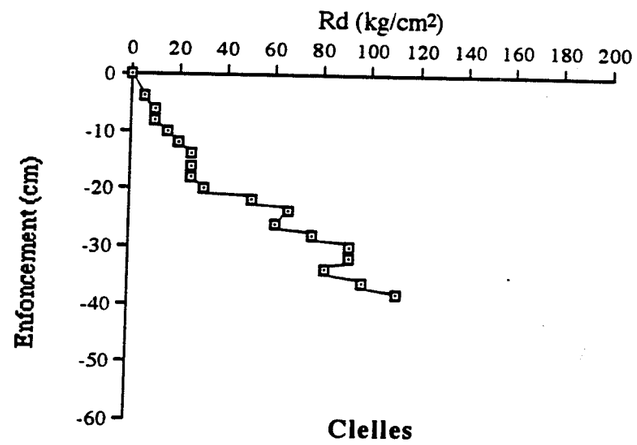
Diagrammes pénétrométriques

Annexe 5 - Diagrammes pénétrométriques

Trièves



Col du Fau (1)

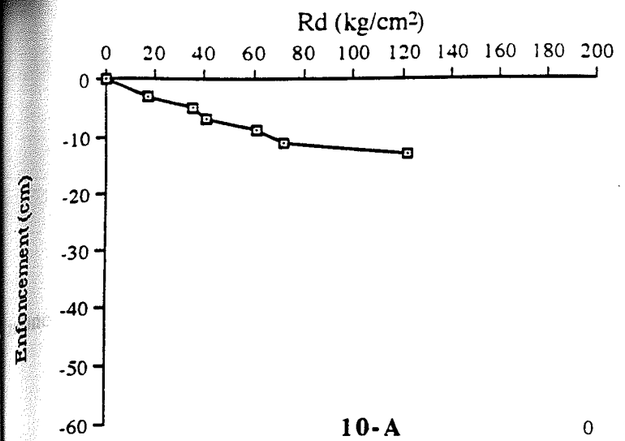


Clelles

Col du fau (1): Essai fait sur une pente de 30°

Clelles: Essai fait sur une pente de 32°

Draix



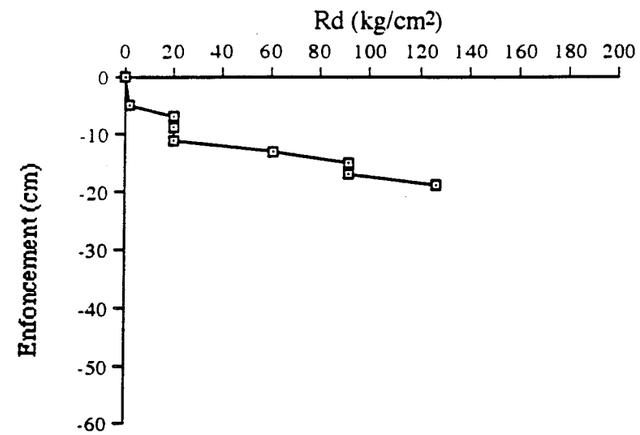
10-A

10-1: Essai fait sur une pente de 30°

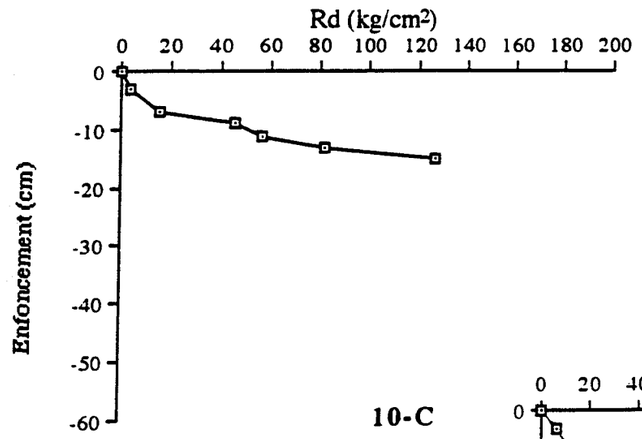
10-2: sur un terrain plus meuble avec une pente de 28°

10-3: dans un rigole. Pente du terrain: 27°

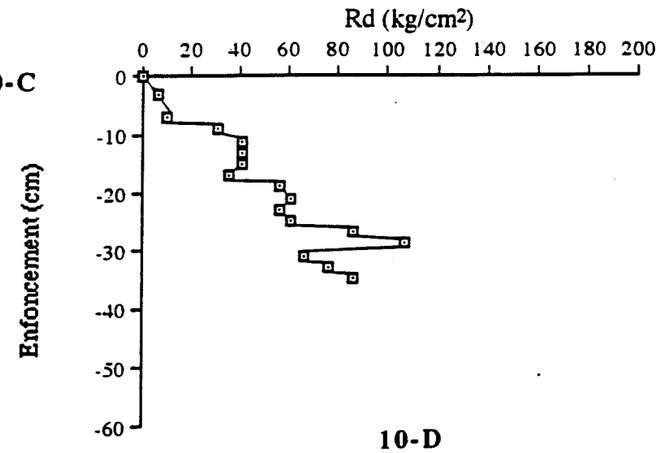
10-4: sur une pente de 22°, en amont des 3 esais précédents



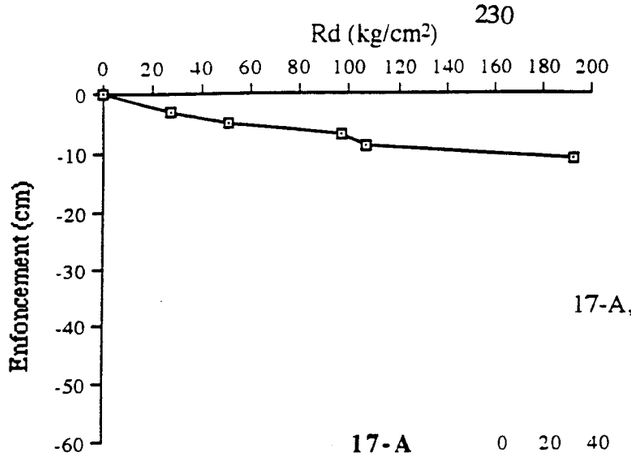
10-B



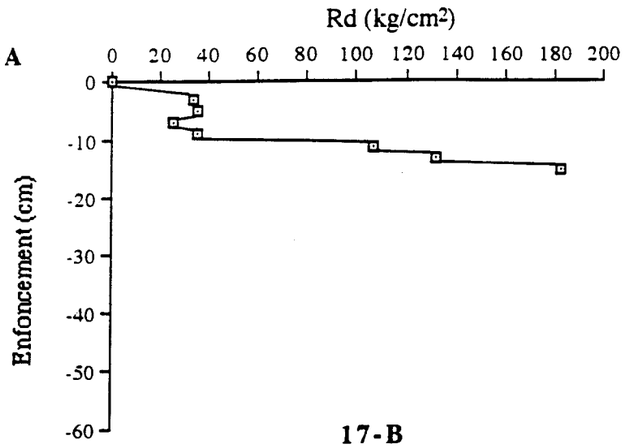
10-C



10-D

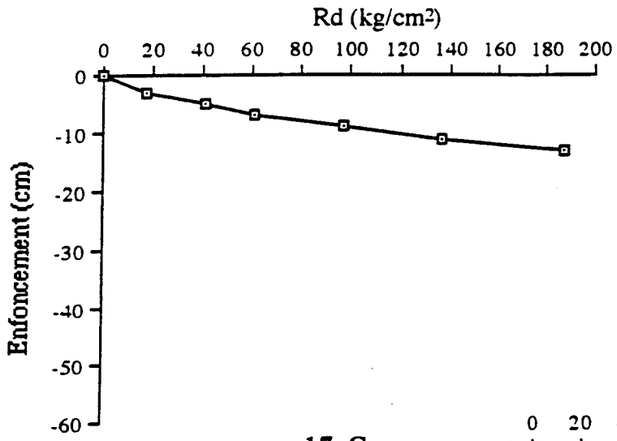


17-A, 17-B, 17-C, 20: sur des terrains horizontaux

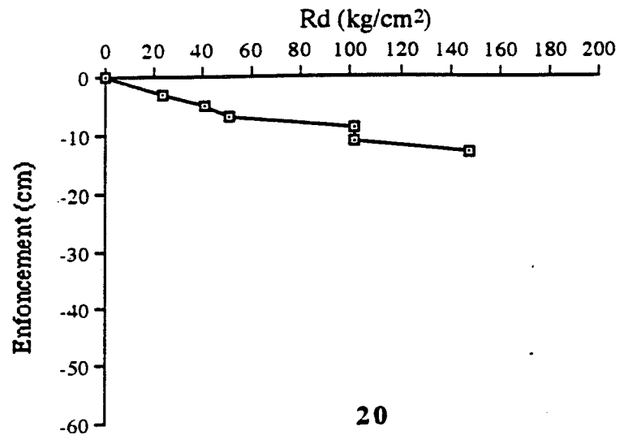


17-A

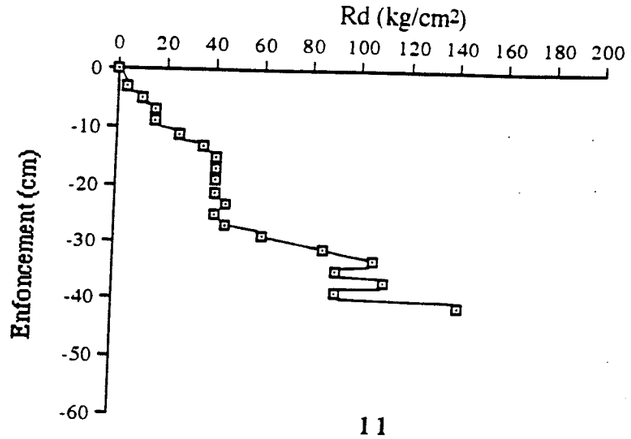
17-B



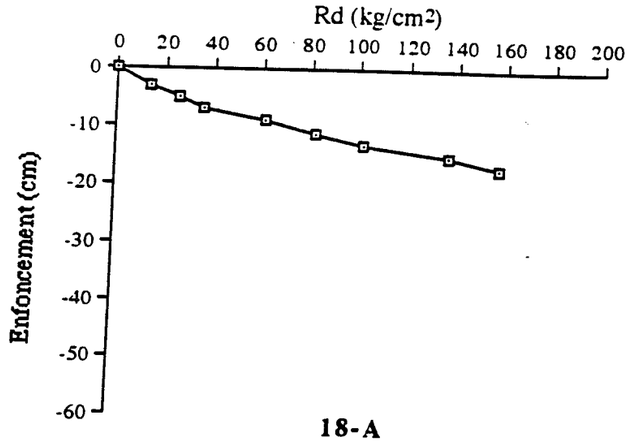
17-C



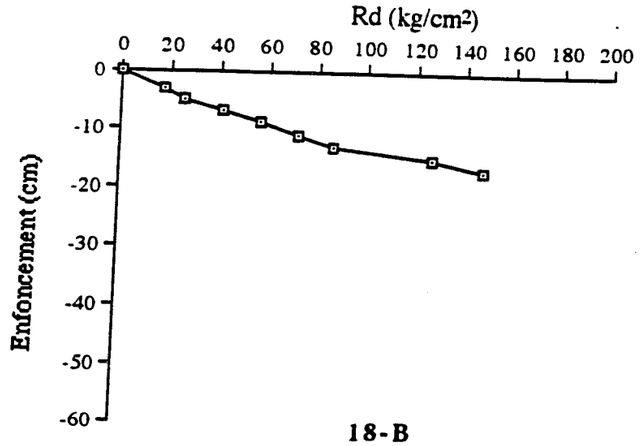
20



11



18-A



18-B

11: Essai fait sur une pente de 35°

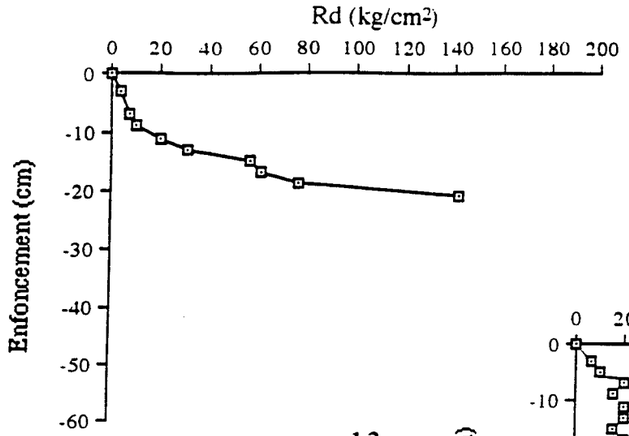
18-A, 18-B: Essais faits sur des terrains horizontaux

13: sur une pente de 35°

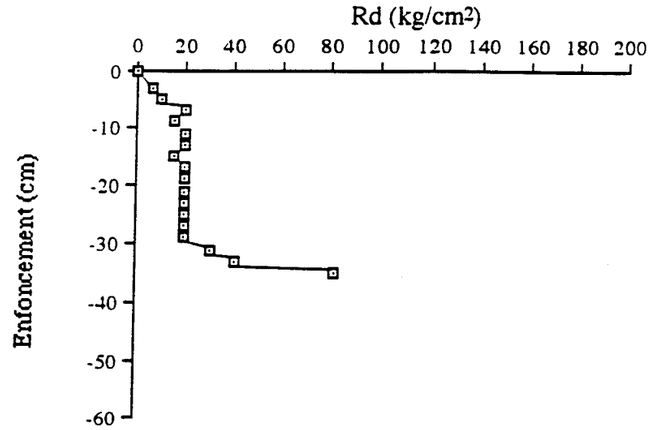
14: sur une pente de 38°

15: sur une pente de 24°

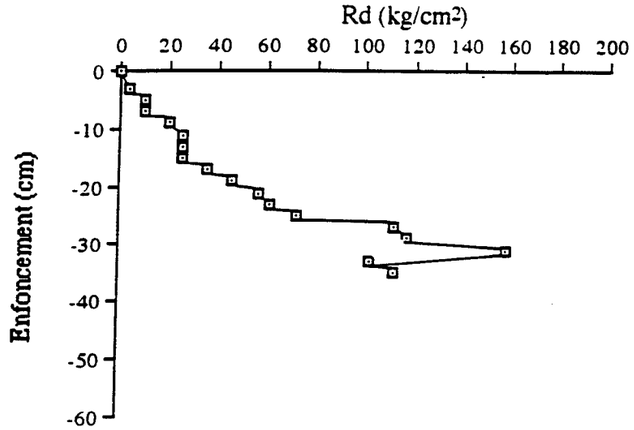
16: Essai fait sur une pente de 35°



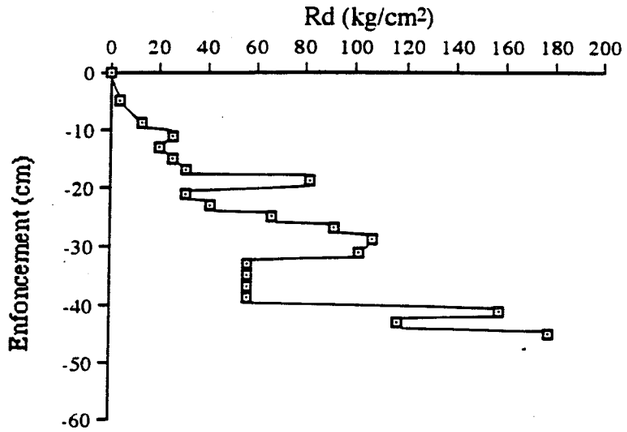
13



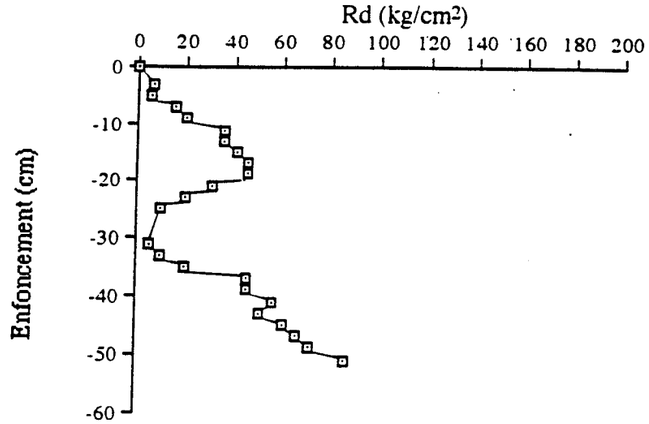
14



15

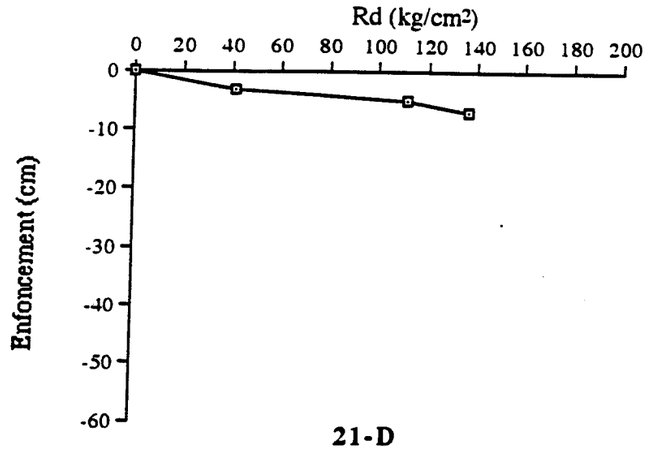


16



21-A

21-A, 21-D: Essais faits sur des terrains horizontaux



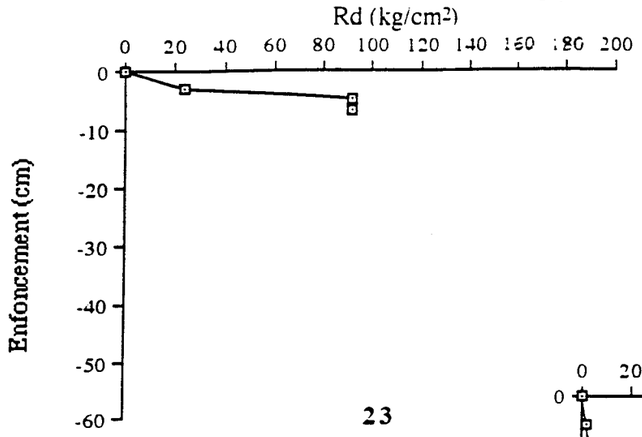
21-D

23: sur une pente de 25°

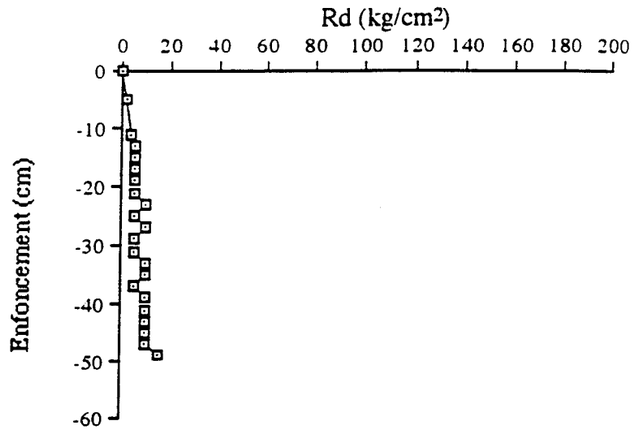
24-A: Essai fait sur une pente de 32°

24-B: sur une pente de 38°. En haut de 24-1: 5 cm

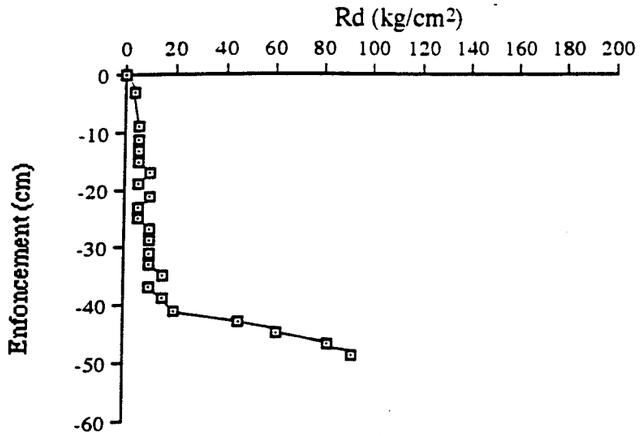
24-C: dans un ravin avec une pente de 38°, à une distance de 50 cm de 24-2



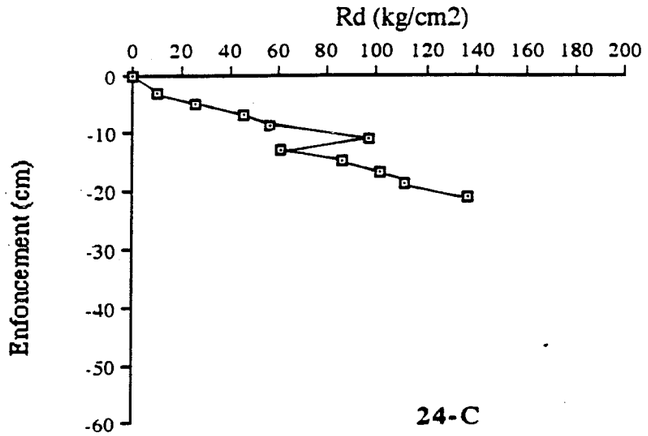
23



24-A

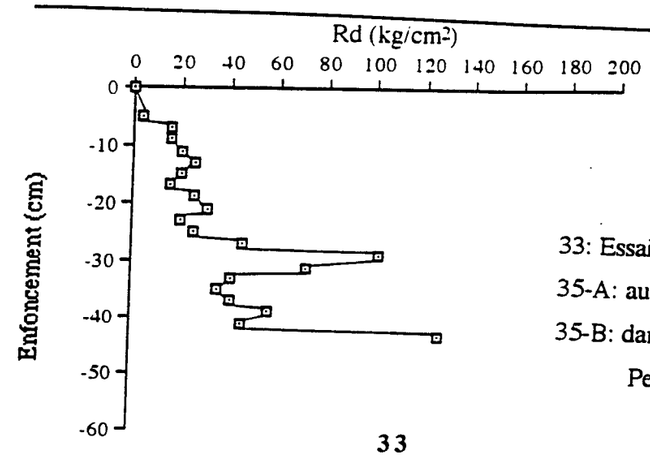


24-B



24-C

Barcelonnette



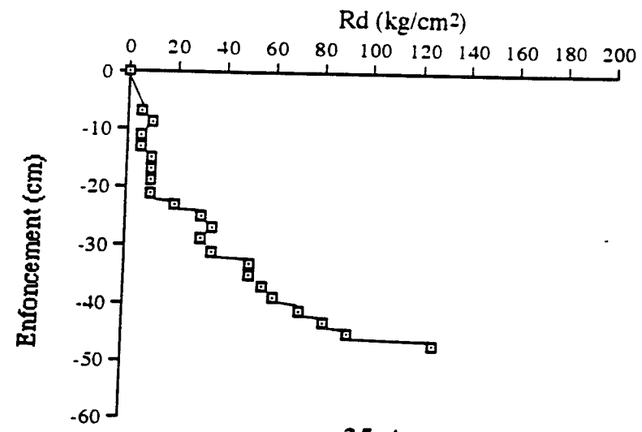
33

33: Essai fait sur une pente de 20° dans un ruisseau

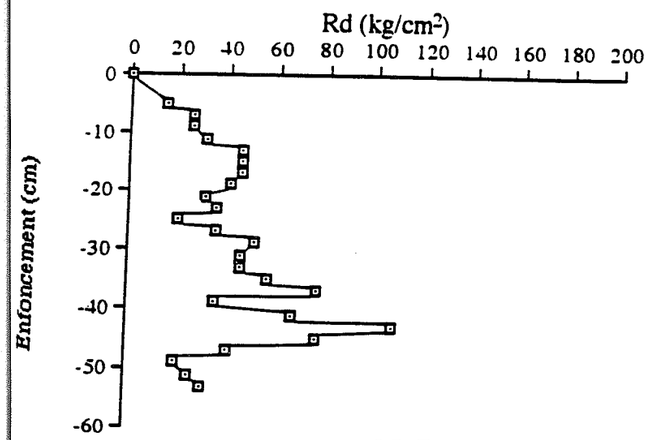
35-A: au pied d'un talus

35-B: dans une coulée "torrent de Poche".

Pente du terrain: 25°

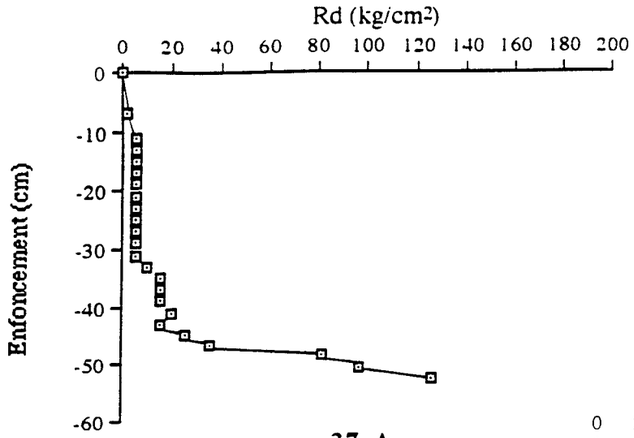


35-A



35-B

Annexe 5 - Diagrammes pénétrométriques



37-A

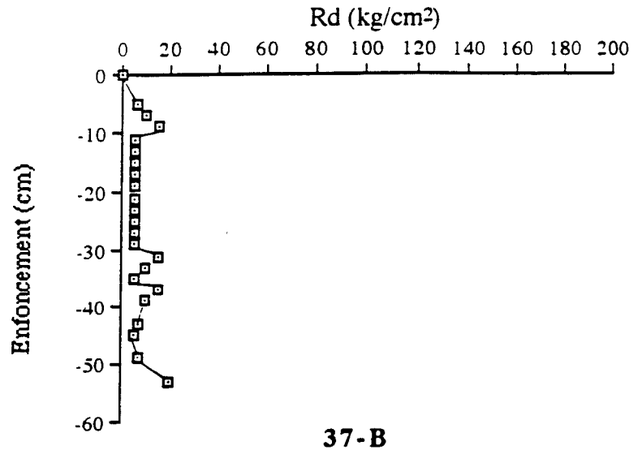
37-A, 37-B, 37-C: Sur les replats d'une per

37-C: au sommet de la pente

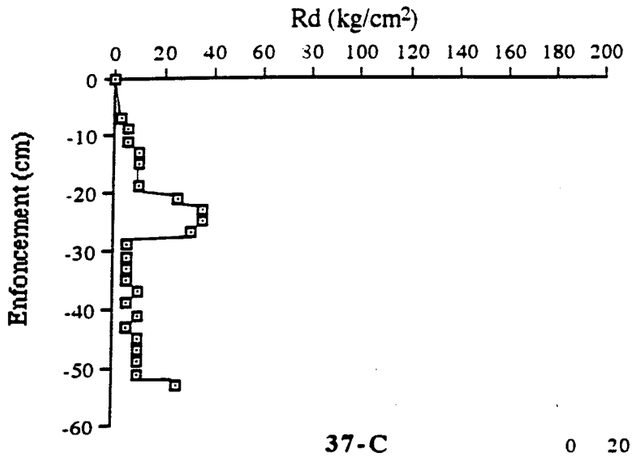
37-A: au contre-bas de 37-3

37-B: entre les deux

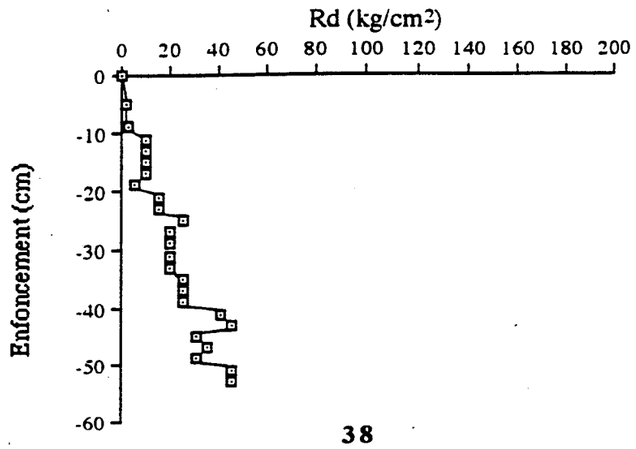
38: au pied d'un talus



37-B



37-C



38

BIBLIOGRAPHIE

Cartes topographiques 1: 25000 de Monestier-de-Clermont, de la Javie, de Barcelonnette Praloup et de Jausiers-le-sauze, Institut géographique nationale.

Cartes géologiques 1: 50000 de Chapelle-en-Vercors, de Mens et de Barcelonnette, BRGM

ANTOINE P., GIRAUD A., (1978), Travaux pratiques de géologie, INPG, 130p.

ANTOINE P., FABRE D., (1980), Géologie appliquée au génie civil, Masson, Paris, 291p.

AL HAYARI M., (1989), Une détermination des caractéristiques mécaniques de quelques formations alpines. Méthodes à l'équilibre limite et des éléments finis, Thèse docteur nouveau, Université Joseph Fourier, 214 p.

ASSOCIATION AMICALE DES INGENIEURS ANCIENS ELEVES DE l'E.N.P.C., (1976), La mécanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil, Imprimerie de Châtelaudron - 22170, pp 39-55, 79-94.

ARTRU P., (1972), Les Terres Noires du bassin Rhodanien (bajocien supérieur à oxfordien moyen). Stratigraphie, sédimentologie, géochimie, thèse doct. ès-sci., Université Claude Bernard de Lyon, 178 p.

BENDAOUD E. A., (1988), Les marnes et marno-calcaires du Nord-Est Algérien: caractéristiques et comportement en construction routière, thèse doct. nouveau, EMP, 143 p.

BUFALO M., (1989), L'érosion des Terres Noires dans la région du BUECH (Hautes Alpes, France), Thèse Doct. en Sci. de l'Université Aix-Marseille III, 230 p.

CADOR C., (1970), Techniques de préparation employés en microscopie électronique, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 46, juillet- août, pp 93-100.

CAMAPUM DE CARVALHO J., (1985), Etude du comportement d'une marne compactée, thèse doct. ing., INSA Toulouse, 181p.

CAQUOT A., KERISEL J., (1956), Traité de mécanique des sols, Gauthier-Villars, pp 492-512, pp 241-281.

CEMAGREF, ONF-RTM, (septembre 1987), Les bassins versants expérimentaux de DRAIX, compte rendu de recherche, n° 1, pp 81-104.

CEMAGREF, ONF-RTM, (mai 1989), Les bassins versants expérimentaux de DRAIX, compte rendu de recherche, n° 2, pp 27-72.

COLAS G., PILOT G., (1976), Description et classification des glissements de terrain, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., spécial, mars, pp 21-31.

COLAS G., DUBASQUE M., (1979), Les Terres Noires alpines, compte rendu préliminaire, Cete d'Aix- en- Provence.

COSTET J., SANGLERAT G., (1981), Cours pratique de mécanique des sols, Tome 1, Paris-Dunod, 283 p.

DEBELMAS J., (1970), Alpes Savoie et dauphiné, Masson et Cie, pp 9-23.

DEBELMAS J., (1974), Géologie de la France, Doin, VII, pp 395-410.

DEBELMAS J., (1982), Découverte géologie des Alpes du Sud, BRGM-OPHRYS, pp 7-35.

FOUCAULT A., RAOULT J. F., (1988), Dictionnaire de géologie, Masson, 352 p.

GUENOUN A., (1991), Exemple de hauts remblais en marne. Autoroute A51 - section Peyruiss/Sisteron, polycopie de la direction de formation continue de l'ENPC.

GIGAN J-P., (1974), Relations entre composition, texture et quelques propriétés

géotechniques des marnes et caillasses (lutétien supérieur), Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 72, juillet-août, pp 83-91.

GILLOTT J.E., (1968), Clay in engineering geology, Elsevier publishing comp., Amsterdam, pp 251-271.

HAVARD M., (1991), Les matériaux rocheux évolutifs. Aspects géologiques, minéralogiques et physiques, polycopie de la direction de formation continue de l'ENPC.

HERAUD H., RESTITUITO J. et al. (1975), Les marnes de Limagne, compte rendu provisoire, CETE de Lyon.

HOLTZ R. D., KOVACS W. D., (1991), Introduction à la géotechnique, Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, pp 313-697.

HOLTZAPFFEL T., (1985), Les minéraux argileux. Préparation. Analyse diffractométrique et détermination, Société géologique du Nord, publication n°12, Villeneuve d'Ascq, 136p.

LAUTRIN D., (1987), Une procédure rapide d'identification des argiles, Bull. Liaison Labo P. et Ch., 152, nov.-déc., pp 75-84.

LAUTRIN D., (1989), Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil, Bull. Liaison Labo P. et Ch., 160, fév.-mars, pp 53-65.

LEGIER A., (1977), Mouvements de terrain et évolution récente du relief dans la région de Barcelonnette, thèse de 3e cycle, Université Grenoble 1.

LEROUX A., (1969), Traitement des sols argileux par la chaux, Bull. Liaison Labo. P. et Ch.,40, sept-oct., pp 59-96.

LEROUX A., (1971), Le microscope électronique à balayage. Applications à l'étude des

marnes, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 54, août-sept., pp 6-13.

LEROUX A., (1972), Catactéristiques mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texture, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 61, sept-oct, pp 156-176

LEROUX A., DELAHAYE D., (1975), Désordres sur des remblais en marne, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 75, janv.-fév., pp 113-124.

LEROUX A., (1976), Classification des différentes textures de roches argileuses et marneuses en relation avec leur comportement, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., spécial, décembre, pp 39-48.

MAZET-BRACHET D., (1984), Glissements de terrains sous forêts, rapport de fin d'étude, ISTG, Université Grenoble 1.

MIEUSSENS C., CAMAPUM DE CARVALHO J., (1986), Remblais en marne: désordres, étude, confortation, SCETAUROUTE.

MIEUSSENS C., (1991), Evolution des caractéristiques mécaniques des sols, polycopie de la direction de formation continue de l'ENPC.

MILLOT G., (1964), Géologie des argiles. Altérations. Sédimentologie. Géochimie, Masson et Cie, Paris, p14-40.

MOORE D. M., REYNOLDS R. C., (1989), X - Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals, Oxford University press, Oxford, pp 202-269.

PELTIER R., (1959), Manuel du laboratoire routier, Dunod, Paris, 291 p.

PHAN Thi San Ha, (1989), Etude des caractéristiques minéralogiques et géotechniques de quelques échantillons de marnes de jurassique moyen et supérieur du Trièves, mémoire de DEA, Université joseph Fourier, 50 p.

PHAN Thi San Ha, (1991), Les Terres Noires du Trièves, rapport interne, CETE de

Lyon.

PUECH M., (1991), Conception des remblais en travaux neufs, polycopie de la direction de formation continue de l'ENPC.

PUIATTI D., GESTIN G., (1983), Tassement propre des remblais. Influence de la compacité, du degré de saturation et du mode de compactage, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 127, sept.-oct., pp 67-71.

RUNACHER (?), Mécanique des sols, Thèse doct. ing., Université de Grenoble, 211p.

SCHAEFFNER M., (1991), Les matériaux évolutifs dans la nouvelle classification RTR, polycopie de la direction de formation continue de l'ENPC.

SERRATRICE J. F., (1978), Contribution à l'étude du comportement mécanique des marnes, thèse doct. ing., INPG, 205 p.

SETRA-LCPC, Recommandations pour les terrassements routiers, fasc. 1,2,3, (janv. 1976), fasc. 4 (oct. 1981) et sept. 1992.

STRUILLOU R., (1969), Prévision de l'altérabilité des matériaux employés en génie civil, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 42, déc. pp 35-46.

TOURENQ C., (1969), Etude de la rupture des roches par la méthode réplique, Bull. Liaison Labo. P. et Ch.,42, déc., pp 47-56.

TRAN NGOC LAN, (1977), Un nouvel essai d'identification des sols. L'essai au bleu de méthylène, Bull. Liaison Labo; P. et Ch., 88, mars-avril, pp 136-137.

TRAN NGOC LAN, (1980), L'essai au bleu de méthylène. Un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des granulats, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 107, mai-juin, pp 130-135.

TRAN NGOC LAN, (1981), Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier, Bull. Liaison. Labo P. et Ch., 111, jan.-fév., pp 5-15.

VAN OLPHEN H., (1977), Clay colloid chemistry, A Wiley-Interscience Publication, New York,

WASCHKOWSKY E., (1983), Le pénétromètre dynamique. La reconnaisance des sols. Ses apllications, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 125, mai-juin, pp 95-105.

THESE DE DOCTORAT de l'Université
Joseph Fourier - Grenoble 1
(Arrêté ministériel du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992)

Titre de l'ouvrage:

PROPRIETES PHYSIQUES ET CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES TERRES NOIRES DU SUD-EST DE LA FRANCE

Nom de l'auteur:
PHAN thi San Ha

Etablissement:
Institut de Recherche Interdisciplinaire de Géologie et de Mécanique

RESUME

Une formation marneuse, nommée "Terres Noires", se rencontre fréquemment dans presque tout le secteur sud-est de la France. La recherche a visé à approfondir la connaissance des caractéristiques géotechniques des Terres Noires saines ou altérées, de trois régions différentes, le Trièves, la fenêtre de Barcelonnette et le bassin de Draix. Les essais d'identification classiques, comme limites d'Atterberg, granulométrie....., mais aussi des techniques plus fines (microscope électronique à balayage) ont été mis en oeuvre. Il en résulte qu'à part une différenciation minéralogique, les Terres Noires des trois secteurs étudiés peuvent être considérées comme un ensemble lithologique homogène dont les différences de comportement sont essentiellement liées à leur teneur en carbonate et à leur texture microscopique.

L'étude de l'utilisation des Terres Noires en remblai routier a aussi été effectuée en recourant à une série d'essais physiques et mécaniques. On en conclut que les matériaux extraits se prêtent à cet emploi, à la condition d'user de précautions particulières.

MOTS CLES

Terres Noires ; sain ; altéré ; essais d'identification ; lithologie ; texture ; remblai.